

## Применение двухдиодных автодинов в устройствах радиоволнового контроля размеров изделий

В. Я. НОСКОВ, К. А. ИГНАТКОВ, А. П. ЧУПАХИН

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, e-mail: noskov@oko-ek.ru

Описан принцип действия двухдиодного автодина и основные методы бесконтактного определения размеров изделий. Рассмотрены особенности применения двухдиодных автодинов при определении размеров изделий доплеровским методом, а также малых отклонений контролируемого изделия от эталонного образца фазовым методом.

**Ключевые слова:** радиоволновой контроль, размер изделия, двухдиодный автодин.

Description of double-diode autodyne operating principle and basic methods of non-contact product size determining are given. The features of the application of double-diode autodyne for determining the size of products using doppler method are observed. The features of small deviations of the controlled product from the reference sample with phase method are given.

**Key words:** radio-wave control of product size, double-diode autodyne.

Для бесконтактного определения размеров изделий в различных областях техники широкое применение находят автодинные СВЧ-датчики [1—4]. Эти датчики имеют простейшую конструкцию приёмопередающего устройства, поскольку в них автодинный генератор (автодин) совмещает функции передатчика и приёмника. Как передатчик автодинный генератор формирует тестовое СВЧ-излучение, которое с помощью излучателя (антенны) направляется на контролируемый объект. Отражённое от объекта излучение через антенну воздействует на тот же генератор и вызывает в нём автодинный эффект, состоящий в изменении амплитуды и частоты электромагнитных колебаний, а также параметров смещения (силы тока или напряжения) в активном элементе (АЭ) генератора, зависящих от набега фазы излучения. Преобразование с помощью дополнительных средств детектирования или регистрации и обработка этих изменений в полезный информационный сигнал низкой частоты позволяют получить необходимые данные измерений [4—6].

В последнее время среди автодинных приёмопередающих устройств СВЧ-диапазона особый интерес вызывают так называемые двухдиодные автодины, конструктивно представляющие два последовательно соединённых генераторных модуля, выполненных в камерах фланцевого типа [7]. Регистрация изменений параметров смещения в цепи питания или амплитуды колебаний каждого СВЧ-модуля обеспечивает получение двух автодинных сигналов с относительным фазовым сдвигом. Низкая девиация частоты автодинов способствует улучшению формы сигналов и расширению динамического диапазона системы, а пониженный уровень частотных флуктуаций позволяет исключить периодическую нестационарность уровня шума в выходных сигналах [8].

Цель данной статьи — продемонстрировать некоторые новые параметры и расширение функциональных возмож-

ностей датчиков и измерителей, выполненных на основе двухдиодных автодинов.

Анализ работы двухдиодного автодина, представленного в виде модели двух взаимно синхронизированных одноконтурных парциальных генераторов [9, 10], показал, что отражённое излучение, воздействующее на колебательную систему первого генератора, вызывает в системе изменения амплитуд колебаний каждого генератора и частоты генерации, а также разности фаз этих колебаний:

$$\Delta A_n \equiv \Delta A_n(I) = A_n - A_{n0}, \quad n = 1, 2;$$

$$\Delta \omega \equiv \Delta \omega(I) = \omega - \omega_0.$$

Данные изменения, зависящие от уровня отражённого излучения и расстояния  $I$  до отражающего объекта, вследствие присущего генераторам явления автодинного детектирования, в свою очередь, также приводят к изменениям параметров смещения АЭ  $n$ -го парциального генератора:

$$\Delta I_n \equiv \Delta I_n(I) = I_n - I_{n0}.$$

Здесь  $A_n$ ,  $I_n$ ,  $\omega$ ,  $A_{n0}$ ,  $I_{n0}$ ,  $\omega_0$  — амплитуды, параметры смещения АЭ, частота колебаний  $n$ -автоколебательной системы при наличии и отсутствии отражённого излучения, соответственно.

Основные выражения, описывающие относительные автодинные изменения амплитуд колебаний каждого из парциальных генераторов  $a_n(I)$ , параметры смещения  $i_n(I)$  АЭ, частоты  $\Delta \omega$  и полного набега фазы  $\delta(I)$  отражённого излучения в окрестности режима стационарных колебаний, имеют вид

$$a_n(I) = \Delta A_n / A_{n0} = \Gamma K_n \cos [\delta(I) - \psi_{1n}], \quad (1)$$

$$i_n(I) = \Delta I_n / I_{n0} = \Gamma K_{0n} \cos [\delta(I) - \psi_{0n}], \quad (2)$$

$$\Delta\omega(I) = -\Delta\omega_m \sin [\delta(I) + \theta], \quad (3)$$

$$\delta(I) = (2\omega_0 I / c) - C_{o.c} \sin [\delta(I) + \theta], \quad (4)$$

где  $\Gamma$  — приведённый к зажимам генератора коэффициент отражения (по амплитуде), описывающий затухание излучения при его распространении до контролируемого объекта и обратно;  $K_n$  — коэффициент передачи входного сигнала в изменения амплитуды колебаний  $n$ -го парциального генератора, характеризующий собственное автодинное усиление и явление переноса отклика на другой парциальный генератор;  $K_{0n}$  — коэффициент автодетектирования входного сигнала в изменения параметров смещения АЭ  $n$ -го генератора;  $\Delta\omega_m = \Gamma (\omega_0 / Q_{вн} S_c) L_a$  — автодинная девиация частоты;  $Q_{вн}$  — внешняя добротность колебательной системы первого генератора;  $S_c$  — коэффициент стабилизации частоты, зависящий от взаимной синхронизации парциальных генераторов;  $L_a$  — коэффициент автодинной девиации частоты, обусловленный неизохронностью первого генератора;  $\psi_{1n}$ ,  $\psi_{0n}$ ,  $\theta$  — фазовые углы относительного смещения автодинных откликов, которые определяются внутренними свойствами генераторов и параметрами синхронизации;  $C_{o.c} = 2\Delta\omega_m / c$  — параметр так называемой обратной связи автодинной системы, характеризующий степень искажения автодинных характеристик;  $c$  — скорость распространения СВЧ-излучения.

Из анализа выражений (1)–(4), а также данных экспериментальных исследований [10] следует, что в результате действия взаимной синхронизации ( $S_c \gg 1$ ) парциальных генераторов автодинная девиация частоты двухдиодного автодина значительно меньше, чем обычного автодинного генератора. Поэтому при применении двухдиодного автодина параметр обратной связи  $C_{o.c} \ll 1$  (4) и набег фазы  $\delta(I)$  является практически линейной функцией  $I$ :  $\delta(I) = 2\omega_0 I / c$ . При этом выходные сигналы, регистрируемые по изменению амплитуды (1) или параметров смещения (2), имеют гармоническую форму:

$$v_n(I) = \Gamma K_n K_d \cos [(2\omega_0 I / c) - \psi_{1n}],$$

$$u_n(I) = \Gamma K_{0n} K_{np} \cos [(2\omega_0 I / c) - \psi_{0n}],$$

где  $K_d$  — коэффициент детектирования изменений амплитуды колебаний;  $K_{np}$  — коэффициент преобразования изменений среднего значения силы тока (напряжения) смещения в напряжение выходного сигнала. Наилучшие условия для применения двухдиодных автодинов — получение разностей фаз  $\Delta\psi_1 = \pi/2$  или  $\Delta\psi_0 = \pi/2$ , когда автодинные сигналы находятся в квадратуре. Данные условия достигаются соответствующей настройкой двухдиодного автодина [7].

Определение размеров изделий с помощью автодинного датчика можно выполнять двумя методами. В первом — автодин применяют как известный доплеровский измеритель скорости движения объектов и длины пройденного пути при интегрировании числа периодов (или полупериодов) сигнала [1, 3, 5, 6]. Во втором — процесс измерения основан на использовании фазовой чувствительности автодина [1, 2, 4].

В первом методе использования двухдиодных автодинов при обработке сигналов учитывается соответствие каждого периода автодинного сигнала радиальному перемещению объекта на расстояние, равное половине длины волны  $\lambda/2$

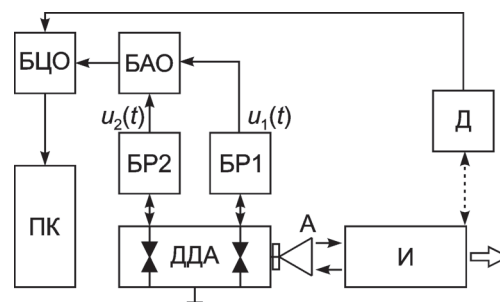


Рис. 1. Блок-схема стенда:

А — антенна; БР1, БР2 — блоки регистрации (выделения) автодинного сигнала; БАО — блок аналоговой обработки сигналов; БЦО — блок цифровой обработки сигналов; Д — датчик начала отсчета измерения; ДДА — двухдиодный автодин; И — изделие; ПК — персональный компьютер

СВЧ-излучения. Если при этом учитывается каждый переход сигнала через нуль, то отсчеты пройденного пути будут следовать через четверть длины волны  $\lambda/4$ . Поэтому при использовании одного из выходных сигналов  $u_1(t)$  или  $u_2(t)$  двухдиодного автодина, можно обеспечить максимальную точность измерений до  $\lambda/4$  (2 мм при  $\lambda = 8$  мм). Тогда как совместная обработка автодинных сигналов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  при условии их ортогональности позволяет повысить точность ещё в 2 раза.

На рис. 1 представлена блок-схема стенда для выполнения измерений по первому методу с помощью двухдиодных автодинов при регистрации сигналов в цепи питания СВЧ-диодов. Двухдиодный автодин ДДА непосредственно связан с антенной А. Напряжение (ток) питания к АЭ каждого модуля поступает через блоки регистрации БР1 и БР2, которые, в свою очередь, преобразуют автодинные изменения тока или напряжения смещения в напряжения выходных сигналов  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  [11]. Данные сигналы подаются для раздельного усиления и фильтрации в блок аналоговой обработки БАО, с выхода которого они поступают на входы каналов аналогового ввода модуля NI-9205 фирмы National Instruments в составе платформы DAQ-9172 блока цифровой обработки БЦО. Далее оцифрованные сигналы по интерфейсу USB передаются в персональный компьютер ПК для обработки с помощью виртуального прибора, созданного в LabVIEW 8.6. Датчик Д, регистрирующий появление одного, а затем другого торца изделия И, предназначен для формирования сигналов начала и конца отсчета при измерениях.

На рис. 2 представлены временные диаграммы выходных сигналов  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  двухдиодного автодина (кривые 1, 2). В моменты пересечения сигналами нулевого уровня формируются импульсы  $u_\Phi(t)$  (кривая 3). Сигналы от специальных датчиков начала и конца измерения формируют измерительный интервал  $u_\Pi(t)$  (кривая 4). Отсчет числа импульсов  $u_\Phi(t)$ , попавших в измерительный интервал  $u_\Pi(t)$ , и умножение на коэффициент  $\lambda/(8\cos \varphi)$ , где  $\varphi$  — угол между вектором скорости движения объекта и осью диаграммы направленности антенны, позволяет определить требуемый размер, например длину балки на прокатном стане или пройденный каким-либо контролируемым объектом путь.

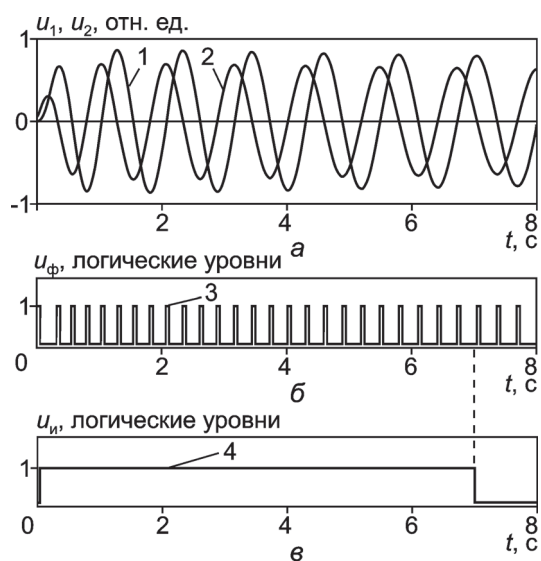


Рис. 2. Временные диаграммы выходных сигналов  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  двухдиодного автодина (а), формирователя импульсов  $u_\phi(t)$  (б), перехода сигналов через нуль и измерительного интервала  $u_{и}(t)$  (в)

Описанный алгоритм обработки автодинных сигналов был реализован в среде программирования LabVIEW 8.6. В качестве объекта экспериментальной проверки алгоритма использовали отражатель в виде квадратной пластинки  $5 \times 5$  см, связанный с приводом от электродвигателя кривошипно-шатунным механизмом для получения его возвратно-поступательного движения. Моменты начала и конца измерения

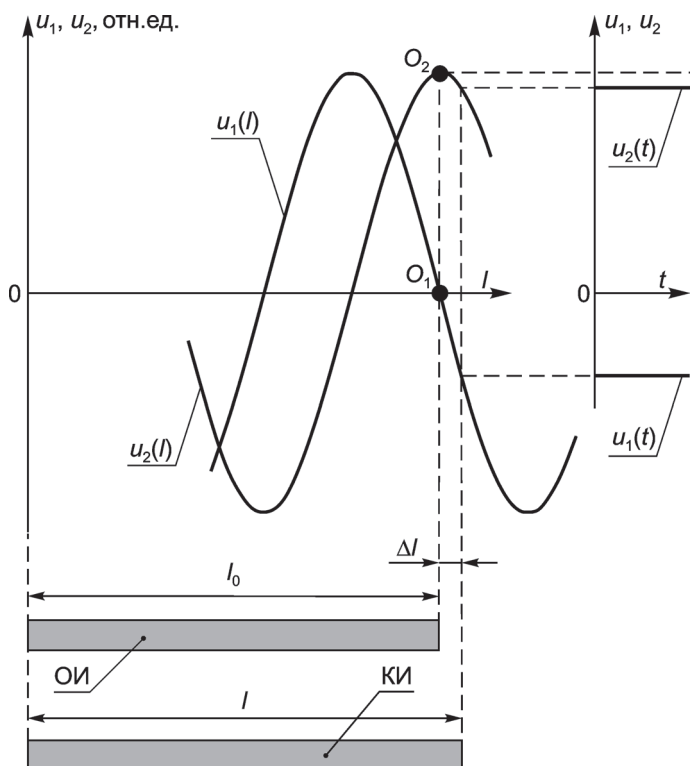


Рис. 3. Принцип преобразования отклонения размера  $\Delta l$  контролируемого изделия в выходные сигналы  $u_1$ ,  $u_2$  двухдиодного автодина

регистрировали с помощью щелевого фотодатчика, реагирующего на прохождение пластинки. Двухдиодный автодин, выполненный на диодах Ганна АА727А с частотой генерации 37,5 ГГц, обеспечивал отсчёт контролируемого расстояния между датчиками с дискретностью 1 мм.

Во втором методе использования двухдиодного автодина измерение размеров изделий из металла состоит в сравнении размера  $l_0$  образцового изделия (ОИ) с размером  $l = l_0 + \Delta l$  контролируемого изделия (КИ), и преобразовании отклонения  $\Delta l$  от номинального значения (рис. 3) в напряжение  $u$  выходного сигнала. Для этого в качестве дискриминационной характеристики использована одна из ветвей зависимости значения выходного сигнала  $u$  автодина от набега фазы  $\delta(l)$  отражённого излучения, например  $u_1(l) \equiv u_1[\delta(l)]$ .

Перемещая автодинный датчик относительно поверхности изделия, производится предварительная настройка начального набега фазы  $\delta_{01}(l) = (2\omega_0 l_0/c) - \psi_{01}$  отражённого СВЧ-излучения таким образом, чтобы рабочая точка находилась в положении  $O_1$  и при этом  $u_1(l) = 0$  (кривая  $u_1(l)$ ). Тогда отклонение  $\Delta l$  регистрируется по изменению автодинного сигнала  $u_1$  КИ относительно нулевого уровня сигнала, полученного от ОИ. Крутизна преобразования этих отклонений  $D(l) = d[u_1(l)]/dl = -4\Gamma K_{01} K_{пр} \pi/\lambda$  зависит от уровня отражённого излучения (через коэффициент  $\Gamma$ ), а также нестабильности коэффициентов  $K_{01}$ ,  $K_{пр}$ .

Второй выходной сигнал  $u_2$  двухдиодного автодина для ОИ соответствует рабочей точке  $O_2$  и амплитудному значению функции  $u_2(l_0) = \Gamma K_{02} K_{пр}$  (кривая  $u_2(l)$ ). При малых отклонениях размера КИ относительно ОИ изменениями  $u_2(l)$  можно пренебречь. Таким образом, полученный сигнал  $u_2(l_0)$  при обработке измерительного сигнала  $u_1(l)$  можно использовать для определения крутизны  $D(l)$  преобразования и соответственно автоматической самокалибровки датчика.

В случае работы датчика, например в процессе измерения на прокатном стане толщины листа, сигналы  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  являются непрерывными функциями времени и их можно использовать в замкнутой системе управления размером изделия. В случае выполнения отдельных контрольно-измерительных операций с изделиями выходные сигналы  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  автодинного датчика являются дискретными, и их можно применять для управления сортировкой или разбраковкой поступающих изделий.

Для реализации фазового метода измерений размеров изделий можно использовать описанный выше стенд (см. рис. 1). При этом на выходе блоков регистрации необходимо использовать сигналы  $u_{0n}$ , с учётом постоянной составляющей. Уровень этой составляющей обычно значительно превышает амплитуду автодинных изменений и отличается нестабильностью из-за воздействия различных факторов, в том числе температуры окружающей среды, и изменений режима колебаний на АЭ генератора. Поэтому применение этих сигналов для дальнейшей обработки сопряжено со снижением точности измерений.

На рис. 4 представлена блок-схема автодинного датчика, в котором для уменьшения влияния отмеченных факторов, а также фликкерных флуктуаций, применяют амплитудную модуляцию СВЧ-излучения и синхронное детектирование автодинного сигнала на частоте этой модуляции [4]. Создаваемое двухдиодным автодинным генератором ДДА СВЧ-излучение поступает через фазовращатель  $\phi_1$ , плечи 1, 2 циркулятора  $\mathcal{C}$ , фазовращатель  $\phi_2$ , аттенюатор АТН в приёмопередающую антенну А и направляется на поверхность

объекта контроля ОК. Отражённое от поверхности объекта СВЧ-излучение возвращается в антенну А и далее через аттенюатор АТН, фазовращатель  $\varphi_2$  и плечи 2, 3 циркулятора Ц поступает на вход *pin*-модулятора М, с помощью которого осуществляется амплитудная модуляция отражённого СВЧ-излучения. Частота и глубина модуляции задаются генератором модуляции ГМ. Отражённое от *pin*-модулятора излучение, пройдя через плечи 3, 1 циркулятора Ц и фазовращатель  $\varphi_1$ , воздействует на автодинный генератор ДДА. Данное воздействие вследствие автодинного эффекта приводит к изменениям параметров автоколебаний генератора и постоянной составляющей тока или напряжения АЭ, которые зависят от общего набега фазы  $\delta(l)$  отражённой волны. Изменения постоянной составляющей тока или напряжения смещения АЭ выделяются в виде амплитудно-модулированного сигнала с помощью блоков регистрации БР1, БР2. Далее полученные сигналы на частоте модуляции очищаются от фликкер-шумов СВЧ-генератора ДДА с помощью селективных

фильтров  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  и поступают на соответствующие входы узла синхронных детекторов СД. На вторые входы этих детекторов подаётся опорное колебание от генератора модуляции. Выходные напряжения синхронных детекторов далее следуют в измерительно-вычислительное устройство ИВУ. В этом устройстве производится калибровка чувствительности датчика и формирование выходных данных о значении и знаке отклонения размера, а также сигналов «Норма» или «Брак» в случае выхода значений измерения за пределы установленных допусков.

Модуляция отражённого СВЧ-излучения с помощью *pin*-модулятора позволяет увеличить на 15—20 дБ чувствительность датчика по сравнению с вариантом без модуляции. Небольшое постоянное напряжение смещения на *pin*-диоде модулятора позволяет линеаризовать модуляционную характеристику этого диода и осуществить модуляцию отражённого СВЧ-излучения по гармоническому закону. Это также способствует повышению чувствительности датчика из-за увеличения энергии первой гармоники модулированного отражённого излучения.

Фазовращатель  $\varphi_1$  служит для компенсации паразитного прохождения излучения на *pin*-модулятор через плечи 1, 3 циркулятора и обратно в автодин. Для этого при отсутствии в поле излучения антенны объекта контроля с помощью фазовращателя  $\varphi_1$  устанавливается сдвиг фаз, при котором на выходе блока регистрации сигнал имеет наименьшее значение.

Начальная установка рабочей точки  $O_1$  (см. рис. 3) в нулевое положение выполняется изменением набега фазы  $\delta(l)$  отражённого излучения с помощью переменного фазовращателя  $\varphi_2$ , когда в поле излучения антенны устанавливается образцовое изделие. Затем для калибровки датчика в поле излучения антенны устанавливаются изделия с известными размерами, и с помощью переменного аттенюатора задаётся требуемый выходной сигнал.

Среднеквадратическая погрешность  $\sigma_{\text{ш}}$  измерений фазовым методом определяется эффективным значением относительных флуктуаций  $i_{\text{шэф}}$  смещения тока, а также зависит от уровня автодинного сигнала  $\Gamma K_{0n} K_{\text{пр}}$  и крутизны  $D(I_0)$  дискриминационной характеристики в рабочей точке  $O_1$ . Выражение, полученное с учётом работ [12, 13], для составляющей погрешности  $\sigma_{\text{ш}}$ , обусловленной шумами, имеет вид

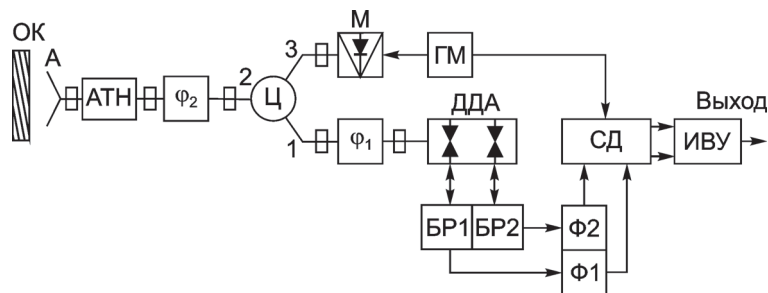


Рис. 4. Блок-схема автодинного датчика для контроля размеров изделий: ОК — объект контроля; А — приёмопередающая антенна; АТН — аттенюатор;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — фазовращатели; 1, 2, 3 — плечи циркулятора Ц; М — *pin*-модулятор; ГМ — генератор модуляции; ДДА — двухдиодный автодинный генератор; БР1, БР2 — блоки регистрации автодинного сигнала;  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  — селективные фильтры; СД — узел синхронных детекторов; ИВУ — измерительно-вычислительное устройство

$$\sigma_{\text{ш}} = i_{\text{шэф}} / [\Gamma K_{0n} K_{\text{пр}} D(I_0)] = (\lambda/4\pi) \gamma_{\text{ш}}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{\text{ш}} = 1/q_{\text{с-ш}}$  — относительный уровень шума на выходе автодина;  $q_{\text{с-ш}} = (P_{\text{с}}/P_{\text{ш}})^{1/2}$  — отношение сигнал—шум;  $P_{\text{с}} = P_0 \Gamma^2$ ,  $P_{\text{ш}} = k T_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \Delta F$  — мощности сигнала отражённого излучения и собственных шумов генератора, соответственно;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $T_{\text{ш}}$  — эквивалентная шумовая температура АЭ;  $M_{\text{ш}}$  — мера шума;  $\Delta F$  — полоса анализируемых частот [8].

Из (5) следует, что погрешность измерений уменьшается со снижением длины волны  $\lambda$  излучения и увеличением отношения сигнал—шум  $q_{\text{с-ш}}$ .

Кроме шумовой составляющей  $\gamma_{\text{ш}}$  погрешности измерений автодинному датчику свойственны также погрешности, обусловленные изменениями уровня отражённого излучения в зависимости от качества обработки поверхности изделий и условий её облучения  $\gamma_{\Gamma} = \Delta \Gamma / \Gamma$ , нестабильностями коэффициента автодетектирования  $\gamma_K = \Delta K_0 / K_0$  и частоты  $\gamma_{\omega} = \Delta \omega_0 / \omega_0$  генерации автодинного генератора [2]. Приняв во внимание статистическую независимость этих составляющих, получим выражение для оценки абсолютной погрешности  $\sigma_a$  автодинного метода измерения:

$$\sigma_a = (\lambda/4\pi) \sqrt{\gamma_{\text{ш}}^2 + \gamma_{\Gamma}^2 + \gamma_K^2 + \gamma_{\omega}^2}. \quad (6)$$

Нестабильность частоты двухдиодного автодина в диапазоне температур  $\pm 50^\circ \text{C}$  составляет  $\gamma_{\omega} = 3,2 \cdot 10^{-4}$ , при этом относительные изменения коэффициента автодетектирования  $\gamma_K = 0,5 \cdot 10^{-3}$ . Влияние изменений коэффициента отражения  $\Gamma$  можно корректировать, как показано выше, введением автоматической калибровки непосредственно при измерении сигнала ортогонального канала двухдиодного автодина, поэтому составляющей  $\gamma_{\Gamma}$  в (6) можно пренебречь. При  $q_{\text{сш}} = 60$  дБ расчётное значение относительного уровня шумов составляет  $\gamma_{\text{ш}} = 1 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, в диапазоне 8 мм согласно (6)  $\sigma_a = 0,74 \cdot 10^{-3}$  мм.

Описанный алгоритм обработки автодинных сигналов был также реализован в среде программирования LabVIEW

8.6. В качестве объекта экспериментальной проверки рассмотренного алгоритма использовали измеритель внутренних размеров полых металлических изделий, описанный в работе [4]. Замена обычного (однодиодного) автодина на двухдиодный, выполненный на диодах Ганна AA727A с частотой генерации 37,5 ГГц, обеспечил возможность самокалибровки датчика и, следовательно, практически исключил зависимость полученных данных от качества обработки поверхности изделий.

**Заключение.** В результате формирования двух ортогональных сигналов и значительно меньшей девиации частоты генерации двухдиодные автодины обеспечивают возможность создания датчиков и измерителей размеров изделий с улучшенными характеристиками по сравнению с известными приборами, выполненными на базе обычных автодинов.

При использовании доплеровского метода измерений длины изделия при его относительном перемещении погрешность измерений уменьшается в 2 раза. В случае использования фазового метода измерений размеров применение двухдиодных автодинов позволяет создать самокалибрующиеся радиоволновые измерители, исключающие влияние на точность измерений уровня отраженного СВЧ-излучения.

Таким образом, показана перспективность применения двухдиодных автодинов в контрольно-измерительной аппаратуре, предназначенной для решения задач радиоволнового контроля размеров объектов.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. **Носков В. Я.** Анализ автодинного СВЧ-датчика для бесконтактного измерения и контроля размеров изделий // Измерительная техника. 1992. № 3. С. 24—26.
3. **Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В.** Физика радиоволновых и оптических автодинов. Саратов: Изд-во СГУ, 2003.

4. **Носков В. Я.** Автодинный СВЧ-датчик для бесконтактного контроля внутренних размеров изделий // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 23-я Междунар. Крымская конф. Севастополь: Вебер, 2013. С. 1051—1052.

5. **Усанов Д. А., Постельга А. Э.** Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина // Медицинская техника. 2011. Т. 45. № 1. С. 8—10.

6. **Лушев В. П., Воторопин С. Д., Дерябин Ю. Н., Журинов Ю. Б., Потапов М. Г.** Автодинные СВЧ датчики перемещения для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 15-я Междунар. Крымская конф. Севастополь: Вебер, 2005. С. 831—833.

7. **Носков В. Я.** Двухдиодный автодинный приёмопередатчик // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 65—70.

8. **Носков В. Я., Игнатков К. А.** Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 12. С. 112—124.

9. **Воторопин С. Д., Носков В. Я.** Обобщённая модель и основные уравнения автодинной ГИС КВЧ на основе мезапланарных ганновских структур // Известия вузов. Физика. 2001. Т. 44. № 12. С. 23—30.

10. **Носков В. Я., Смольский С. М.** Основные свойства двухдиодных автодинов и их применение // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 20-я Междунар. Крымская конф. Севастополь: Вебер, 2010. С. 1051—1054.

11. **Носков В. Я., Смольский С. М.** Регистрация автодинного сигнала в цепи питания генераторов на полупроводниковых диодах СВЧ. (Обзор) // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 1. С. 14—26.

12. **Носков В. Я.** Анализ влияния шумов на характеристики автодинных измерителей вибраций и малых перемещений // Измерительная техника. 2014. № 9. С. 49—53.

13. **Noskov V. Ya., Ermak G. P.** Measurement errors and dynamic range of autodyne vibration meters // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. V. 73. N. 20. P. 1843—1861.

Дата принятия 20.08.2015 г.

