



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535:542.8

**В. И. ГОРБУНКОВ
Г. С. ГАРИБЯН
К. Р. САЙФУТДИНОВ
В. В. СЕДЕЛЬНИКОВ**

Омский государственный
технический университет
Омское моторостроительное
объединение им. П. И. Баранова

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ФОТОРЕАКТОРА

Приведены результаты исследования излучателя в виде бактерицидной ртутной лампы низкого давления, находящейся в замкнутой непрозрачной полости и входящей в систему проточного фотореактора, работающего по принципу падающей пленки. Показано, что в каждом конкретном случае использования излучателя в составе фотореактора необходимо проводить дополнительные исследования разрядных и излучательных характеристик с учетом коэффициента экстинкции реагента.

Ключевые слова: фотохимический реактор, эксимерные и бактерицидные ртутные лампы.

Введение. Успешное развитие фотохимии органических соединений привело к появлению целого ряда научных направлений, включая фотонику многоатомных органических молекул, фотохимию малых молекул, а также механистическую

(физическую) фотохимию и других. Высокая квантовая эффективность оптического излучения позволяет методами фотохимии получить вещества, которые невозможно получить иными методами.

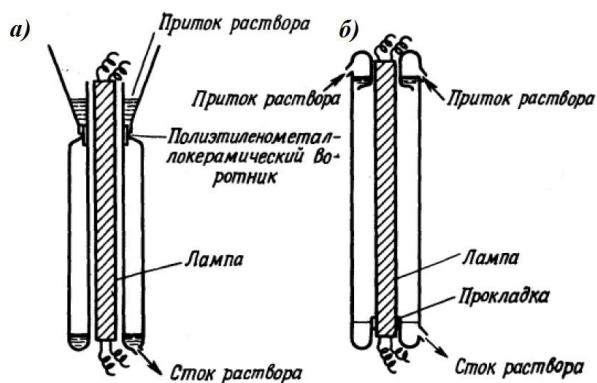


Рис. 1. Работающие на принципе падающей пленки фотохимические реакторы, в которых используются бактерицидные ртутные лампы с внутренней стенкой (а) и без внутренней стенки (б) [1]

Применение фотореакторов для решения задач, связанных с загрязнением окружающей среды, защитой биосферы от дефолиантов, порожденных современной цивилизацией как результатом хозяйственной деятельности человека, является приоритетной задачей современности.

В классических фотореакторах может происходить осаждение реакционных продуктов на стенках самих реакторов. Образующиеся при этом пленки или слои фотопродуктов поглощают и рассеивают свет, что существенно уменьшает выход фотохимической реакции [1]. Этому недостатка лишен реактор, построенный на принципе падающей пленки (рис. 1).

Раствор реагентов подается в такой реактор сверху, а затем тонкая пленка жидкости под действием силы тяжести падает вниз вдоль полых стенок сосуда из кварца (рис. 1а), либо соскальзывает вниз по внутренней поверхности внешней стенки (рис. 1б). Внутри сосуда устанавливается ртутная лампа низкого или среднего давления, которая обеспечивает равномерное облучение падающей пленки. Концентрация активного вещества выбирается такой величины, чтобы в тонком слое происходило полное поглощение.

В последнее время распространение получила разновидность реакторов, построенная на принципе падающей пленки — микроструктурные реакторы, известные как микроканальные. Они стали широко применяться и в фотохимических исследованиях [2].

Фотохимия в микрореакторах вызывает растущий интерес и является полезным дополнением к традиционным фотохимическим экспериментам. Важным для химии высоких энергий является то, что в систему вводится энергия, существенно превышающая тепловую. Поэтому в системах фотореакторов в качестве облучателей используются бактерицидные ртутные лампы среднего и низкого давления, имеющие высокую квантовую эффективность $h\nu \sim 4,67\text{эВ}$.

Предварительные сведения. Прежде чем отметить особенность работы газоразрядных ламп, помещенных в замкнутую светонепроницаемую полость в качестве облучателя с диффузно отражающими внутренними стенками, рассмотрим параметры дугового разряда ртутной лампы открытого типа.

Это бактерицидная ртутная лампа, которую обычно используют при фототерапии, бактерицидной обработки воды и стерилизации помещений.

Колба лампы промышленного изготовления ДРБ 8 (ДБ8М) представляет собой кварцевую трубку с толщиной стенки 1 мм, диаметром 16 мм и длиной 280 мм с межэлектродным расстоянием 235 мм. Колба наполнена буферным газом аргоном под давлением 400–800 Па; давление паров ртути при рабочей температуре стенок лампы 322–350 К составляет 0,8–0,9 Па. Рассматривается стандартная дроссельная система питания лампы. При прохождении переменного тока через нулевую точку происходит остывание электродов и частичная деионизация плазмы в столбе разряда. При этом на электродах лампы возникают пики напряжения перезажигания разряда (300–500 В). Небольшие пики перезажигания связаны с восстановлением плазмы в столбе и образованием плазмы в приэлектродных частях разряда [3]. При сильном остывании электродов пики напряжения перезажигания возрастают, так как требуется дополнительная энергия на местное нагревание электрода в области катодных пятен [3, 4]. Тем не менее даже при наличии пиков перезажигания стационарный режим горения разряда устанавливается за время около 0,7 мс $\ll 1/f = 20$ мс [3]. Поэтому в ряде работ, например [5], не делается резкого различия между излучением ламп, питаемых постоянным и переменным токами.

При рассмотрении влияния температуры колбы стандартной ртутной лампы на изменение свойств лампы, содержащей в качестве инертного газа аргон, оказалось, что за счет повышения температуры стенки T_c ее колбы с 308 до 323 К давление насыщенных паров ртути ($P_{Hg} \approx 3,00$ Па) увеличивается всего на 35 %, но остается практически на два порядка меньше давления аргона ($p_{Ar} = 200 - 400$ Па). При этих давлениях концентрация аргона $N_{Ar} = (1 - 2) \times 10^{17} \text{см}^{-3}$ намного превосходит концентрацию атомов ртути $N_{Hg} \approx 3 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$. Тем самым аргон оказывает определяющее влияние на теплопроводность плазмы, поэтому при оценке газовой температуры разряда необходимо учитывать теплопроводность аргона. А роль ртути, как малой добавки с низким потенциалом ионизации, сводится к формированию концентрации n_e и температуры T_e электронов. Как можно убедиться из кривой Пашена (рис. 2, 1 Па = 133,32 Торр), при таком давлении аргон имеет наименьшее напряжение пробоя, поэтому аргоновая среда лампы способствует легкому зажиганию разряда.

Вместе с тем взаимодействие электрона с атомами инертных газов подтверждает эффективность их взаимодействия. Ход кривой общего сечения у тяжелых инертных газов (рис. 3) обнаруживает при скоростях $v_e \leq 1$ эВ уменьшение эффективного сечения в десятки раз по сравнению с более высокими скоростями. При самых малых скоростях сечение опять возрастает.

Существование такого глубокого минимума эффективного сечения (при $v_e \sim 700$ К) подтверждает высокую степень прозрачности инертных газов для медленных электронов, это позволяет утверждать, что аргон оказывает определяющее влияние на дрейфовую скорость V_d электронов, а также ионов.

Сочетание свойств аргона, как инертного газа и паров ртути, имеющих низкий потенциал ионизации, привело к появлению удачной конструкции бактерицидной ртутной лампы низкого давления.

В бактерицидных лампах низкого давления паров ртути используется аномально тлеющий

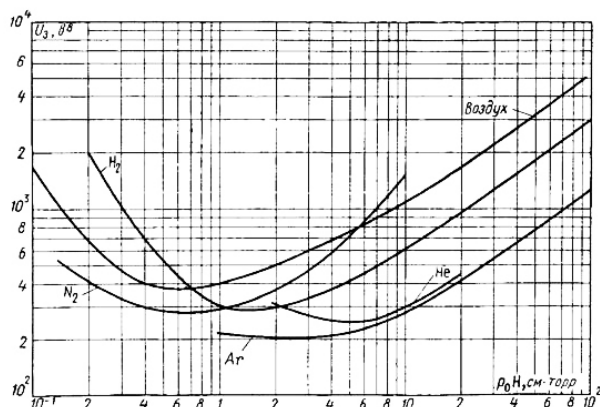


Рис. 2. Кривые Пашена для некоторых газов [6]

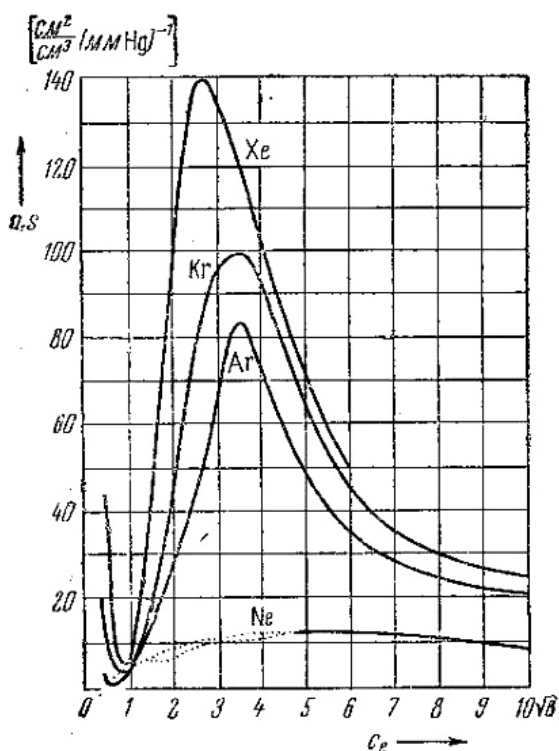


Рис. 3. Общее сечение атомов некоторых благородных газов: неона, аргона, криптона и ксенона [6]

или дуговой разряд. В этих разрядах, независимо от питающего напряжения, формируется неравномерная низкотемпературная плазма с концентрацией электронов $n_e < 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [3, 5]. В ней только кинетические скорости частиц удовлетворительно соответствуют Максвелловским распределениям, но с сильно отличающимися температурами электронов $T_e = 7\ 500 - 11\ 600 \text{ К}$ и атомов $T_g < 1000 \text{ К}$, а заселенности возбужденных уровней атомов ртути не подчиняются максвелловскому распределению. В диапазоне спектра излучения от 200 до 600 нм этих ламп доминирует резонансная линия атома ртути при $\lambda = 253,65 \text{ нм}$, в которой сосредоточено до 80 % излучаемой энергии [3, 5, 7].

Размещение излучателя в замкнутой непрозрачной полости приводит к изменению характеристик излучателя открытого типа из-за воздействия отраженного излучения на плазму лампы. Для выяснения роли отражения от пленки реагента в фо-

тореакторе на параметры излучателя необходимо проводить дополнительные исследования. Поэтому представляет интерес рассмотрение влияния отраженного оптического излучения на плазму дугового разряда низкого давления на простой модели излучателя закрытого типа. Модель представляет собой полость цилиндрической формы, выполненную из непрозрачного материала. Поверхность полости может легко принимать различные отражающие свойства: для создания светопоглощающей полости внутренняя поверхность ее покрывается мелкодисперсной сажей, для получения эффективного отражения — химически инертной алюминиевой оксидной пленкой, что соответствует предельным коэффициентам отражения от (0,1–0,15) до (0,85–0,90). Высокое поглощение оптического излучения в первом случае позволяет считать его свойства близкими к излучению лампы в свободном пространстве с той особенностью, что температура центральной части колбы лампы увеличилась приблизительно на 5°C по сравнению с открытой лампой. На рис. 4 приведены спектры излучения аномально-тлеющего разряда лампы, помещенной в светопоглощающую полость и в полость с диффузно отражающей внутренней поверхностью.

В спектре излучения (рис. 4а) доминирует резонансная линия атома ртути при $\lambda = 253,65 \text{ нм}$, в то время, как в спектре рис. 4б нет явной доминанты резонансной линии атома ртути и возросли относительные интенсивности линий других оптических переходов атома ртути. Интенсивность линий на рис. 4б может быть приближена к равновесному излучению при наличии максвелловского распределения населенности энергетических уровней излучающих атомов [8], что может подтвердить высокая оптическая плотность среды.

Существенной отличительной особенностью излучения лампы, находящейся в полости с диффузно отражающими стенками, является сильное поглощение (пленение) всех спектральных линий. Оно проявляется в уплощении и уширении вершин контуров и приводит к увеличению эффективного радиационного времени жизни излучательных уровней [9]. При существенном самопоглощении света возрастает оптическая плотность. Оценка оптической плотности $D = \lg(I_0/I)$, (где I_0/I — отношение интенсивности линии в свободном пространстве и в замкнутой полости), может быть выполнена на основе измерения кратности «ослабления» интенсивности спектральной линии излучения — интенсивности в центре контуров обращенной (рис. 4б) и не искаженной (рис. 4а) спектральной линии, соответственно. Оптическая плотность с учетом контура линии атома ртути $\lambda = 253,65 \text{ нм}$ достигает $D = 5,04$.

Результаты исследований. Исследования разрядных характеристик были проведены на основе фотографической регистрации поперечного сечения разряда бактерицидной ртутной лампы низкого давления, помещенной в замкнутую полость цилиндрической формы диаметром 84 мм (рис. 5).

Апертура (2) диаметром 17 мм, служащая для вывода излучения наружу, расположена напротив средней части газоразрядной лампы.

Регистрация поперечного сечения разряда бактерицидной лампы осуществлялась цифровой фотокамерой Panasonic DMC-FZ45 «Lumix» через зеленый светофильтр (2) и оптический коллиматор (3) с фокусным расстоянием 50 мм. Измерение сечения газового разряда проводилось с помощью

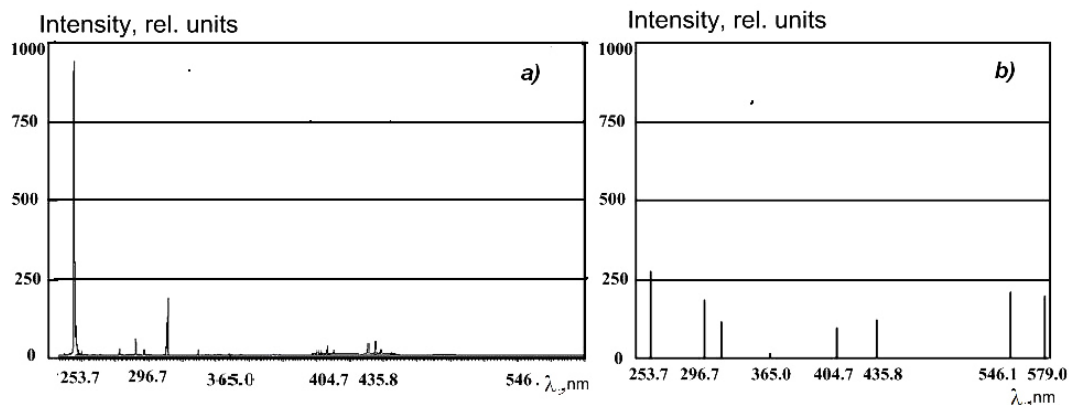


Рис. 4. Спектры излучения ртутной лампы, помещенной в светопоглощающую полость (а) и в полость с диффузно отражающей поверхностью (б). Токи лампы $I = 194$ мА. Для наглядности интенсивность резонансной линии атома ртути при $\lambda = 253,65$ нм (а) уменьшена в 10 раз

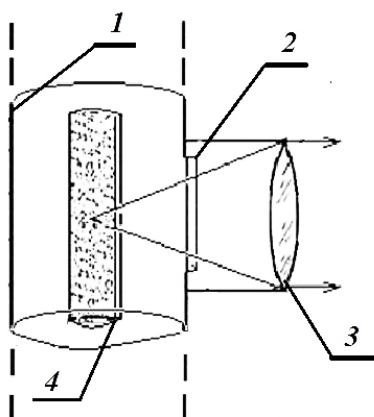


Рис. 5. Схема для регистрации поперечного сечения разряда
1 — диффузно отражающая полость; 2 — светофильтр, перекрывающий апертуру; 3 — линза коллиматора; 4 — газовый разряд лампы

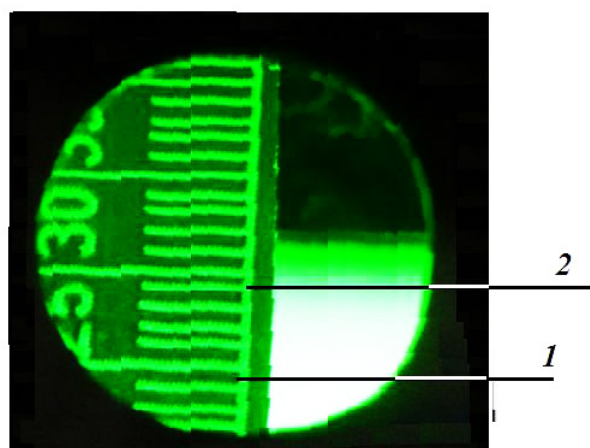


Рис. 6. Фотография свечения излучения лампы, выполненная через апертуру полости. Относительно верхней границы колбы определена ось разряда (1), (2) — граница разряда; искомый радиус разряда равен 0,5 см

лимба, штрихи которого нанесены через 1 мм на непрозрачной основе (рис. 5).

На снимке хорошо видна внутренняя и внешняя стенка колбы лампы толщиной 1 мм; относительно внешней стенки колбы определена ось разряда, поперечное сечение разряда $S_{dis} = 0,79$ см². Ток лампы $I_L = 306$ мА при падении напряжения $U_L = 42,5$ В.

Согласно приведенной к концентрации атомов аргона N_{Ar} напряженность электрического поля $U/(L_e \times N_{Ar}) \approx (0,7 - 2,0) \times 10^{-16}$ В×см² дрейфовая скорость электрона в аргоне составляет $V_d \approx (2,5 - 3,5) \times 10^4$ м/с [10]. Найденная плотность тока $j = I/S_{dis} = en_e V_d = 0,4$ А/см² позволила определить электронную концентрацию $n_e \sim (0,6 - 2) \times 10^{12}$ см⁻³, много меньшую, чем концентрация атомов ртути $N_{Hg} \approx 3 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

Температура стенки лампы T_c в полости имеет температуру прогретой лампы 49^oС (322 К), которая со временем достигает стационарной температуры 77^oС (350 К). С ростом температуры повышается давление насыщенных паров ртути ($p_{Hg} \approx 4$ Па) и инертного газа аргона, оставаясь в пределах ($p_{Ar} \approx 100 - 300$ Па). Газовая температура $T_g < 10^3$ К меняется с изменением концентрации электронов и тока лампы.

Оценка максимальной газовой температуры на оси разряда была проведена на основе баланса

мощности электрической энергии $P = U \cdot I$, вводимой в плазму и отводимой из неё за счёт теплового потока, с учетом теплопроводности аргона λ_{Ar} , равного 0,034 Вт/(м·К) при $T_g = 700$ К [11]:

$$q = \frac{IU}{S_p} \approx \lambda_{Ar} \frac{T_g - T_c}{r}, \quad (1)$$

где $S_p = 2\pi r L_e \approx 72,2$ см² — внешняя поверхность плазмы.

Оценка (4) позволяет определить максимальную газовую температуру на оси разряда

$$T_g = \frac{q \cdot R}{\lambda_{Ar}} + T_c, \quad (2)$$

которую можно считать равной ионной температуре $T_g \approx T_i$.

Найденное значение ионной температуры, а также приблизительное равенство электронной и ионной концентрации $n_e = n_i$ исходя из предположения квазинейтральности элемента пространства, занимаемого плазмой, позволяет оценить величину дебаевского радиуса экранирования

$$r_D = \left(\frac{k_B T T_i}{4\pi e^2 (n_e T_e + n_i T_i)} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где n_e , e — концентрация и заряд электронов (в см^{-3} и СГСЕ), n_i , e_i — концентрация и заряд для ионов, T_e , T_i — температуры электронов и ионов в кельвинах; $k_B = 1,38 \times 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана. Исходя из экспериментально найденных значений электронной концентрации $n_e \sim (0,6 - 2) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, ионной температуры $T_i = 600$ К, при $T_e = (9200 \text{ К})$, величина дебаевского радиуса экранирования $r_D = (2,11 - 1,16) \times 10^{-4}$ см, что совпадает с данными для газоразрядных трубок [12].

Важным параметром среды является число частиц в сфере дебаевского радиуса:

$$n_D = \frac{4\pi}{3} r_D^3 \sum_j n_j.$$

Следует отметить, что все типы зарядов вносят положительный вклад в Дебаевский радиус вне зависимости от их знака; число n_D характеризует отношение средней кинетической энергии (E_{kin}) частиц к средней энергии их кулоновского взаимодействия (E_Q):

$$n_D \approx \left(\frac{E_{kin}}{E_Q} \right)^{3/2}.$$

Для рассматриваемой плазмы $n_D \sim 40,5$ достаточно велико, по отношению к электролитам, для которых это число $n_D \sim 10^{-4}$ мало, что позволяет считать применимым к рассматриваемому газовому разряду методы кинетической теории.

Выводы. Необходимо иметь в виду, что характеристики излучателя в замкнутой полости фотореактора меняются и зависят от оптических свойств реагента. На примере бактерицидной ртутной лампы показано, что при помещении ее в диффузно отражающую полость меняются излучательные характеристики плазмы газового разряда низкого давления, а именно: резонансная линия атома ртути при $\lambda = 253,65$ нм теряет доминирующую роль, отмечается видоизменение всех спектральных линий, возрастает оптическая плотность. Показано, что методы кинетической теории газов допустимы для описания взаимодействия плазмы газового разряда с облачаемым веществом реагентов.

Библиографический список

- Соколова, И. В. Фотореакторы : учеб.-метод. пособие / И. В. Соколова, О. Н. Чайковская, Н. О. Вершинин. — Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 2014. — 68 с.
- Coyle, E. E. Microphotochemistry: photochemistry in microstructured reactors. The new photochemistry of the future? / E. E. Coyle, M. Oelgemeoller // Photochem. Photobiol. Sci. — 2008. — V. 7. — P. 1313—1322.
- Рохлин, Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Ролин. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 720 с.
- Федоренко, А. С. Люминесцентные лампы (расчёт, моделирование, экспериментальные исследования, создание конструкторских и технологических решений) / А. С. Федоренко. — Саранск : Изд-во СВМО, 2009. — 334 с.
- Биберман, Л. М. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы / Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, И. Т. Якубов. — М. : Наука, 1982. — 376 с.
- Грановский, В. Л. Электрический ток в газе / В. Л. Грановский // Общие вопросы электродинамики газов. — М., Л. : ГИТТЛ, 1952. — Т. 1. — 432 с.
- Уэймаус, Д. Газоразрядные лампы / Д. Уэймаус ; пер. под ред. Г. Н. Рохлина. — М. : Энергия, 1977. — 345 с.
- Фриш, С. Э. Оптические спектры атомов / С. Э. Фриш. — М., Л. : ГИФ-МЛ, 1963. — 640с.
- Gorbunkov, V. I. Arc low-pressure mercury lamp as a Planck radiator, results of the study / V. I. Gorbunkov, V. I. Solomonov. — Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2012. — 120 P. — ISBN 978-3-8465-3400.
- Смирнов, Б. М. Моделирование газоразрядной плазмы / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179. — С. 591—604.
- Физические величины : справ. / А. П. Бабичев [и др.]. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — С 1232.
- Chapter 19. The Particle Kinetics of Plasmas [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.cns.gatech.edu/PHYS-4421/caltech136/0019.3.ps (дата обращения: 19.12.1015).

ГОРБУНКОВ Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника», научный руководитель лаборатории «Фотоника и спектроскопия газового разряда» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ГАРИБЯН Гарегин Серезович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий секцией «Машины и технология литейного производства» кафедры машиностроения и материаловедения ОмГТУ.

САЙФУТДИНОВ Константин Рустемович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент секции «Информационно-измерительная техника» кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики ОмГТУ.

СЕДЕЛЬНИКОВ Владимир Васильевич, кандидат технических наук, ведущий инженер Омского моторостроительного объединения им. П. И. Баранова. Адрес для переписки: vigorbunkov@list.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2016 г.

© В. И. Горбунков, Г. С. Гарибян, К. Р. Сайфутдинов, В. В. Седелников

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ CdS-ZnS ДЛЯ ПРИБОРОВ-ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

По разработанной методике получены новые материалы — твердые растворы $(\text{CdS})_x(\text{ZnS})_{1-x}$ различного состава. На основе исследований их объемных (кристаллохимических, структурных) и поверхностных (кислотно-основных) свойств, установленных взаимосвязанных закономерностей в изменении тактовых с составом даны практические рекомендации по использованию полученных материалов в качестве эффективных (высокочувствительных) полупроводниковых элементов приборов-анализаторов основных газов (типа NH_3).

Ключевые слова: новые материалы, объемные и поверхностные свойства, полупроводниковые (высокочувствительные) элементы, приборы, газоанализаторы.

Данная работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ № 4.2543.2014/К.

Работа посвящена созданию эффективных полупроводниковых элементов газоанализаторов на основе системы CdS-ZnS. Являясь одной из новых полупроводниковых систем типа $A^{IV}B^{VI}-A^{II}B^{VI}$ гомогенного замещения, она включает в себе возможности регулирования и оптимизации свойств за счет изменения состава, а отсюда — возможности получения перспективных материалов современной техники, полупроводникового приборостроения [1–4].

Реализация таких возможностей существенно зависит от владения надежными методиками и знаниями объемных и поверхностных физико-химических свойств. Роль поверхностных свойств особенно велика в формировании полупроводниковых приборов, активная часть которых соизмерима с толщиной приповерхностных слоев, а также приборов, принцип действия которых непосредственно основан на электронных явлениях вблизи поверхности [5].

Соответственно, в данной работе анализируются результаты получения перспективных материалов — полупроводниковых элементов, выполненных рентгенографических, электронно-микроскопических исследований, определения кислотно-основных свойств поверхности.

Арсенал исследуемых объектов включал в себя порошки (преимущественно тонкодисперсные) бинарных халькогенидов CdS, ZnS и их твердых рас-

творов $(\text{CdS})_x(\text{ZnS})_{1-x}$ ($x = 0,78; 0,77; 0,55; 0,25$ мол.). Для получения твердых растворов была разработана (применительно к изучаемой системе CdS-ZnS) методика, базирующаяся на изотермической диффузии CdS, ZnS (в вакуумированных запаянных кварцевых ампулах, при температуре 1173 К), с использованием специальной программы температурного нагрева [4]. О завершении синтеза судили по результатам рентгенографического анализа, использованным затем для аттестации и определения структуры твердых растворов.

Рентгенографический анализ проводили на дифрактометре D8 Advance фирмы «Bruker» (Германия) в CuK_α — излучении ($\lambda = 0,15406$ нм, $T = 293$ К) по методике большеугловых съемок [6–8], с использованием позиционно-чувствительного детектора Лупхеуе. Расшифровку полученных рентгенограмм (дифрактограмм) выполняли, используя базу данных по порошковой дифракции ICDDIPDF-2, уточнение параметров решетки — в программе TOPAS 3,0 (Bruker) по методу наименьших квадратов.

Электронно-микроскопические исследования осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JCM-5700, снабженном беззотным рентгеновским энергодисперсионным спектрометром [9].

Кислотно-основные свойства поверхности изучали методами гидролитической адсорбции (определение pH изоэлектрического состояния —

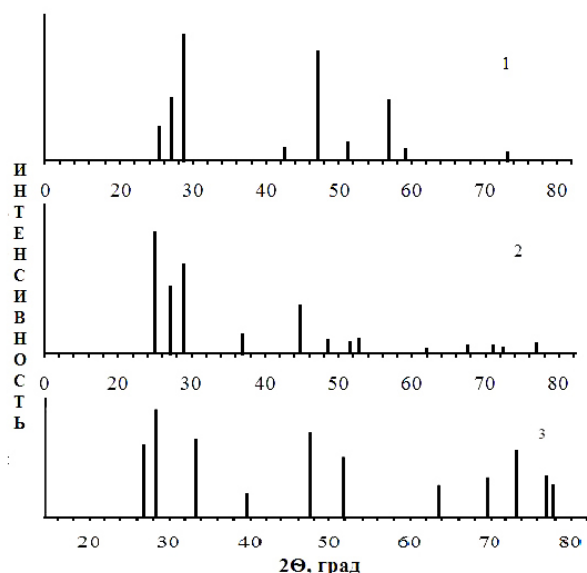


Рис. 1. Схемы рентгенограмм компонентов системы CdS-ZnS:
1 — CdS, 2 — $ZnS_{0,22}CdS_{0,78}$, 3 — ZnS

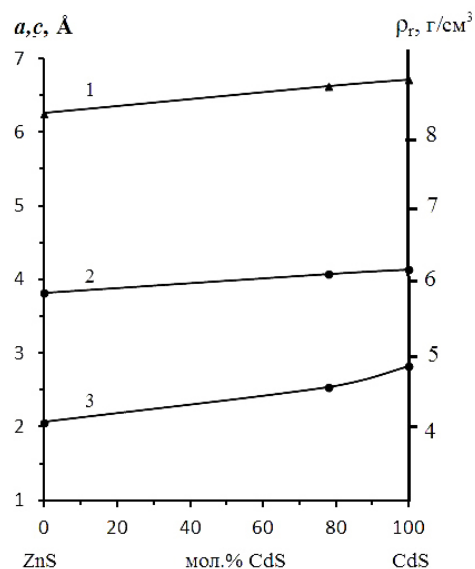


Рис. 2. Зависимости значений параметров кристаллической решетки с (1), a (2) и рентгеновской плотности ρ_r (3) компонентов системы CdS-ZnS со структурой вюрцита от состава

Таблица 1

Значения параметров кристаллической решетки (a, c), межплоскостных расстояний (d_{hkl}) и рентгеновской плотности (ρ_r) компонентов системы CdS-ZnS

X, (мольная доля CdS)	Тип кристаллической решетки	a, Å	c, Å	d_{hkl} , Å			ρ_r , г/см ³
				010	110	311	
0	гекс.	3,822±0,001	6,263±0,001	3,165	1,923	1,243	4,086
0,78	гекс.	4,075±0,001	6,628±0,001	3,268	2,018	1,457	4,541
1	гекс.	4,151±0,001	6,711±0,001	3,348	2,057	1,792	4,843

$pH_{\text{изо}}$), неводного кондуктометрического титрования, механохимии [10, 11].

Воспроизводимость и точность экспериментальных данных проверяли по результатам параллельных измерений с использованием методов математической статистики и обработки результатов количественного анализа. Статистическую обработку полученных численных значений, расчет погрешностей измерений, построение и обработку графических зависимостей проводили с использованием компьютерных программ Stat-2, Microsoft Excel и Origin.

Результаты рентгенографических исследований представлены на рис. 1, 2 и в табл. 1. Они свидетельствуют об образовании в системе твердых растворов замещения: соответствующие линии на рентгенограммах сдвинуты относительно линий бинарных компонентов при постоянном их числе (рис. 1); зависимости значений параметров решеток (a, c), межплоскостных расстояний (d_{hkl}) и плотности (ρ_r) от состава системы имеют плавный характер (рис. 2, табл. 1).

В соответствии с положением и распределением по интенсивности основных линий, компоненты системы имеют преимущественно гексагональную структуру вюрцита.

Отсутствие на рентгенограммах дополнительных линий, отвечающих непрореагировавшим бинарным компонентам, а также размытости основных линий указывают на полное завершение процесса синтеза и дополнительно — на образование твердых растворов.

На основе электронно-микроскопических исследований (рис. 3–5) определены элементный состав бинарных компонентов и твердых растворов, структура их поверхности, средний размер частиц, зависимость количества частиц определенного (среднего) размера от состава системы.

Элементный состав всех компонентов удовлетворительно согласуется с мольным составом, поверхность поликристаллическая с неоднородным распределением кристаллитов, способных ассоциироваться в агломераты из зерен различного размера.

Результаты электронно-микроскопических исследований подтвердили **результаты микроскопических исследований**: отмечаем практические совпадения в определении размера частиц, в зависимости количества частиц определенного (среднего) размера от состава системы.

Комплексное исследование кислотно-основных свойств (с привлечением методов определения $pH_{\text{изо}}$, неводного кондуктометрического титрования,

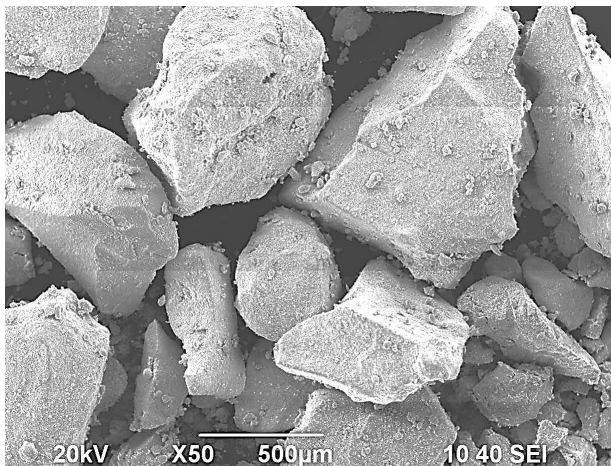


Рис. 3. SEM — изображение порошка CdS в режиме фазового контраста

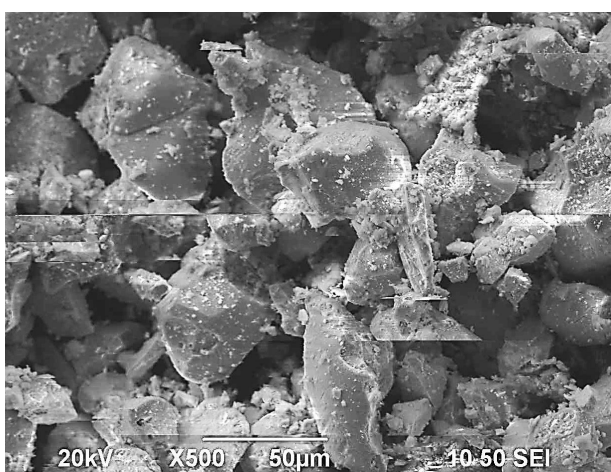


Рис. 4. SEM — изображение порошка твердого раствора $(\text{CdS})_{0,78} (\text{ZnS})_{0,22}$ в режиме фазового контраста

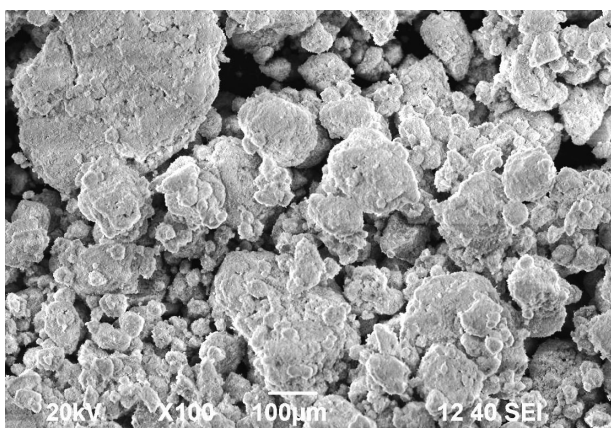


Рис. 5. SEM — изображение порошка ZnS в режиме фазового контраста

механохимии) позволило оценить силу, концентрацию, природу кислотных центров поверхности компонентов системы CdS-ZnS, экспонированных на воздухе.

О силе кислотных центров можно судить по значениям $\text{pH}_{\text{изо}}$ (рис. 6). В ряду $\text{CdS} \rightarrow (\text{CdS})_x (\text{ZnS})_{1-x} \rightarrow \text{ZnS}$ для контактировавших с воздухом поверх-

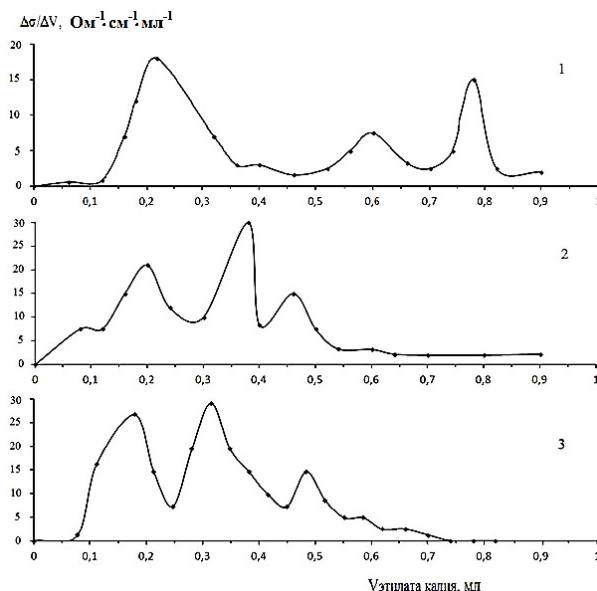


Рис. 6. Дифференциальные кривые кондуктометрического титрования компонентов системы CdS-ZnS, хранившихся на воздухе: 1 — CdS; 2 — $(\text{CdS})_{0,78} (\text{ZnS})_{0,22}$; 3 — ZnS

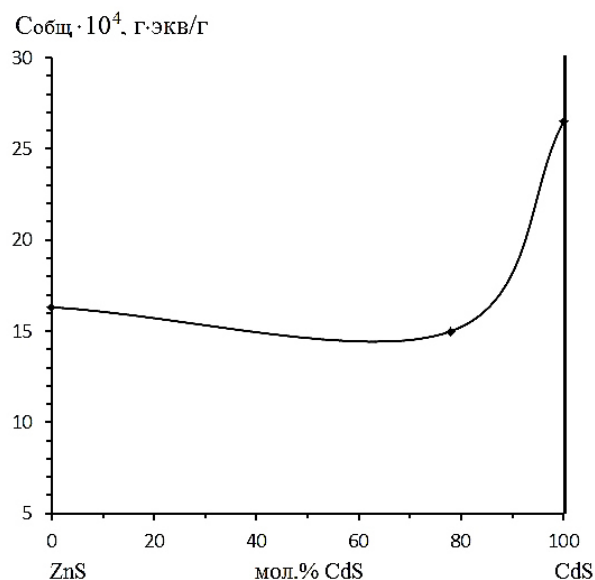


Рис. 7. Зависимость общей концентрации кислотных центров компонентов системы CdS-ZnS от состава

ностей они изменяются в пределе 6,5–6,8, отвечая слабокислой области и свидетельствуя о некотором преобладании кислотных центров. При такой характеристике поверхности логично ожидать ее повышенную адсорбционную активность по отношению к основным газам.

Обратимся к результатам неводного кондуктометрического титрования (рис. 7). Наличие на кривых $\Delta\sigma/\Delta V - V$ трех и более пиков позволяет говорить о существовании на исходной (экспонированной на воздухе) поверхности всех компонентов системы CdS-ZnS различных типов кислотных центров и, соответственно, об образовании в твердых растворах катион-анионных комплексов, распределенных неравномерно [4, 11]. То есть определенному составу системы соответствуют свои, отличающиеся по силе, кислотные центры.

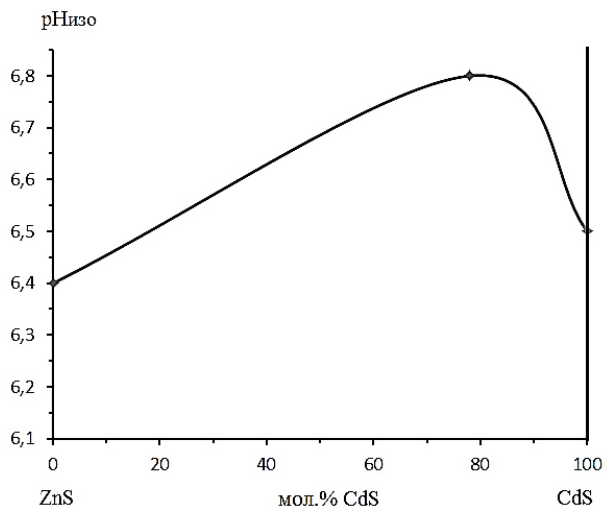


Рис. 8. Зависимость от состава pH-изоэлектрического состояния поверхности компонентов системы CdS-ZnS

Ответственными за кислотные центры, в согласии с ранее высказанными соображениями (см., например, [5, 10, 11]), могут выступать координационно-ненасыщенные атомы (центры Льюиса), адсорбированные молекулы воды и группы OH (центры Бренстеда). В данном случае, при значениях $pH_{\text{изо}} < 7$ основной вклад в кислотно-основное состояние вносят, скорее всего, координационно-ненасыщенные атомы, отличающиеся эффективным зарядом ($q_{\text{эф}}$). Подтверждением являются смещение точки $pH_{\text{изо}}$ в направлении повышения кислотности с увеличением содержания CdS, корреляции между зависимостями « $pH_{\text{изо}}$ — состав», «относительная активность свежееобразованной поверхности — состав», « $C_{\text{общ}}$ — состав» ($C_{\text{общ}}$ — общая концентрация кислотных центров, рассчитанная по всем пикам дифференциальных кривых неводного кондуктометрического титрования (рис. 7–9). Они носят экстремальный характер: с минимумом для Собщ и максимумом для относительной активности свежееобразованной поверхности при одном и том же составе системы $(CdS)_{0,78}(ZnS)_{0,22}$.

При выяснении природы кислотно-основных центров полезными оказались результаты механохимических исследований, которые показали небольшое подщелачивание среды (воды) по истечении 7–10 мин диспергирования в ней крупнодисперсных порошков бинарных компонентов (CdS, ZnS) и твердого раствора $(CdS)_{0,78}(ZnS)_{0,22}$ (рис. 9).

Принимая во внимание предложенную нами ранее (см., например, в [5, 10, 11]) схему механизма протекающих при этом явлений, важно подчеркнуть «высвечивающуюся» роль поверхностных координационно-ненасыщенных атомов. Именно вследствие взаимодействия воды с координационно-ненасыщенными атомами (S), находящимися на вновь созданной поверхности, образуются кислоты H_2SO_4 , H_2SO_3 , которые в процессе механохимического воздействия переходят в раствор, отщепляя свои остатки (SO_4^{2-} , SO_3^{2-}). Гидролиз остатка слабой кислоты (SO_3^{2-}) и обуславливает подщелачивание среды.

Заключение. Впервые (для заданных составов) получены и аттестованы новые материалы — твердые растворы замещения $(CdS)_x(ZnS)_{1-x}$. С использованием комплекса методов изучены их объемные

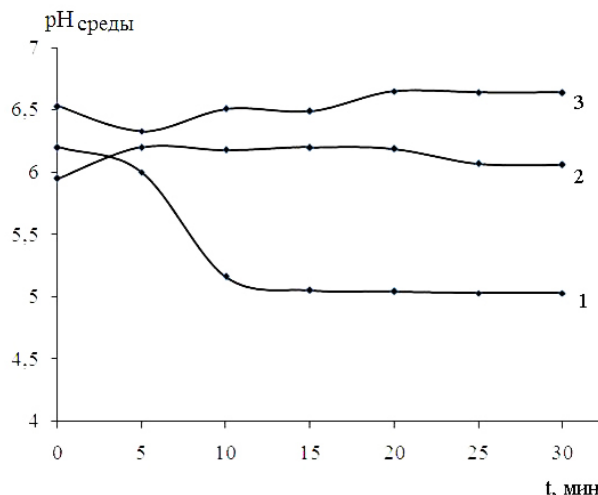


Рис. 9. Кинетические изотермы диспергирования в воде компонентов системы CdS-ZnS: 1 — CdS, 2 — ZnS, 3 — $(CdS)_{0,78}(ZnS)_{0,22}$

(кристаллохимические, структурные) и поверхностные (кислотно-основные) свойства, в сравнении с бинарными соединениями (CdS, ZnS).

Установлены закономерности в изменении изученных свойств с составом, взаимосвязь между закономерностями. При этом обнаружены преобладающие проявления как статистического фактора (относительно a , ρ_r , d_{hkl}), так и экстремального (относительно кислотно-основных характеристик).

Даны толкования фактов о природе, силе, концентрации кислотных центров, кислотно-основных взаимодействиях на поверхности полупроводников системы CdS-ZnS, важные не только для подтверждения ранее предложенных механизмов атомно-молекулярных взаимодействий, но и для поиска новых, перспективных материалов — эффективных (высокочувствительных) полупроводниковых элементов газоанализаторов микропримесей основных газов (типа NH_3), без проведения прямых, трудоемких адсорбционных исследований.

Библиографический список

1. Мясников, И. А. Полупроводниковые детекторы активных частиц в физико-химических исследованиях / И. А. Мясников [и др.] // Журн. Всесоюз. хим. о-ва. — 1975. — Т. 20. — № 1. — С. 19–32.
2. Черепин, В. Г. Методы и приборы для анализа поверхности материалов / В. Г. Черепин, И. А. Васильев. — Киев : Наукова думка, 1982. — 399 с.
3. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. — М. : Энергия, 1978. — 248 с.
4. Кировская, И. А. Твердые растворы бинарных и многокомпонентных полупроводниковых систем / И. А. Кировская. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 400 с.
5. Кировская, И. А. Поверхностные явления / И. А. Кировская. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2001. — 176 с.
6. Миркин, С. Е. Справочник по рентгеноструктурному анализу / С. Е. Миркин. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. — 863 с.
7. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. — М. : Металлургия, 1970. — 107 с.
8. Смыслов, Е. Ф. Экспрессный рентгеновский метод определения периода решетки нанокристаллических матери-

алов / Е. Ф. Смыслов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2006. — Т. 72. — № 5. — С. 33–35.

9. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. В 2 кн. Кн. 1 / Дж. Гоудстейн [и др.] ; пер. с англ. — М. : Мир, 1984. — 303 с.

10. Кировская, И. А. Поверхностные свойства алмазоподобных полупроводников. Химический состав поверхности. Катализ / И. А. Кировская. — Иркутск : Изд-во ИГУ, 1988. — 220 с.

11. Кировская, И. А. Поверхностные свойства бинарных алмазоподобных полупроводников / И. А. Кировская. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. — 416 с.

КИРОВСКАЯ Ираида Алексеевна, доктор химических наук, профессор (Россия), руководитель научно-образовательного центра «Химические исследования», заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации.

МИРОНОВА Елена Валерьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, научный сотруд-

ник научно-образовательного центра «Химические исследования».

ГРИГАН Анна Анатольевна, аспирантка кафедры «Химическая технология и биотехнология».

ЗВЕРЕВ Михаил Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры физики, научный сотрудник научно-образовательного центра «Химические исследования».

БЛЕСМАН Александр Иосифович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры физики, директор Научно-образовательного ресурсного центра нанотехнологий.

ПОЛОНЯНКИН Денис Андреевич, кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры физики, инженер Научно-образовательного ресурсного центра нанотехнологий.

Адрес для переписки: phiscem@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 13.01.2016 г.

© И. А. Кировская, Е. В. Миронова, А. А. Григан, М. А. Зверев, А. И. Блесман, Д. А. Полонянкин

УДК 519.653:681.515.8

**А. В. МАЙСТРЕНКО
А. А. СВЕТЛАКОВ
Н. В. СТАРОВОЙТОВ**

Томский государственный
университет систем
управления и радиотехники

ЦИФРОВОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩЕЙ КВАДРАТИЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СИНТЕЗЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Разработан метод цифрового дифференцирования сигналов, основанный на применении скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц. На его основе синтезирован новый ПИД-регулятор, обладающий существенными преимуществами, к которым можно отнести более высокую помехоустойчивость, точность и качество регулирования, а также достаточно простую программную и аппаратную реализацию.

Ключевые слова: аппроксимация, псевдообратная матрица, цифровое дифференцирование сигналов, ПИД-регулятор.

Введение. В настоящее время наиболее широкое распространение в системах автоматического и автоматизированного управления получили так называемые ПИД-регуляторы [1, 2]. Это произошло благодаря тому, что данные регуляторы, достаточно просто устроены, имеют низкую себестоимость изготовления и во многих случаях обеспечивают соблюдение заданных режимов реализации технологических процессов с необходимой точностью. Однако, как показывает практика применения данных регуляторов, они имеют и ряд известных недостатков [2], которые существенно ограничива-

ют область их применения. Ниже анализируются причины, обуславливающие данные недостатки, и предлагается метод, позволяющий синтезировать новый ПИД-регулятор, обеспечивающий более высокую эффективность регулирования управляемых процессов и объектов. Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований данного регулятора и его сравнения с классическим ПИД-регулятором.

Анализ недостатков ПИД-регуляторов и возможностей их устранения. Как известно [2], большинство современных ПИД-регуляторов, как

и выпускавшиеся ранее, в качестве алгоритмов дифференцирования используют простейшие алгоритмы, основанные на использовании конечных приращений дифференцируемого сигнала и времени. Как неоднократно отмечалось в работах различных авторов [3], такие алгоритмы обладают крайне низкой устойчивостью к ошибкам в измерениях дифференцируемого сигнала и именно эта чрезмерная чувствительность операции дифференцирования к ошибкам задания дифференцируемого сигнала является главной причиной низкой эффективности ПИД-регулирования. Результаты выполненных нами многочисленных экспериментов [4] наглядно иллюстрируют неустойчивость и неэффективность обсуждаемого алгоритма дифференцирования сигналов.

Отмеченное выше позволяет вполне однозначно заключить, что для повышения эффективности ПИД-регулирования различных процессов, переменные которых измеряются с ошибками, необходимо:

1) прежде всего отказаться от использования упомянутого выше простейшего метода дифференцирования сигналов;

2) заменить данный метод каким-либо другим методом подобного назначения, но обладающим более высокой устойчивостью к ошибкам задания дифференцируемого сигнала.

Анализ имеющихся на сей счет возможностей, выполненный авторами [4] показал, во-первых, что в настоящее время существует целый ряд методов дифференцирования сигналов и реализующих их алгоритмов, каждый из которых является более устойчивым к ошибкам задания дифференцируемого сигнала. Во-вторых, наиболее доступным для реализации в рамках систем автоматического управления, функционирующих в режиме реального времени, является метод цифрового дифференцирования сигналов (МЦДС), основанный на локальной квадратичной аппроксимации дифференцируемых сигналов и использовании для ее получения псевдообратных матриц [5].

Перечисленное выше явилось для авторов стимулом для того, чтобы синтезировать более совершенный ПИД-регулятор и использовать при этом отмеченный выше МЦДС, который бы обладал существенными преимуществами перед массово выпускаемыми ПИД-регуляторами. Некоторые результаты, касающиеся синтеза названного выше МЦДС и основанного на его использовании ПИД-регулятора, а также результаты экспериментальных исследований предлагаемого ПИД-регулятора обобщаются ниже.

Синтез МЦДС на основе скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц. Синтез предлагаемого МЦДС сводится к реализации следующих семи положений [4]:

1. В качестве аппроксимирующей сигнал $s=s(t)$ функции $\hat{s}=\hat{s}(t)$ используется алгебраический полином 2-го порядка вида

$$\hat{s}(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2, \quad (1)$$

где c_0, c_1 и c_2 — коэффициенты, численные значения которых подбираются так, чтобы погрешность аппроксимации имела минимальное значение.

2. Для количественной оценки погрешности аппроксимации используется евклидова метрика $\rho(s, \hat{s})$, определяемая равенством

$$\rho(s, \hat{s}) = \left(\sum_{i=1}^m (s_i - \hat{s}_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $s_i=s(t_i)$ — измеренные значения дифференцируемого сигнала $s=s(t)$ в моменты времени t_i , удовлетворяющие равенствам $t_i = t_{i-1} + \Delta t$, $i = \overline{1, m}$; Δt — шаг дискретизации времени t_i , выбираемый с учетом скорости изменения сигнала, возможностей датчика его значений, ошибок их задания и т.п.; \hat{s}_i — значения полинома (1), соответствующие моментам времени t_i ; m — некоторое ограниченное натуральное число, меньшее M . Здесь M — верхняя граница допустимых значений m — натуральное число, выбираемое с учётом технических возможностей аппаратного устройства, и реализующего дифференцирование сигнала, а также желаемого быстродействия данного устройства, уровня ошибок в значениях дифференцируемого сигнала и т.п.

3. Задача аппроксимации сигнала $s=s(t)$ полиномом (1) решается в режиме так называемого «скользящего окна». Это означает, что число m , которое, как это и принято в подобных случаях, будем называть шириной «скользящего окна» и выбирается так, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$\text{а) } m \geq 3 \quad \text{и} \quad \text{б) } m < M. \quad (3)$$

4. Используя последние m пар имеющихся в момент времени t_k значений (t_i, s_i) и вектор вычисленных в предшествующий момент времени t_{k-1} оценок c_{k-1} коэффициентов c полинома (1), формируется и решается система условных линейных алгебраических уравнений вида

$$A_k \Delta c_k \approx \Delta s_k, \quad (4)$$

где « \approx » — символ приближённого равенства векторов. При этом матрица коэффициентов A_k , неизвестный вектор поправок Δc_k , уточняющих имеющиеся оценки c_{k-1} и правая часть Δs_k определяются равенствами:

$$\text{а) } A_k = \begin{pmatrix} 1 & t_k & t_k^2 \\ 1 & t_{k-1} & t_{k-1}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_{k-m+1} & t_{k-m+1}^2 \end{pmatrix}; \quad \text{б) } \Delta c_k = c_k - c_{k-1};$$

$$\text{в) } \Delta s_k = s_k - A_k c_{k-1}; \quad \text{г) } s_k = \begin{pmatrix} s_k \\ s_{k-1} \\ \dots \\ s_{k-m+1} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

5. В качестве решения Δc_k системы уравнений (4) используется её псевдорешение Δc_{k+} , вычисляемое в соответствии с равенством

$$\Delta c_{k+} = A_k^+ \Delta s_k. \quad (6)$$

Здесь A_k^+ — $(3 \times m)$ — матрица, псевдообратная к матрице A_k .

6. Используя найденный вектор поправок Δc_k , вычисляется вектор $c_k = c_{k-1} + \Delta c_k$, данное равенство, как вытекает из (5б), (5в) и (5г), эквивалентно развернутому равенству вида

$$c_k = c_{k-1} + A_k^+ (s_k - A_k c_{k-1}) \quad k = 3, 4, 5, \dots \quad (7)$$

7. Полученный вектор c_k подставляется в полином (1) и вычисляются первая $d\hat{s}/dt$ и вторая $d^2\hat{s}/dt^2$ производные согласно равенствам

$$а) d\hat{s}/dt = c_{1k} + 2c_{2k}t_k \quad \text{и б) } d^2\hat{s}/dt^2 = 2c_{2k}, \quad (8)$$

которые и принимаются в качестве оценок значений производных сигнала $s=s(t)$ в момент времени t_k .

Изложенные выше положения с точностью до алгоритма вычисления псевдообратной матрицы A_k^+ отражают сущность предлагаемого нами метода, а также состав и последовательность операций, которые необходимо выполнить для вычисления производных сигнала $s=s(t)$ в момент времени t_k . В соответствии с этой же последовательностью операций вычисляются оценки данных производных для момента времени t_{k+1} . Отличие данного этапа от предыдущего заключается лишь в том, что вместо системы уравнений (4) формируется и решается новая система условных линейных алгебраических уравнений, матрица коэффициентов A_{k+1} и правая часть Δs_{k+1} которой получается из матрицы A_k (вектора Δs_k) путём сдвига её строк (его компонент) на одну позицию вниз и замены её первой строки (его первой компоненты) новой строкой ($1 \ t_{k+1} \ t_{k+1}^2$) (новой компонентой Δs_{k+1}).

В завершение синтеза предлагаемого МЦДС отметим следующие положения и факты, раскрывающие его сущность и являющиеся обоснованием целесообразности использования в данном случае псевдообратных матриц и скользящей аппроксимации дифференцируемого сигнала полиномами вида (1).

1. Алгоритм вычисления псевдообратной к A_k матрицы A_k^+ здесь не приводится, так как, во-первых, в настоящее время известен целый ряд алгоритмов псевдообращения прямоугольных матриц [5] и любой из них можно использовать для вычисления матрицы A_k^+ , а во-вторых, описание любого из них занимает непомерно много места.

2. Как известно [5], одним из замечательных свойств псевдорешения всякой системы линейных алгебраических уравнений является то, что оно доставляет минимум евклидовой метрике (2). Отсюда и из (6) и (7) вытекает, что полином вида (1), коэффициенты c_0, c_1, c_2 которого вычисляются в соответствии с данными равенствами, аппроксимирует сигнал $s(t)$ на скользящем интервале $I_k = [t_k - m\Delta t, t_k]$, $k = m+1, m+2, \dots$ с наименьшей среднеквадратической погрешностью.

3. При каждом сдвиге интервала I_k на шаг Δ вправо, т.е. по мере поступления новых измеренных значений $s(t_{k+1}), s(t_{k+2}), \dots$, в моменты времени t_{k+1}, t_{k+2}, \dots , коэффициенты c_0, c_1, c_2 данного полинома изменяются на минимально возможную величину, т.е. ровно на столько, на сколько это необходимо для получения минимального значения метрики (2), заданной на значениях сигнала $s=s(t)$ и аппроксимирующего его полинома, соответствующих моментам времени $t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+m}$. Такое изменение коэффициентов c_0, c_1, c_2 полинома (1) является необходимым условием для обеспечения наиболее устойчивого функционирования ПИД-регулятора.

4. Как видно из (8), реализация предлагаемого МЦДС позволяет в каждый момент времени t_k получать не только оценку $d\hat{s}/dt$ его первой производной ds/dt , но и оценку $d^2\hat{s}/dt^2$ его второй производной

d^2s/dt^2 , для получения которой необходимо выполнить умножение коэффициента c_{2k} полинома (1) на 2. Для синтеза любого ПИД-регулятора данная оценка, очевидно, совершенно не нужна. Однако не менее очевидно и то, что ее наличие открывает широкие возможности синтеза нового класса автоматических регуляторов, основанных на использовании не только первой, но и второй производных дифференцируемого сигнала. Кроме того, как показано в работе [4], использование второй производной позволяет синтезировать достаточно эффективные методы и алгоритмы выделения интервалов стационарности контролируемого сигнала, что оказывается совершенно необходимым при решении целого ряда прикладных задач.

5. Как показывают результаты наших исследований [4], погрешность оценивания производной предлагаемым МЦДС оказывается в разы меньше, чем методами, основанными на стандартных процедурах дифференцирования. Так, среднеквадратическое отклонение (СКО) вычисленных значений первой производной от ее истинного значения при 5 %-ом уровне ошибок в дифференцируемом сигнале, в 10 раз ниже при использовании предлагаемого МЦДС, а для второй производной данный показатель равен уже 50.

Синтез и некоторые результаты исследований предлагаемого ПИД-регулятора. Как вытекает из представленных выше результатов, синтез предлагаемого ПИД-регулятора оказывается предельно простой задачей и сводится к замене в традиционном ПИД-регуляторе алгоритма вычисления оценки производной дифференцируемого сигнала с применением конечных приращений сигнала и времени изложенным выше МЦДС и организации хранения в памяти вычислительного устройства m измеренных значений дифференцируемого сигнала. Поэтому останавливаться на нем более детально мы не будем, а остановимся более подробно на результатах выполненных нами экспериментальных исследований предлагаемого ПИД-регулятора.

Прежде всего отметим, что все эксперименты выполнены с использованием компьютера типа IBM PC в среде программирования Matlab. При этом их цель заключалась в исследовании характеристик предлагаемого ПИД-регулятора и их сравнении с аналогичными характеристиками традиционного ПИД-регулятора.

В качестве регулируемых величин были использованы две величины, наиболее часто используемые при проведении экспериментальных исследований в подобных случаях [1, 2]:

- 1) единичный скачок $y(t) = l(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ и
- 2) гармоника $y(t) = \sin(t)$.

Исследование помехоустойчивости сравниваемых ПИД-регуляторов проводилось в условиях, когда с ошибками задавались только значения $y(t)$. Ошибки получали с помощью стандартной компьютерной программы, генерирующей случайные числа равномерно распределенные в заданном интервале.

Сравнение предлагаемого ПИД-регулятора осуществлялось с традиционным ПИД-регулятором, реализованным в виде блока Simulink в пакете Matlab. Для объективного сравнения данных регуляторов их коэффициенты вычислялись с помощью одной и той же, стандартной процедуры, входящей в пакет Matlab. Вычисленные указанным способом

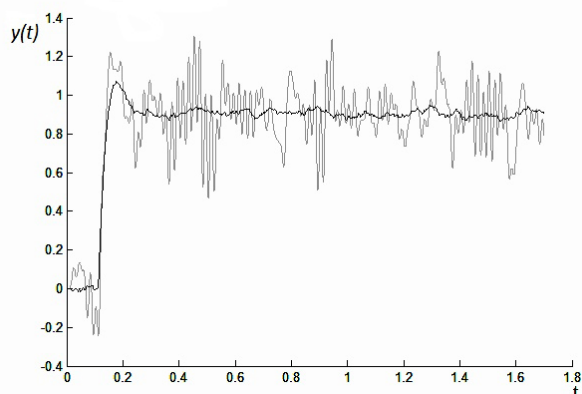


Рис. 1. Выходная величина $y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$, объект 2-го порядка

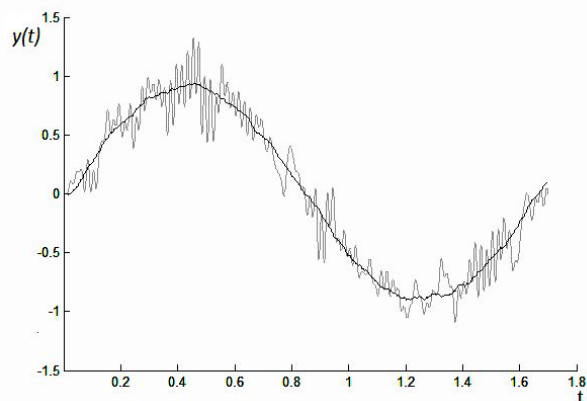


Рис. 2. Выходная величина $y(t) = \sin(t)$, объект 2-го порядка

Таблица 1

Погрешность регулирования $y(t)$ объекта 1-го порядка

Регулируемая величина	СКО значений $y(t)$ при регулировании предложенным ПИД-регулятором	СКО значений $y(t)$ при регулировании ПИД-регулятором Matlab
$y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	0,0395	0,0663
$y(t) = \sin(t)$	0,0393	0,0662

Таблица 2

Погрешность регулирования $y(t)$ объекта 2-го порядка

Регулируемая величина	СКО значений $y(t)$ при регулировании предложенным ПИД-регулятором	СКО значений $y(t)$ при регулировании ПИД-регулятором Matlab
$y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	0,0213	0,136
$y(t) = \sin(t)$	0,0171	0,139

коэффициенты настроек сравниваемых регуляторов во всех случаях оказываются, очевидно, равными и, тем самым, обеспечивается возможность оценивания влияния погрешности дифференцирования регулируемой величины на точность ее регулирования.

Результаты проведенных экспериментальных исследований изображены на рис. 1 и 2 и сведены в табл. 1 и 2. При этом на рис. 1 и 2 изображены графические зависимости выходной величины $y(t)$ объекта управления. Изменения выходной величины объекта управления $y(t)$, регулируемой предложенным регулятором и регулятором, реализованным в Matlab, изображены соответственно черным и серым цветами. Из них видно, что синтезированный регулятор существенно превосходит регулятор Matlab по точности регулирования. Это видно и из табл. 1 и 2, где приведены СКО вычисленных значений выходной величины $y(t)$ от их идеальных значений для объектов управления первого и второго порядка соответственно. Как видно из табл. 1, при прочих равных условиях СКО для объекта управления первого порядка практически в два раза ниже при использовании предлагаемого ПИД-регулятора, чем в случае использования ПИД-регулятора, реализованного в пакете Matlab. Для объекта управления второго порядка СКО вычисленных значений величины $y(t)$ от их идеальных значений в 6–8 раз меньше при ее регулировании предлагаемым регулятором, чем при ее регулировании регулятором из пакета Matlab.

Таким образом, приведенные результаты наглядно показывают, что предлагаемый регулятор является более помехоустойчивым и позволяет, по срав-

нению с регулятором из Matlab, заметно повысить точность регулирования. Необходимо отметить, что все приведенные результаты исследований выполнены в условиях, когда дифференцируемый сигнал содержал ошибки измерения, равные 2,5 %, а закон их распределения был равномерным.

Заключение. Применение МЦДС, основанного на использовании скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц, позволило синтезировать новый ПИД-регулятор, обладающий существенными преимуществами по сравнению со стандартным регулятором, реализованным в пакете Matlab. К таким преимуществам можно отнести прежде всего более высокую помехоустойчивость и точность регулирования, а также достаточно простую программную и аппаратную реализацию. Рекомендуется для применения при создании автоматических и автоматизированных систем управления технологическими процессами и объектами.

Библиографический список

- Юревич, Е. И. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / Е. И. Юревич. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л. : Энергия, 1975. — 714 с.
- Ротач, В. Я. Расчет настройки реальных ПИД-регуляторов / В. Я. Ротач // Теплоэнергетика. — 1993. — № 10. — С. 31–35.
- Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. — Изд. 2-е. — М. : Наука, 1979. — 285 с.
- Майстренко, А. В. Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей квадратичной аппроксимации / А. В. Майстренко,

А. А. Светлаков, Н. В. Старовойтов // Омский научный вестник. — 2006. — № 7 (43). — С. 106–108.

5. Светлаков, А. А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами / А. А. Светлаков. — Томск : Изд-во НТЛ, 2003. — 388 с.

6. Ильин, В. А. Основы математического анализа : учеб. для вузов. В 2 ч. Ч. 1 / В. А. Ильин. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 648 с.

МАЙСТРЕНКО Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры

электронных средств автоматизации и управления. **СВЕТЛАКОВ Анатолий Антонович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры электронных средств автоматизации и управления. **СТАРОВОЙТОВ Николай Владимирович**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры электронных средств автоматизации и управления. Адрес для переписки: maestro67@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.11.2015 г.

© А. В. Майстренко, А. А. Светлаков, Н. В. Старовойтов

УДК 620.179.118.7

**К. С. ГРЕКОВ
Ю. Г. ДОЛГАНЕВ
А. В. КОСЫХ**

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ПРИНЦИПА ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

В статье анализируются уже имеющиеся принципы оценки качества поверхности, а также предложен новый принцип на основе автогенератора с дополнительной емкостью, позволяющий оценивать шероховатость поверхности в соответствии с современным состоянием научных исследований. Проведен анализ вариантов применения предлагаемого принципа, а также исследованы результаты компьютерного моделирования, по которым сделаны выводы о применимости принципа.

Ключевые слова: автогенератор, шероховатость, дополнительная емкость, качество поверхности, емкостный датчик.

Введение. Долговечность работы деталей машин и приборов напрямую связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое формируется в основном на финишных операциях механической обработки. Традиционные методы финишной обработки (шлифование, полирование и притирка) не всегда обеспечивают оптимальное качество поверхности обрабатываемой детали. При использовании абразивного материала его частицы внедряются в обрабатываемую поверхность, происходит шаржирование поверхности. После операции шлифования на поверхности изделия остаются следы от воздействия абразивной части обрабатывающего инструмента, микротрещины и т.д., которые не устраняются последующим полированием [1]. Подобные дефекты поверхности являются концентраторами напряжений и с них начинается разрушение поверхностного слоя деталей при эксплуатации, что снижает надежность деталей машин и приборов.

Состояние обработанной поверхности зависит от нескольких факторов: от свойств обрабатываемого материала; способа обработки (точение, фрезерование и т. д.); режимов обработки (скорость

резания, подача, глубина резания); жёсткости технологической системы; геометрических параметров инструмента; вида и способа подачи смазочно-охлаждающей жидкости и др. [2].

Методы оценки состояния поверхности. Оценка состояния поверхности изделий сопряжена со сложностями, диктуемыми разнообразной формой изделия: плоскость, цилиндр, шар, сложнойлинейная поверхность. Рассмотрим, какие существуют методы для оценки состояния поверхности.

Сравнительный бесконтактный метод. Способ основан на сравнении измеряемой поверхности с образцами шероховатости, регламентированными ГОСТ 9378-93 [3]. Стандарт распространяется на образцы шероховатости поверхности, предназначенные для сравнения визуально и на ощупь с поверхностями изделий, полученными после обработки.

Достоинством этого метода является простота и доступность. К недостаткам можно отнести: большое время для оценки состояния поверхности; качественный, а не количественный характер оценки; отсутствие информации о параметрах и дефектах неровности; необходимость применения дополнительного оборудования для более точной оценки

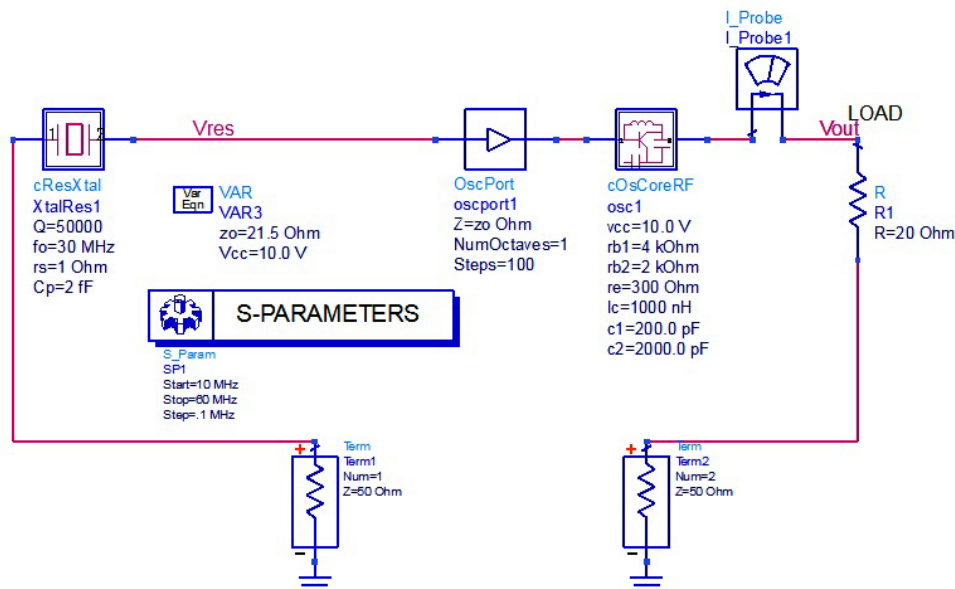


Рис. 1. Испытуемая схема автогенератора с кварцевым резонатором для исследования частоты генерации

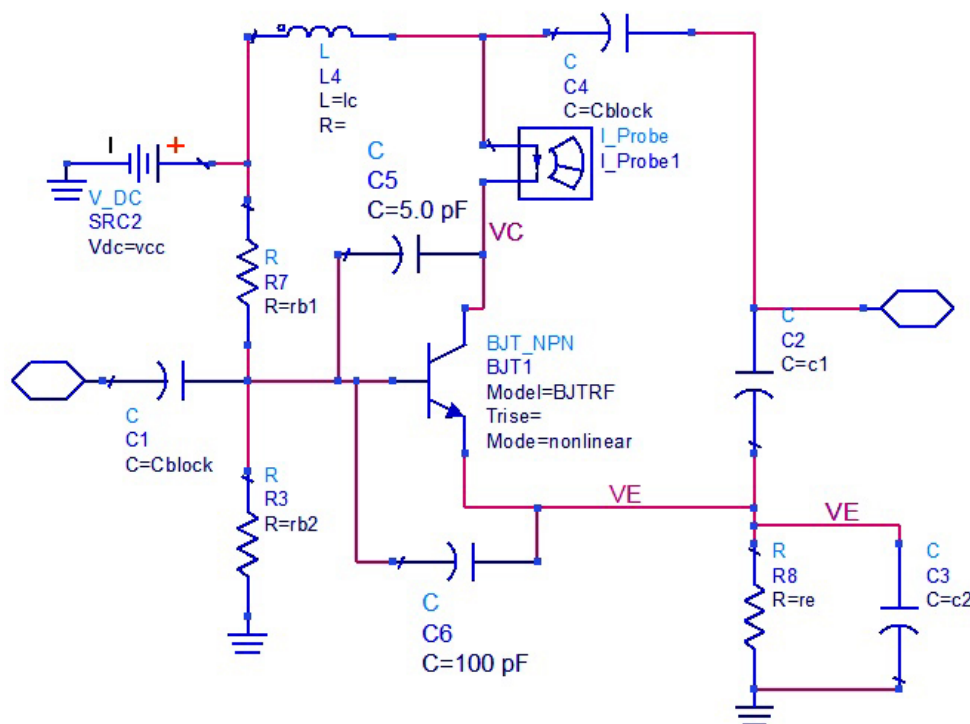


Рис. 2. Схема генератора импульсов

(сравнительные микроскопы); полностью зависит от квалификации проверяющего — низкая точность; затруднительна оцифровка полученных данных; применяется при единичном производстве

Бесконтактный оптический метод. Оптический метод представляет собой измерение параметров шероховатости бесконтактными оптическими приборами [4], действие которых основано на принципе одновременного преобразования профиля поверхности, предназначенные для измерения параметров шероховатости поверхности. Согласно ГОСТ9847-79 применяются следующие типы оптических приборов: ПТС, ПСС, МИИ, МПИ [5]. Контролируемая

поверхность является идеально ровной, если в окуляре применяемого прибора щель будет иметь вид светящейся прямой линии. Если на поверхности имеется канавка, то в плоскости окуляра наблюдается искривленная светящаяся линия [6].

Хотя современные микроскопы и используемые оптические приборы имеют довольно высокое качество отображения профиля поверхности, данный способ содержит в себе ряд существенных недостатков: узкая специализация данного метода (сложности оценки связанные с формой изделия или детали); оптическая постоянная должна быть неизменной на всем протяжении исследуемого

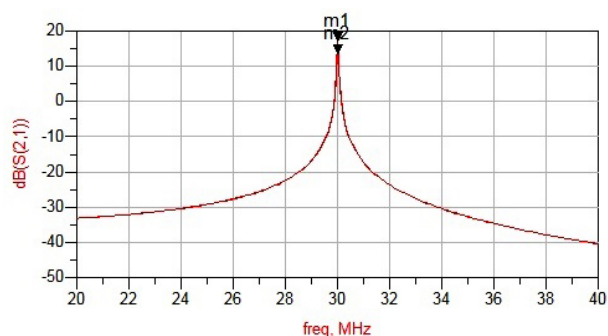


Рис. 3. Коэффициент передачи S_{21} при последовательном соединении емкости ($m1$ — $C=1\text{мкФ}$; $m2$ — $C=100\text{ пФ}$)

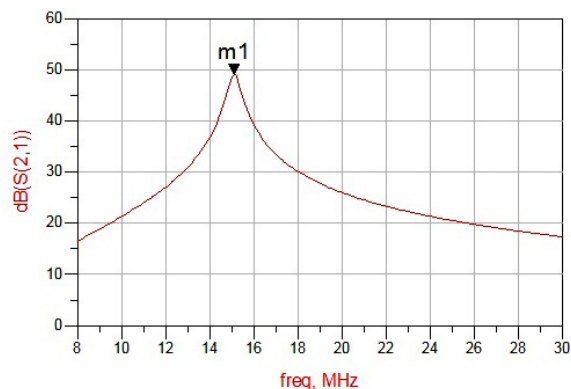


Рис. 6. Коэффициент передачи S_{21} при параллельном соединении емкости ($m1$ — $C=1\text{мкФ}$)

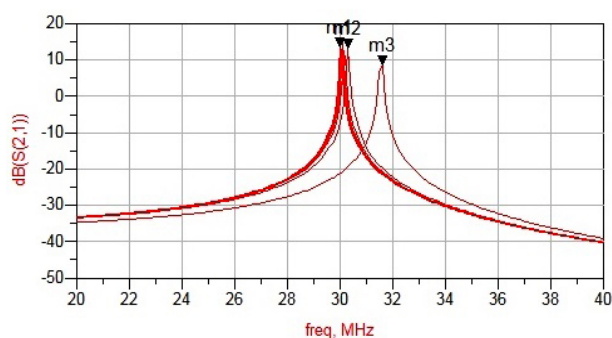


Рис. 4. Коэффициент передачи S_{21} при последовательном соединении емкости ($m1$ — $C=100\text{ пФ}$; $m2$ — $C=5\text{ пФ}$; $m3$ — $C=1\text{ пФ}$)

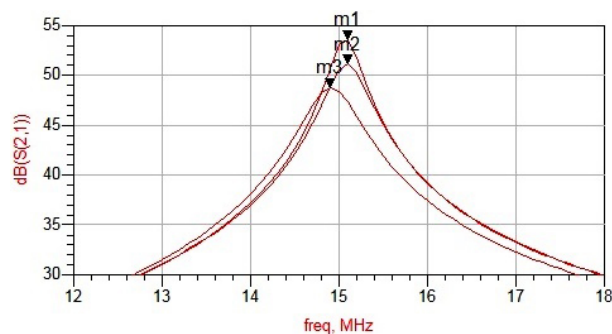


Рис. 7. Коэффициент передачи S_{21} при параллельном соединении емкости ($m1$ — $C=10\text{ нФ}$; $m2$ — $C=5\text{ нФ}$; $m3$ — $C=1\text{ нФ}$)

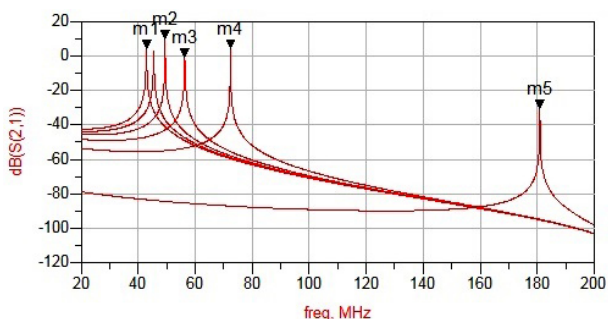


Рис. 5. Коэффициент передачи S_{21} при последовательном соединении емкости ($m1$ — $C=100\text{ фФ}$; $m2$ — $C=60\text{ фФ}$; $m3$ — $C=40\text{ фФ}$; $m4$ — $C=20\text{ фФ}$; $m5$ — $C=1\text{ фФ}$)

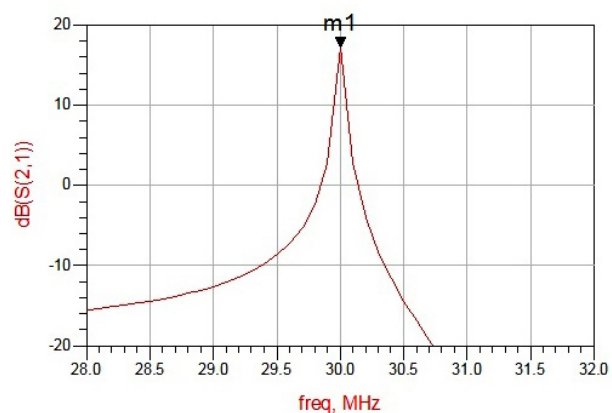


Рис. 8. Коэффициент передачи S_{21} при параллельном соединении емкости ($m1$ — $C=1\text{пФ}$)

участка поверхности; вертикальный диапазон измерений очень низкий и ограничен длиной волны испускаемого света; высокая стоимость оборудования для проведения анализа и сопоставления; необходимо учитывать коэффициент отражения поверхности;

Контактный (щуповой) метод. Большое распространение для определения параметров шероховатости поверхности контактным методом получили щуповые приборы, работающие по методу ощупывания поверхности иглой [7]. Опускаясь во впадины, а затем поднимаясь на выступы, игла колеблется относительно головки соответственно огибаемому профилю. Механические колебания иглы преобразуются, как правило, в электрические.

Снятый с преобразователя полезный сигнал усиливают, а затем измеряют его параметры. В щуповых приборах для измерения поверхности применяются индукционные, индуктивные, электронные и пьезоэлектрические преобразователи механических колебаний иглы в электрические сигналы.

Описанный выше метод является самым точным из всех исследованных, но также имеет некоторые недостатки: влияние на измерение особенностей щупа, связанных с его размером, формой, проскальзыванием, нагрузкой на поверхность, износом. Помимо этого, щуповой метод имеет низкую скорость измерения.

Емкостный автогенераторный принцип оценки параметров шероховатости поверхности. Наи-

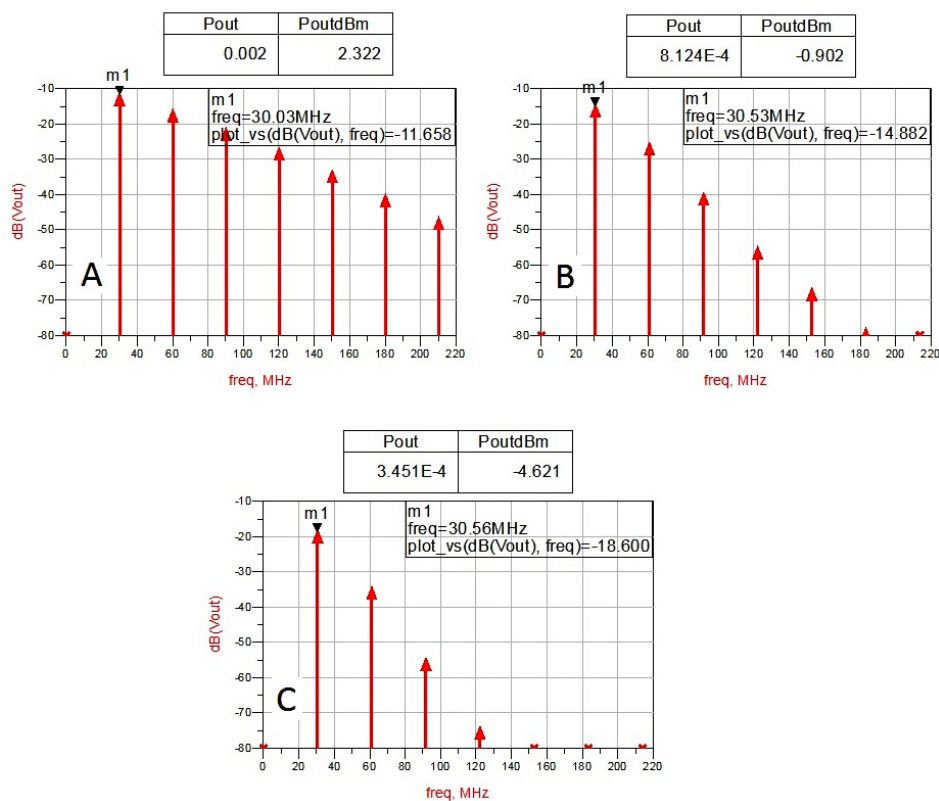


Рис. 9. Спектр на выходе схемы с подключенной параллельно кварцевому резонатору емкостью А) $C=100\text{пФ}$; В) $C=1\text{пФ}$; С) $C=0,8\text{пФ}$

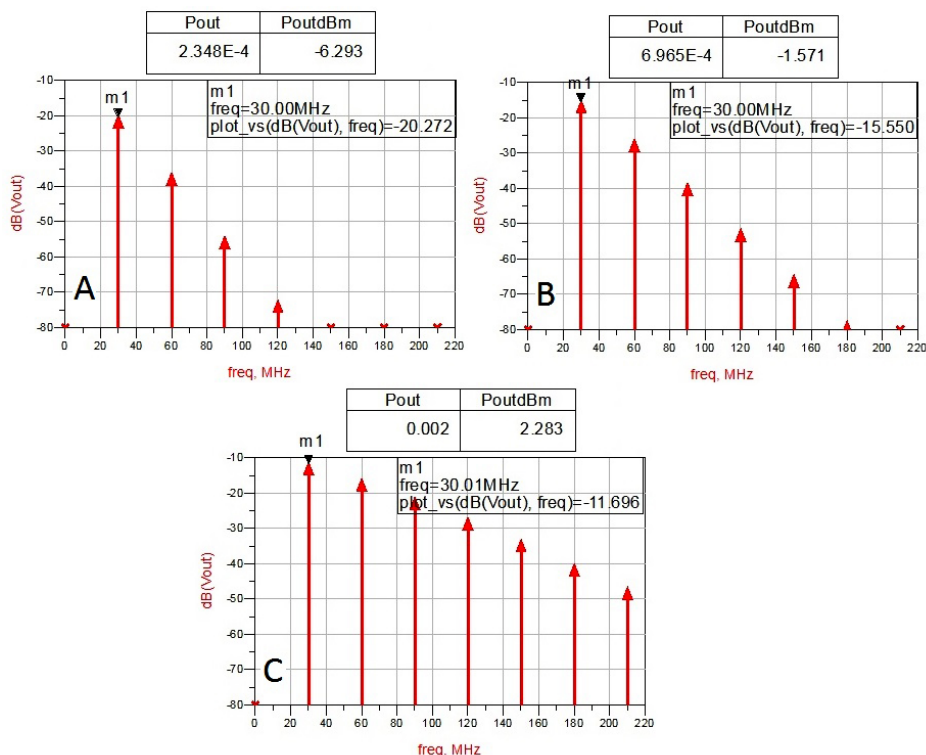


Рис. 10. Спектр на выходе схемы с подключенной последовательно кварцевому резонатору емкостью А) $C=425\text{пФ}$; В) $C=300\text{пФ}$; С) $C=10\text{пФ}$

более перспективным, на наш взгляд, может быть принцип, основанный на использовании кварцевого автогенератора с включенной измерительной емкостью в эквивалентную схему кварцевого резонатора [8]. При этом необходимо определиться в способе

увеличения информации о состоянии поверхности. Это может быть ЭЛТ (электронно-лучевая трубка), как указано в патенте. Устройство для измерения шероховатости электропроводных изделий содержащее емкостный преобразователь [9], образуемый

Исследование влияния последовательно подключенной емкости в цепь автогенератора на частоту генерации

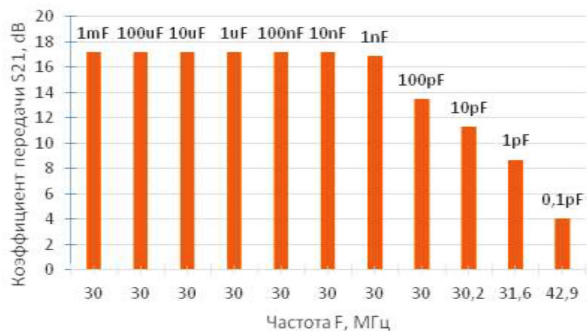


Рис. 11

Исследование влияния параллельно подключенной емкости в цепь автогенератора на частоту генерации

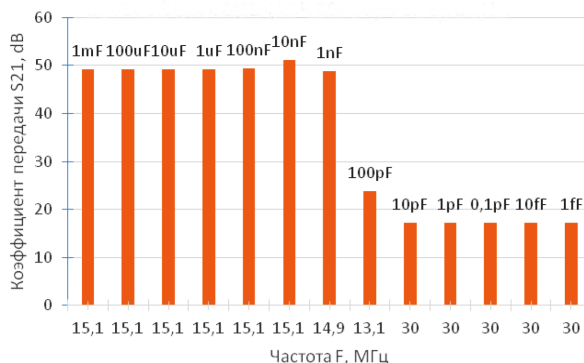


Рис. 12

Исследование влияния последовательно подключенной емкости в цепь автогенератора на его спектр и мощность основной частоты генерации

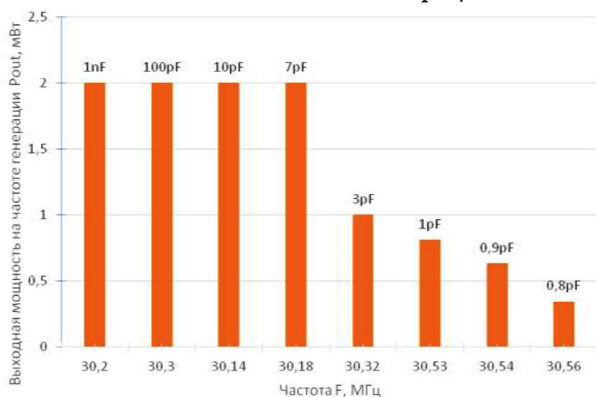


Рис. 13

Исследование влияния параллельно подключенной емкости в цепь автогенератора на его спектр и мощность основной частоты генерации

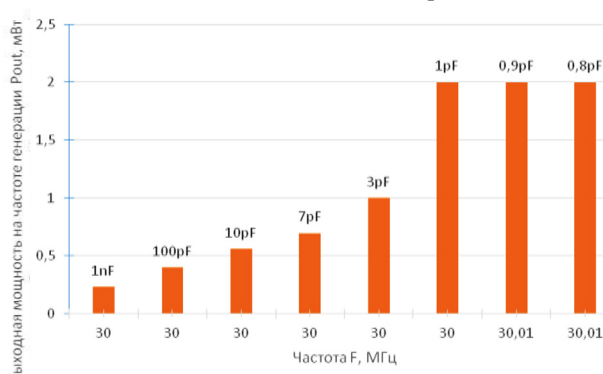


Рис. 14

изделием и электродом, и блок преобразования емкости в электрический сигнал, подключаемый к выходу преобразователя, отличающееся тем, что, с целью повышения точности измерения, электрод выполнен в виде электронно-лучевой трубки с диэлектрическим экраном, а к блоку преобразования емкости подключен ее катод.

Более продуктивной модификацией описанного выше метода является применение емкостного датчика — конкурента ЭЛТ, который может быть применен для исследования состояния поверхности изделий с любой формой и кривизной. Этот метод работает по принципу традиционного ощупывания поверхности [10]. Щуп с площадью, исключаяющей «залипание» во впадинах микронеровностей и содержащий обкладку конденсатора конечной площади, позволяющей модулировать спектр автогенератора в соответствии с формой профиля. Для того чтобы исследовать влияние емкостного датчика на схему автогенератора с кварцевым резонатором, воспользуемся системой автоматического моделирования ADVANCED DESIGN SYSTEM 2011.10 от компании Agilent Technologies. Изменяя значение емкости, проследим ее влияние на энергетический спектр собранной схемы и изменение частоты генерации (коэффициента передачи схемы S_{21}) (рис. 1). Генератор импульсов собран на основе биполярного p-p-n транзистора и имеет вид, показанный на

рис. 2. В схеме применяется кварцевый резонатор, он работает на частоте 30 МГц и имеет добротность 50000. Далее будут представлены результаты моделирования с двумя вариантами подключения емкости в цепь автогенератора. Результаты представлены на рис. 3–8.

Для следующего исследования необходимо воспользоваться методом гармонического баланса (НВ Simulation) [11]. Полученные данные представлены на рис. 9–10. Все результаты измерений представлены на рис. 11–14.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Отражена классификация имеющихся на сегодняшний день методов контроля качества поверхности и выявлены недостатки этих методов (узкая специализация, скорость сканирования, недостатки в критериях оценки).
2. Предложен метод контроля качества поверхности, учитывающий недостатки имеющихся методов, а также исследованы критерии, по которым возможно детектирование изменений профиля исследуемой поверхности за счет включенной в цепь автогенератора с кварцевым резонатором дополнительной емкости. В качестве таковой предполагается использование емкостного датчика.
3. Из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что изменения значения емкости

оказывают влияние на энергетический спектр автогенераторной системы сканирования поверхности (рис. 9–10). Эту информацию возможно применять для достаточно точной оценки любых геометрических и физико-механических неровностей поверхности деталей.

4. Перспективы использования автогенераторного метода оценки качества поверхности связаны с проведением сравнительных исследований с другими подобными системами.

Библиографический список

1. Проблемы надежности и ресурса в машиностроении / Под ред. К. В. Фролова. — М.: Наука, 1986. — 248 с.
2. Контроль, прогнозирование и повышение надежности работы газовых промыслов и подземных газохранилищ / В. И. Бирюков, В. Н. Виноградов [и др.]. — М.: ВНИИГазпром, 1984. — 46 с. — (Обзор. информ. Сер. Транспорт и хранение газа, вып. 4).
3. ГОСТ 9378-93. Образцы шероховатости поверхности (сравнение). — Взамен ГОСТ 9378-75; введ. 1997-01-01. — М.: Изд-во стандартов ИПК, 1996. — 12 с.
4. Кобенко, В. Ю. Определение качества поверхности бумаги методом фрактального анализа / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов, А. В. Голунов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 330–335.
5. ГОСТ 9847-79. Приборы оптические для измерения параметров шероховатости поверхности. Типы и основные параметры. — Введ. 1981-01-01. — М.: Изд-во стандартов ИПК, 1979. — 8 с.
6. Назаров, Ю. Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю. Ф. Назаров,

А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, И. В. Компанец // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — №3-4. — С. 207–216.

7. J. F. Song and T. V. Vorburger, Stylus profiling at high resolution and low force, Applied Optics, Vol. 30, Issue 1, pp. 42–50 (1991).

8. Мальков, О. В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали / О. В. Мальков, А. В. Литвиненко. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2012. — С. 42–58.

9. Пат. 1566629 Российская Федерация, МПК G01B 7/00. Устройство для измерения шероховатости электропроводных изделий / Греков К. С., Долганев Ю. Г.; заявитель и патентообладатель Греков К. С., Долганев Ю. Г. — № 2015118952/28; заявл. 20.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. — 1 с.

10. А. с. 781557 СССР, МКИ G01B7/34. Устройство для измерения шероховатости электропроводных изделий / Ю. Г. Долганев, В. Н. Кулагин. — № 2707828/25-28; заявл. 05.01.79; опубл. 23.11.80.

11. Глава 1. Основные виды анализа и методика их применения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://cmpro.vlsu.ru/reason/wp8/ADS_RUS/Chapter1_Section5_Theory.htm (дата обращения: 06.04.2014).

ГРЕКОВ Константин Сергеевич, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» (РТУ и СД).

Адрес для переписки: stanleyipkiss87@gmail.com

ДОЛГАНЕВ Юрий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры РТУ и СД.

Адрес для переписки: dolganey47@mail.ru

КОСЫХ Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой РТУ и СД, ректор.

Статья поступила в редакцию 08.12.2015 г.

© К. С. Греков, Ю. Г. Долганев, А. В. Косых

УДК 621.372.412

А. О. ЛОЖНИКОВ

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ТД СРЕЗА С УЛУЧШЕННОЙ МОНОЧАСТОТНОСТЬЮ

Показано, что модифицированная конструкция пьезоэлемента кварцевого резонатора ТД среза позволяет ослабить не только температурную моду, но и ангармонические колебания основной и температурной мод, что позволяет создавать схемы автогенератора повышенной надежности без опасности возбуждения неосновного колебания. Исследования проведены в широком интервале рабочих температур и диапазоне частот.

Ключевые слова: ТД срез, мода В, мода С, кварцевый резонатор, двухповоротный срез, моночастотность.

Кварцевые генераторы широко используются в качестве вторичных эталонов частоты в различных радиотехнических устройствах и системах. В случаях, когда требуется стабильность частоты генератора лучше, чем $1 \cdot 10^{-8}$, используют кварцевые резонаторы двухповоротных срезов, в частности,

резонаторы ТД среза. Эти резонаторы имеют ряд преимуществ перед резонаторами одноповоротных срезов (АТ, ВТ), например, малую чувствительность к вибрациям и скачкам температуры. Однако у этих резонаторов при стандартной конструкции пьезоэлемента, когда два одинаковых электрода

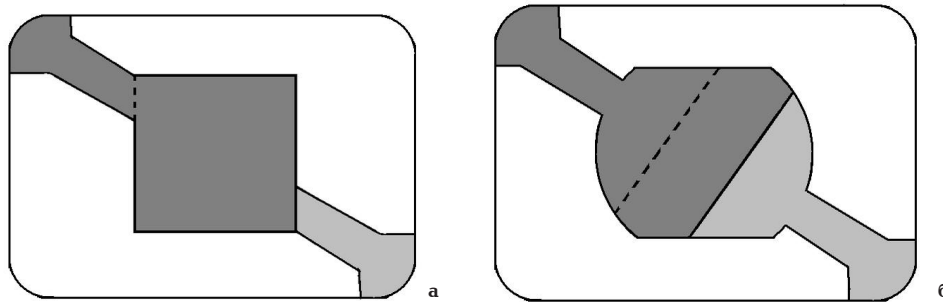


Рис. 1. Конструкции № 1 (а) и № 2 (б)

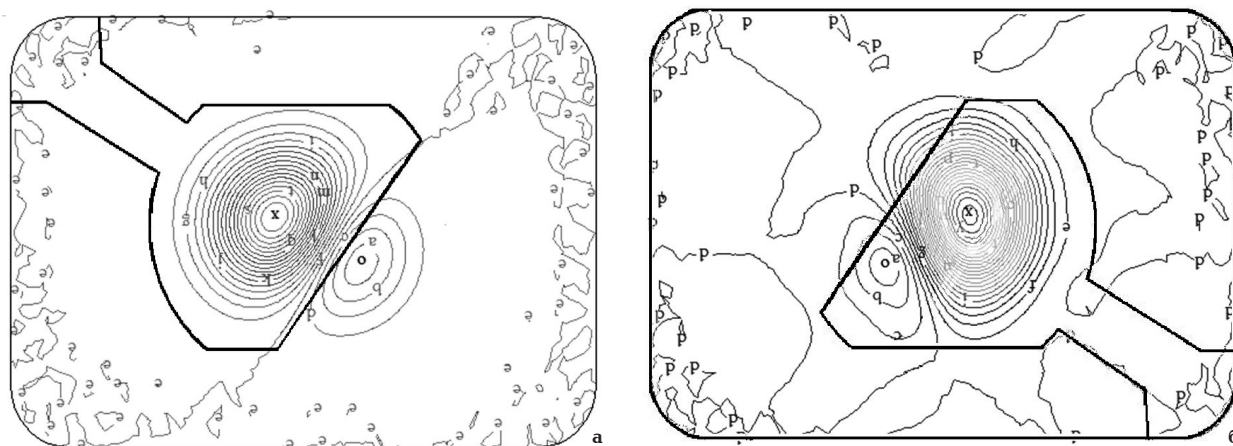


Рис. 2. Конструкция № 2: поверхностная плотность поляризационного тока мод С (а) и В (б)

расположены один над другим, есть недостаток — активное сопротивление температурной В-моды меньше сопротивления основной С-моды колебаний. Это приводит к тому, что при обычном включении данного резонатора в цепь автогенератора последний, как правило, возбуждается на частоте моды В. Для устранения данной проблемы схемы возбуждения генераторов необходимо усложнять, например, вводить частотно-избирательные цепи, обеспечивающие повышение коэффициента регенерации схемы на частоте основной моды и снижение ее на частоте температурной моды. Поскольку в резонаторах SC-среза частота В-моды выше частоты моды С примерно на 10 %, избирательность этих цепей должна быть довольно высока (эквивалентная добротность должна быть не менее 10). В силу малой температурной стабильности этих цепей появляются дополнительные компоненты общей нестабильности частоты, а также возрастает уровень шумов.

В этой связи актуальной является задача улучшения моночастотности кварцевых резонаторов, то есть ослабление побочных колебаний непосредственно в самом резонаторе, путем изменения конструкции электродов. В резонаторах SC-среза появляется возможность ослабления наиболее активной температурной моды вследствие того, что у них велики значения пьезоэлектрических коэффициентов e_{21} , e_{23} и e_{25} . Это приводит к тому, что при сильной локализации колебаний появляются дополнительные компоненты поляризации, в результате чего максимумы распределения плотности поверхностного тока получают сдвинутыми относительно центра, причем для мод В и С эти сдвиги происходят в разных направлениях. Несмотря

на то что упоминания об этом эффекте присутствует в патенте [1] и работах [2, 3], до сих пор в серийных генераторах применяются схемные решения для возбуждения генератора на основной моде.

Целью данной работы является исследование и сопоставление активности рабочих и побочных мод колебаний двух пьезоэлементов, отличающихся конструкцией электродов: в пьезоэлементе стандартной конструкции (конструкция № 1, рис. 1а) и в пьезоэлементе со смещенными электродами (конструкция № 2, рис. 1б). На рис. 2 приведены результаты расчета [2] поверхностной плотности поляризационного тока резонатора для мод С и В для графического пояснения причин увеличения сопротивления В-моды для второй конструкции электродов.

Для исследований были использованы одинаковые кристаллические элементы с различными электродными конструкциями. Кристаллический элемент представлял собой прямоугольную плоско-выпуклую линзу ТД-среза с радиусом кривизны 300 мм с частотой 10 МГц, изготовленную из искусственного кварца и работающую на 3-й механической гармонике. Длинная сторона пьезоэлемента направлена вдоль оси X' , короткая — вдоль оси Z' . Пластина имеет размеры 10x7 мм. Серебряные электроды толщиной 1000 ангстрем напылялись на поверхность термическим методом через различные маски. Пьезоэлементы крепились токопроводящим клеем по четырем углам к никелевым держателям. Затем вся конструкция вакуумировалась.

Все результаты измерений амплитудно-частотных характеристик, сопротивлений и частот в интервале температур получены с помощью установок измерения резонаторов Saunders 250В. При этом

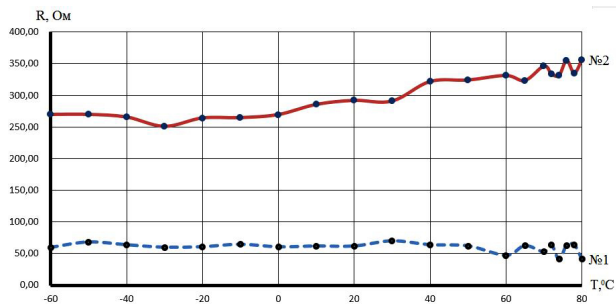


Рис. 3. Зависимость сопротивлений моды В от температуры для двух исследуемых конструкций

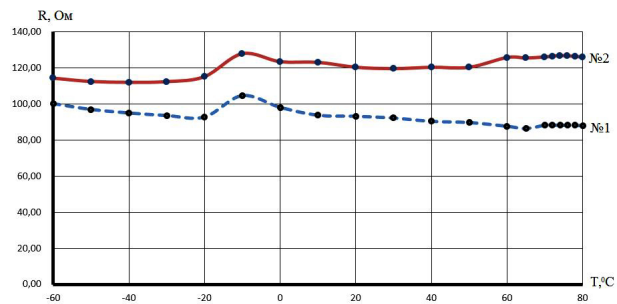


Рис. 4. Зависимость сопротивлений моды С от температуры для двух исследуемых конструкций

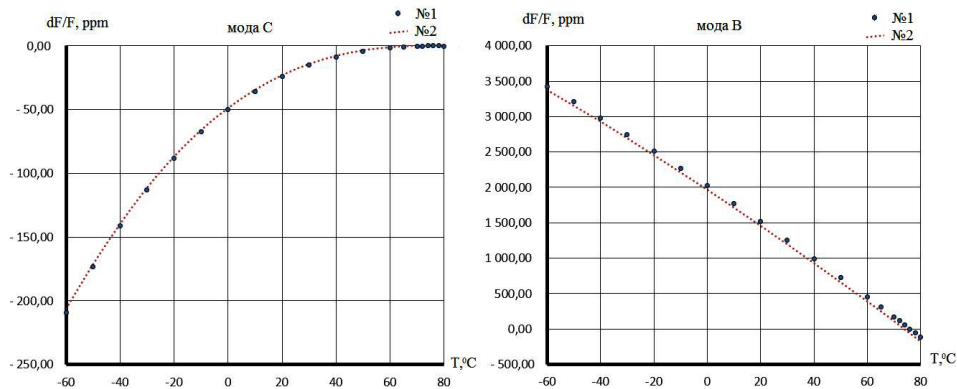


Рис. 5. Температурно-частотные характеристики мод С и В двух исследуемых конструкций

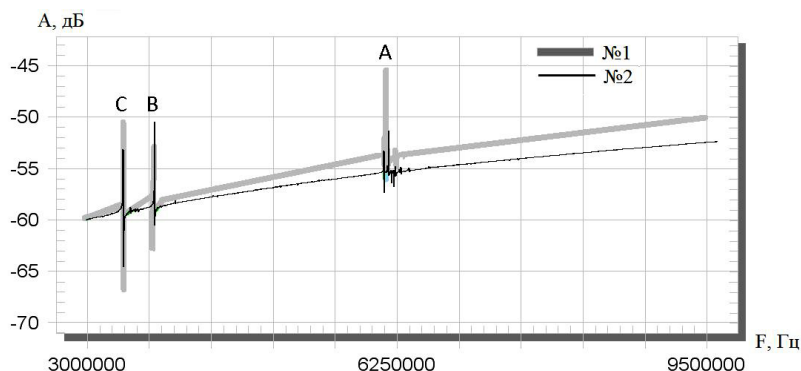


Рис. 6. Спектр колебаний (моды А, В, С первая гармоника) резонаторов двух исследуемых конструкций

контактное устройство с резонатором помещалось в камеру тепла и холода Espes.

В первом эксперименте были измерены сопротивления и частоты мод В и С двух конструкций в интервале температур от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ (рис. 3–5).

На графике (рис. 3) видно, что сопротивление температурной В-моды в области рабочей температуры ($72-80^{\circ}\text{C}$ — область экстремума ТЧХ) резонатора стандартной конструкции № 1 существенно (не менее чем в 6 раз) меньше, чем у модифицированной конструкции № 2. Одновременно с этим сопротивление рабочей моды С (рис. 4) резонатора стандартной конструкции № 1 на 40 % меньше, чем у модифицированной конструкции № 2. Ранее

в работе [2] были приведены результаты экспериментов, в которых сопротивление рабочей моды в конструкциях № 1 и № 2 были одинаковыми. Однако в той работе использовался нестандартный держатель резонатора, осуществляющий только электрический контакт в 2-х углах и пьезоэлемент не был приклеен. В данном эксперименте была использована конструкция серийного резонатора. Резонаторы крепились токопроводящим клеем по углам в четырех точках, что, вероятно, и привело к увеличению сопротивлений мод В и С. При этом отношение сопротивлений мод В и С для двух конструкций оказалось схожим с представленным ранее в работе [3], что подтверждает правильность приведенной там методики расчетов.

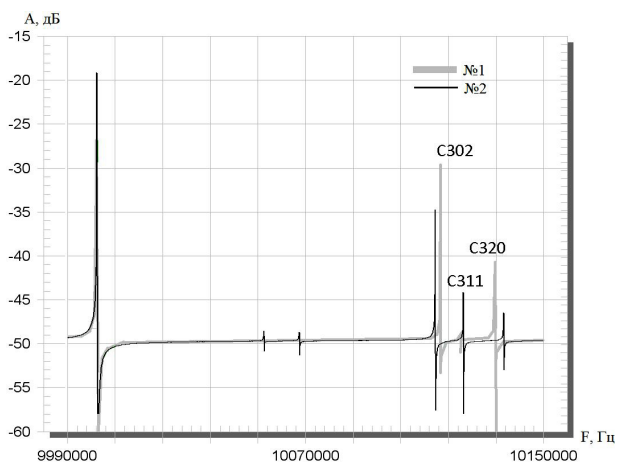


Рис. 7. Спектр колебаний в области рабочей моды С резонаторов двух конструкций

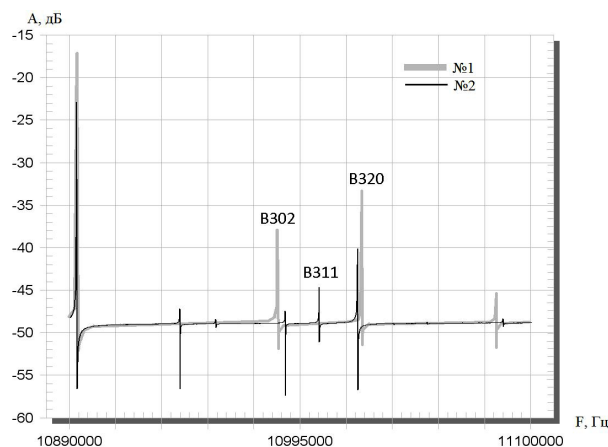


Рис. 8. Спектр колебаний в области побочной моды В резонаторов двух конструкций

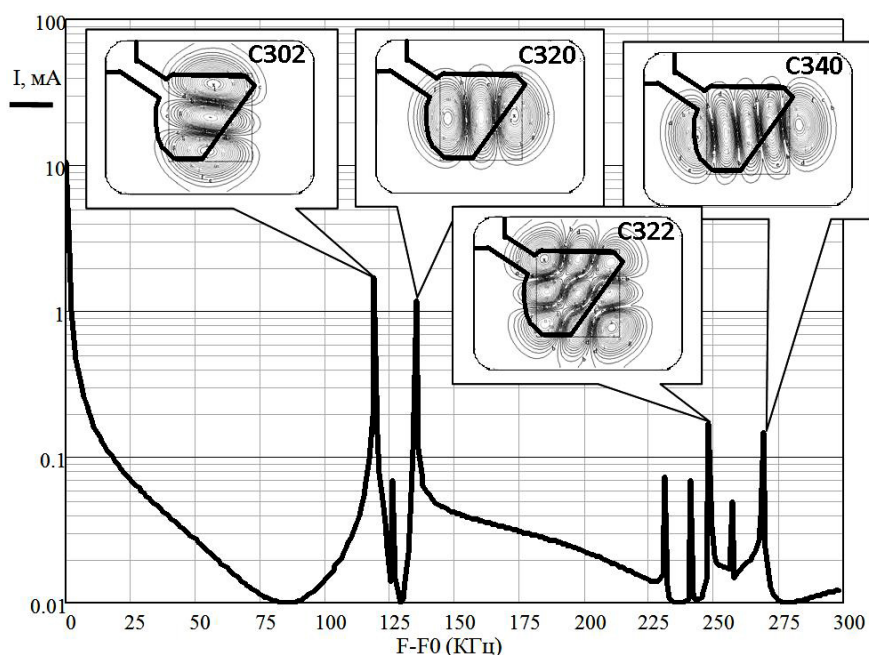


Рис. 9. Рассчитанный спектр ангармонических колебаний [4] в области рабочей моды С

На рис. 5 приведены температурно-частотные характеристики мод В и С резонаторов двух конструкций. Для наглядности и удобства сравнения результаты измерений переведены в относительные единицы — миллионные доли (ppm) относительно соответствующих частот при температуре экстремума основной моды. Из рис. 5 видно, что температурно-частотные характеристики конструкций № 1, № 2 практически совпадают.

Далее был исследован спектр колебаний двух конструкций резонаторов в диапазоне частот от 3 до 11,1 МГц при температуре экстремума ТЧХ (+75 °С). В этом диапазоне частот наблюдаются колебания мод А, В и С первой гармоники и ангармонические колебания мод С и В третьей гармоники. В остальном частотном диапазоне (от 1 до 250 МГц) заметные колебания обнаружены не были. Результаты измерений представлены на рис. 6–8.

На рис. 6 видно, что в диапазоне частот ниже 10 МГц резонаторы имеют практически одинаковые частоты всех трех мод для первой гармоники, причем сопротивления мод В и С отличаются незна-

чительно. Для моды А заметно различие сопротивлений, причем в модифицированной конструкции эта мода менее активна. Что касается ангармонических колебаний мод С (рис. 7) и В (рис. 8), здесь заметны отличия в частотах мод и их сопротивлениях. Для более точной оценки ангармонических колебаний были проведены эксперименты по измерению частот и сопротивлений мод колебаний двух конструкций. Результаты измерений сопротивления и частоты пяти наиболее активных мод колебаний двух конструкций приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что ангармонические моды колебаний резонатора конструкции № 2 имеют сопротивления, превышающие более чем в 2 раза соответствующие сопротивления мод стандартной конструкции № 1. Например, наиболее активная в стандартной конструкции № 1 ангармоника С-моды (мода C_{302}) в конструкции № 2 имеет существенно меньший уровень (относительное сопротивление увеличилось более чем в 7 раз). Улучшение моночастотности можно объяснить, если наложить электроды конструкции № 2 на результаты расчетов

Результаты измерений сопротивлений пяти наиболее активных колебаний

Конструкция	Колебание	Параметр		Отношение R_x/R_{C300}
		Частота, МГц	Сопротивление, Ом	
№1	C_{300} , основное	9,999956	88	1
№1	C_{320}	10,133911	243	2,8
№1	V_{300}	10,893310	63	0,7
№1	V_{302}	10,984757	174	2,0
№1	V_{320}	11,023300	336	3,8
№2	C_{300} , основное	9,999854	127	1
№2	C_{302}	10,113581	690	5,4
№2	C_{320}	10,123106	2600	20,5
№2	V_{300}	10,892280	355	2,8
№2	V_{302}	11,020790	750	5,9

поверхностной плотности поляризованного тока из работы [4] (рис. 9). На рис. 9 видно, что модифицированная конструкция № 2 еще больше ухудшает условия возбуждения ангармонических колебаний по сравнению со стандартной конструкцией из-за меньшей площади электрода и смещения его центра относительно центра пьезоэлемента, что и подтверждается результатами измерений.

В результате экспериментальных исследований показано, что резонаторы модифицированной конструкции № 2 обладают лучшей моночастотностью по сравнению со стандартной конструкцией, все ангармонические колебания и побочная мода имеют сопротивления, более чем в 2,8 раза превышающие сопротивления рабочей моды. Таким образом, резонаторы данной конструкции могут быть применены в схемах кварцевых генераторов без введения дополнительных частотнозависимых элементов для фильтрации побочных колебаний, что позволяет более просто настроить схему возбуждения для достижения необходимых параметров. Подавление побочных колебаний непосредственно в конструкции резонатора резко увеличивает надежность схемы и исключает возможность возбуждения генератора на частоте, отличной от основной. Несмотря на увеличение сопротивления рабочей моды C в конструкции № 2 на 40 %, применение резонаторов данной конструкции возможно во всех случаях, за исключением тех, когда необходим уровень фазовых шумов генератора лучше, чем минус 100 дБн/Гц при отстройке 1 Гц.

В дальнейшем необходимо решить вопрос уменьшения сопротивления рабочей моды C конструкции № 2 до значений, близких к значениям стандартной конструкции, что позволит полностью отказаться от стандартной конструкции и достичь

лучшей совокупности параметров генератора, а также проверить данную конструкцию в составе генератора, чтобы количественно оценить улучшения температурной неустойчивости и других параметров генератора.

Библиографический список

1. Пат. 2276455 Российская Федерация, МПК H03H9/54. Кварцевый резонатор / Безматерных Г. В., Дикиджи А. Н., Теренько В. С. ; заявитель и патентообладатель федеральное государственное унитарное предприятие «Омский научно-исследовательский институт приборостроения». — № 2004128125/09 ; заявл. 21.09.2004 ; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 13. — 4 с.
2. Ложников, А. О. Исследование возможности подавления моды В в пьезоэлементах кварцевых резонаторов ТД среза / А. О. Ложников, А. Н. Лепетаев // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 2 (140). — С. 195–198.
3. Lepetaev A. N., Kosykh A. V., Investigation of optimal electrode structure of SC-cut resonators, Proceedings, 2013 IEEE International Frequency Control Symp. Prague, Czech Rep. July, 2013, pp. 146–149.
4. Ложников, А. О. Расчет спектра колебаний кварцевого резонатора двухповоротного среза / А. О. Ложников, А. Н. Лепетаев // Успехи современной радиоэлектроники : науч.-техн. журн. — 2013. — № 10. — С. 17–22.

ЛОЖНИКОВ Алексей Олегович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

Адрес для переписки: lognikov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.12.2015 г.

© А. О. Ложников

ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР СВЧ ДИАПАЗОНА НА МОНОЛИТНЫХ КВАДРАТУРНЫХ СМЕСИТЕЛЯХ

В данной статье представлен способ конструирования частотных дискриминаторов на квадратурных монолитных смесителях. Приведены выходные характеристики полученного устройства и представлены их преимущества перед классическими частотными дискриминаторами.

Ключевые слова: частотный дискриминатор, мгновенный измеритель частоты, квадратурный смеситель, квадратурный демодулятор, системы радиоэлектронной борьбы.

В последнее время все большее значение приобретают системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и радиоэлектронной разведки (РЭР). Такие системы имеют особое значение для военной техники, так как позволяют повысить безопасность личного состава и продлить время жизни изделия в боевых условиях. Одним из направлений РЭБ является определение частоты радиосигнала. Такая необходимость часто возникает в системах, построенных на принципах пассивной радиолокации (ПР). Станция ПР принимает из эфира радиоимпульсы и по ним определяет характеристики объекта, который их излучает, например, местоположение объекта, расстояние до него, а также частоту сигнала, с которой он работает. Определение частоты особенно важно выполнить в кратчайший промежуток времени, и эта задача возложена на специальные системы мгновенного определения частоты (МИЧ). Более подробно с функционированием МИЧ можно ознакомиться в статье [1]. В данной статье будет представлен перспективный способ проектирования частотного дискриминатора (ЧД) сверхвысоко-частотного (СВЧ) диапазона, входящего в системы МИЧ, с использованием компонентов современной элементной базы.

Частотный дискриминатор СВЧ диапазона — это устройство, на вход которого поступает радиосигнал и преобразуется в напряжение постоянного тока. Уровень напряжения зависит от частоты радиосигнала, и на этой зависимости основан принцип определения частоты. Классическая блок-схема ЧД приведена на рис. 1. Он состоит из одного входа радиочастотного сигнала (вход РЧС), двух синфазных делителей мощности (СДМ1, СДМ2), трёх квадратурных делителей мощности (КДМ1, КДМ2, КДМ3), линии задержки и четырёх детекторов (Д), с которых снимается детектированный сигнал (a,b,c,d). К преимуществам ЧД такого типа можно отнести высокую устойчивость к внешним помехам. Это достигается за счёт того, что, при наведении помехи, она появляется на всех четырёх выходах дискриминатора. При сложении сигналов a—c, b—d она

взаимно вычитается и общий уровень напряжения остается неизменным. Вычитание выполняется с помощью операционных усилителей, расположенных по выходу дискриминаторов. Графики сигналов с выходов a, b, c, d приведены до и после вычитания на рис. 2 и 3 соответственно.

К недостаткам можно отнести относительно большие массогабаритные параметры (МГП), технологическую сложность исполнения и низкую надёжность изделия. Большие МГП связаны с большим количеством компонентов, выполненных в полосковом исполнении, а также с классической схемой детекторов, построенных на диодах и RC цепочках. Высокая технологическая сложность обусловлена малыми габаритами и высокой точностью геометрических размеров квадратурных делителей мощности. Невысокая надёжность связана с низким качеством элементной базы. Так, детекторные

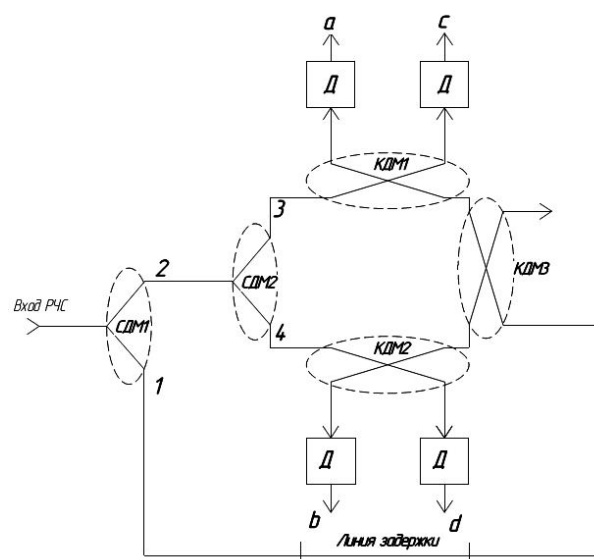


Рис. 1. Блок-схема частотного дискриминатора СВЧ диапазона

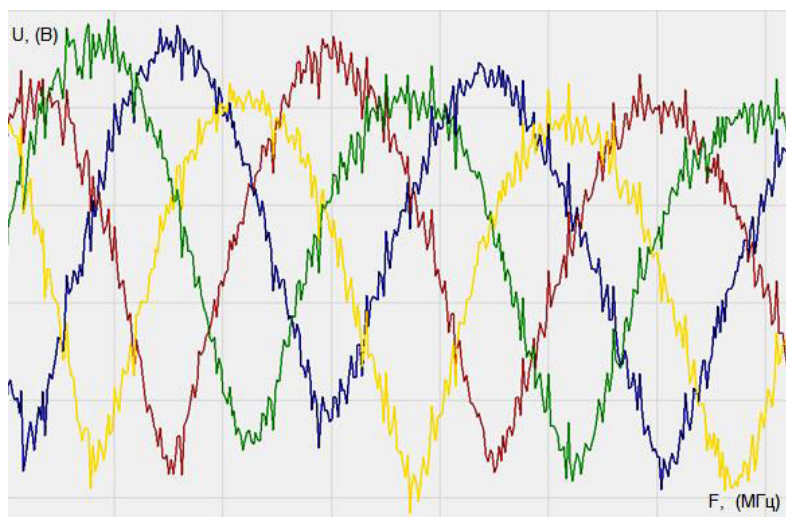


Рис. 2. Графики зависимостей напряжения от частоты с выходов дискриминатора

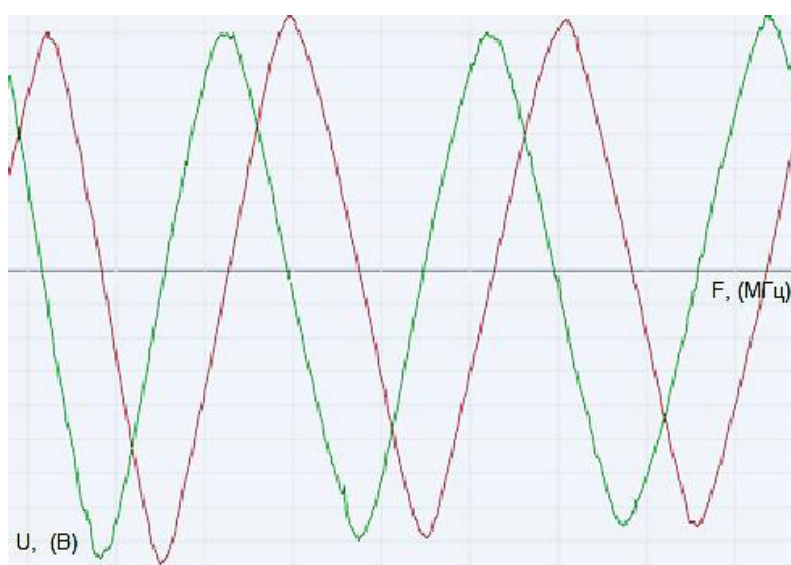


Рис. 3. Графики зависимостей напряжения от частоты после вычитания

диоды, которые используются в дискриминаторах, очень требовательны к условиям монтажа, сильно подвержены воздействию статического напряжения, а также имеют низкий запас прочности. Все вышеперечисленные факторы делают ЧД трудно воспроизводимыми, имеющими высокую себестоимость.

Устранить вышеперечисленные недостатки можно, применив новые компоненты элементной базы. Такая возможность появилась в связи с активным развитием технологий по созданию сложных корпусированных микросхем на материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Для проектирования ЧД особый интерес представляют квадратурные демодуляторы (КД) и квадратурные смесители (КС), которые имеют возможность преобразовывать сигнал в нулевую промежуточную частоту (ПЧ). Квадратурные демодуляторы и смесители имеют два входа для сигнала и гетеродина, а также два выхода для сигналов ПЧ, сдвинутых друг относительно друга на 90° , причем некоторые из них работают в дифференциальном режиме. Они выпускаются в отдельных пластиковых или керамических корпусах с габаритами $4 \times 4 \times 1$ мм

и устанавливаются на плату методом поверхностного монтажа. Производством таких микросхем занимается множество фирм, как зарубежных (Analog Devices [2]), так и отечественных (НИИ МА Прогресс [3]). Типичная блок-схема квадратурного демодулятора представлена на рис. 4.

Таким образом, если подать на вход Сиг. сигнал прямого канала, а на вход Гет. сигнал через линию задержки, то на выходах ПЧ будет получена огибающая с нулевой частотой ($f_c \pm f_i$), причем уровень напряжения огибающей будет иметь синусоидальную зависимость от частоты. Блок-схема частотного дискриминатора с использованием микросхемы представлена на рис. 5. Для сравнения, часть топологии, которую можно заменить, занимает площадь порядка 30×30 мм, что более чем в 50 раз превышает новые габариты. Полученные на выходах ЧД синусоиды расположены в положительной и отрицательной плоскостях, что позволяет избежать применения дополнительных каскадов на выходах частотного дискриминатора для вычитания сигналов. Неоднородности выходных характеристик ЧД (рис. 6), обусловлены неполным согласованием СВЧ трактов и могут быть сведены

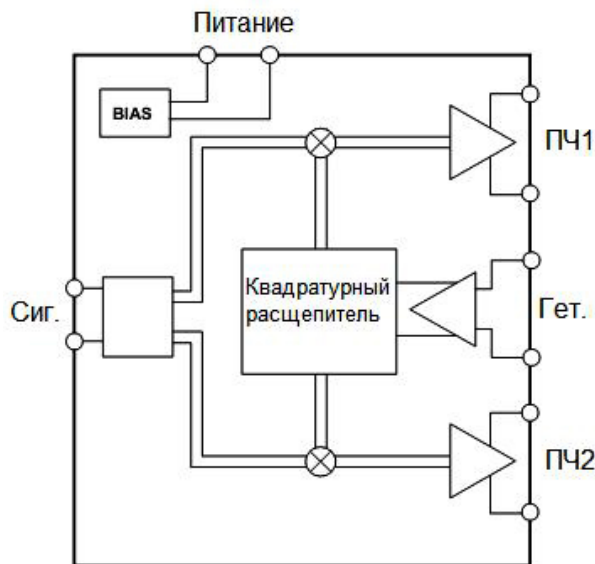


Рис. 4. Блок-схема квадратурного демодулятора

к минимуму при более детальной доработке топологии устройства.

Таким образом, полученный ЧД на монокристаллических квадратурных смесителях может быть применен в существующей аппаратуре МИЧ. Его использование поможет решить ряд проблем, связанных с МГП, уменьшить себестоимость изделия, упростить схему и, как следствие, повысить надежность изделия в целом. Разработанный ЧД может работать в широком диапазоне температур с минимальными отклонениями выходных характеристик, что делает его пригодным для использования в авиации, а также в условиях Крайнего Севера.

Библиографический список

1. Сапожников, Д. В. Оценка потенциально достижимых точностей мгновенного измерителя частоты / Д. В. Сапожников // Россия молодая: передовые технологии в промышленности. — 2015. — № 2. — С. 63.
2. Analog Devices, ADL5380. — Режим доступа : <http://www.analog.com/ru/products/rf-microwave/iq-modulators-demodulators/iq-demodulators/adl5380.html> (дата обращения: 10.11.2015).
3. НИИМА Прогресс, 1327МВ015. — Режим доступа : <http://www.mri-progress.ru/products/bis-i-sbis/svch-mnogofunktsionalnye/demodulyator-1327mv015/> (дата обращения: 10.11.2015).

САПОЖНИКОВ Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики». Адрес для переписки: microwaverf@mail.ru

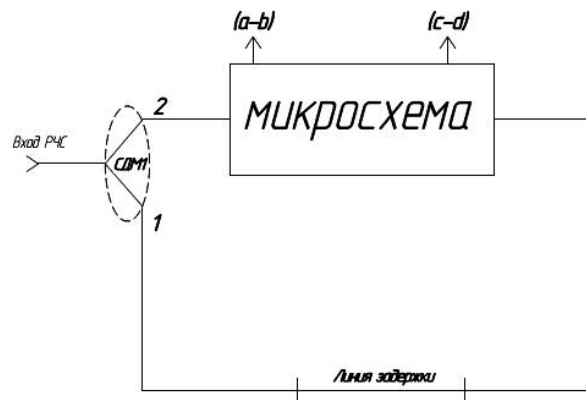


Рис. 5. Блок-схема частотного дискриминатора на микросхеме

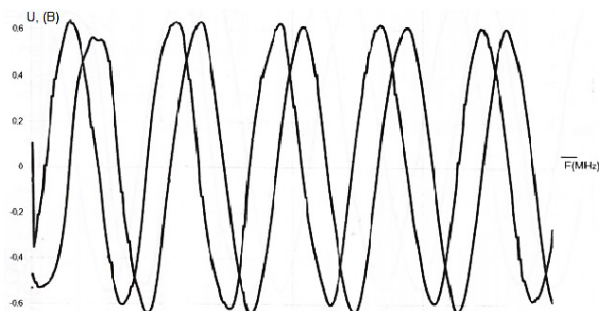


Рис. 6. Выходные характеристики частотного дискриминатора на монокристаллическом квадратурном демодуляторе

ГАМИЛОВСКАЯ Анастасия Вадимовна, аспирант кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

БЕЛОУСОВ Алексей Александрович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

ФЁДОРОВ Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

Адрес для переписки: paskalhelp@narod.ru

Статья поступила в редакцию 27.11.2015 г.

© Д. В. Сапожников, А. В. Гамиловская, А. А. Белоусов, Д. В. Фёдоров