

Анализ влияния шумов на характеристики автодинных измерителей вибраций и малых перемещений

В. Я. НОСКОВ

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

Проанализированы особенности формирования автодинных и шумовых характеристик в автодинном генераторе при воздействии на него электромагнитного излучения, отраженного от объекта исследований. Получены выражения и рассчитаны коэффициенты преобразования, погрешности измерения и динамический диапазон автодинного измерителя параметров вибраций и малых перемещений. Разработаны рекомендации по оптимальному выбору рабочей точки таких измерителей.

Ключевые слова: вибрации, автодинный генератор, шумовые характеристики.

An analysis of peculiarities of autodyne and noise characteristics formation in autodyne oscillator at the influence of own electromagnetic radiation reflected from the object under study is carried out. The expressions for calculation of conversion factors, measurement error and the dynamic range of autodyne instrument for vibrations and small displacement parameters measurement are derived. The recommendations on correct choice of an operating point of autodyne vibrations and small displacements measuring instruments were developed.

Key words: vibration, autodyne oscillator, noise characteristics.

Радиоволновые методы контроля параметров вибраций и перемещений из-за уникальных свойств, безынерционности и бесконтактности измерений нашли широкое применение в различных контрольно-измерительных приборах и системах. Принцип действия указанных методов основан на анализе интерференции прямого и отраженного СВЧ-излучений. Такой анализ обеспечивает высокие показатели по точности измерений и коэффициенту преобразования виброперемещений в выходной информационный сигнал [1]. В приборах данного типа в качестве преобразователя, анализирующего интерференционную картину радиоволн, часто используются автодины (автодинные генераторы) [1–4]. Автодинный генератор излучает сверхвысокочастотные колебания с помощью направленной на контролируемый объект антенны. Отраженное от объекта излучение возвращается в генератор, вызывая в нем автодинный эффект, состоящий в изменениях частоты и амплитуды колебаний, а также параметров смещения активного элемента генератора. Регистрация этих изменений в виде низкочастотных выходных сигналов и их анализ позволяют определить параметры исследуемых вибраций (амплитуду, частоту, спектральный состав) и перемещений отражающих объектов.

Особенностью автодинных измерителей являются ангармонические искажения их выходных характеристик и нестационарность шумов, обусловленные нелинейностью набега фазы отражающего СВЧ-излучения вследствие автодинных изменений частоты колебаний генератора [5]. Исследованиям влияния данных искажений на формирование выходных сигналов, а также условий оптимального выбора рабочих точек и способов регистрации автодинного отклика посвящено большое количество работ (см. библиографию в [6]). Однако влияние нестационарности шумов выходного сигнала на характеристики и параметры автодинных измерителей ранее не рассматривали, хотя это представляет несомненный интерес для техники вибрационных измерений, по-

скольку шумовые характеристики автодинов определяют их потенциальные возможности по дальности действия и точности измерений параметров виброперемещений.

Для решения поставленной задачи используем систему уравнений для квазистатического анализа относительных автодинных изменений частоты $\chi = \Delta\omega/\omega_0$ и амплитуды $a = \Delta A/A_0$ колебаний одноконтурного генератора [7]. Здесь $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, $\Delta A = A - A_0$ — абсолютные автодинные изменения частоты ω и амплитуды A колебаний относительно их стационарных значений A_0 , ω_0 . Данные уравнения, дополненные эквивалентными параметрами источников внутренних шумов генератора, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \alpha a + \varepsilon \chi &= \Gamma \eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t); \\ \beta a + Q_{\text{вн}} \chi &= -\Gamma \eta \sin \delta(t, \tau) - a_o(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где α — приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; ε — параметр, определяющий неизодроменность генератора, т. е. учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости активного элемента генератора; Γ — коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до объекта и обратно; $\eta = Q_{\text{н}}/Q_{\text{вн}}$, $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{вн}}$ — коэффициент полезного действия, нагруженная и внешняя добротности колебательной системы, соответственно; $\delta(t, \tau) = \omega t$ — набег фазы при распространении излучения до отражателя и обратно; t — текущее время; $\tau = 2l/c$ — время запаздывания (распространения) отраженного от объекта излучения; l — расстояние от автодина до отражающей поверхности; c — скорость распространения СВЧ-излучения; $a_c(t)$, $a_o(t)$ — синфазная и ортогональная составляющие относительного внутреннего шума генератора, соответствен-

но; β — параметр, определяющий неизохронность генератора, т. е. учитывающий влияние вариаций амплитуды на частоту колебаний через изменения параметров реактивной проводимости активного элемента генератора. При этом полагаем, что шум является стационарным нормальным процессом при нулевом среднем значении.

Решение системы (1) для нормированных относительных изменений частоты $\chi_n(l_n, t)$ и амплитуды $a_n(l_n, t)$ колебаний имеет вид:

$$\chi_n(l_n, t) = (\chi/\chi_m) = -\chi_{ш}(t) - \sin[\delta(l_n, t) + \theta]; \quad (2)$$

$$a_n(l_n, t) = (a/a_m) = a_{ш}(t) + \cos[\delta(l_n, t) - \psi], \quad (3)$$

где $\chi_m = \Gamma L_a$, $a_m = \Gamma K_a$ — амплитудные значения автодинного отклика; L_a , K_a — коэффициенты автодинной девиации частоты и усиления, соответственно:

$$L_a = \eta(1 + \gamma^2)^{1/2}/Q_n(1 - \gamma\rho), \quad K_a = \eta(1 + \rho^2)^{1/2}/\alpha(1 - \gamma\rho);$$

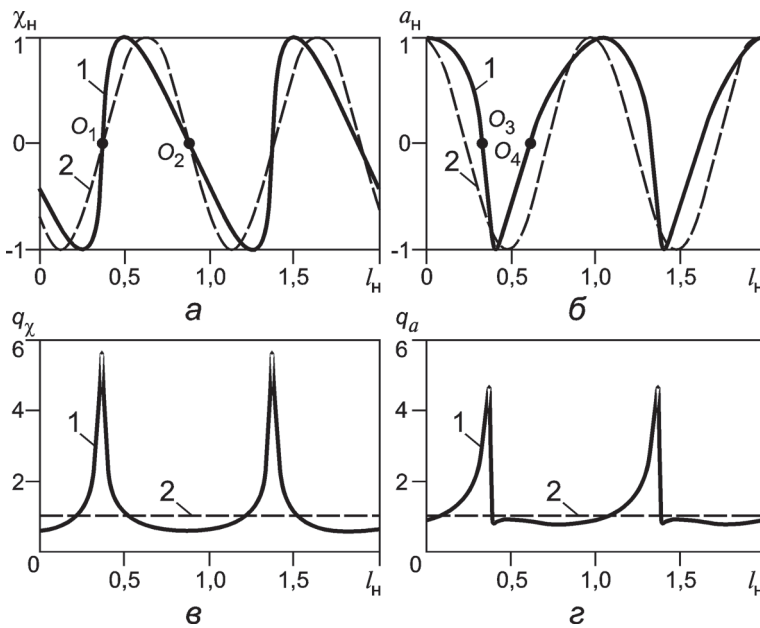
$\chi_{ш}(t)$, $a_{ш}(t)$ — составляющие относительного уровня частотного и амплитудного шума, соответственно:

$$\chi_{ш}(t) = [a_o(t) + \gamma a_c(t)]L_{с-ш}, \quad (4)$$

$$a_{ш}(t) = [a_c(t) + \rho a_o(t)]K_{с-ш}; \quad (5)$$

$L_{с-ш}$, $K_{с-ш}$ — коэффициенты, характеризующие отношение сигнал—шум автодинных изменений частоты и амплитуды, соответственно:

$$L_{с-ш} = [\Gamma\eta(1 + \gamma^2)^{1/2}]^{-1}, \quad K_{с-ш} = [\Gamma\eta(1 + \rho^2)^{1/2}]^{-1};$$



Частотная $\chi_n(l_n)$ (а), амплитудная $a_n(l_n)$ (б) характеристики автодина и соответствующие им характеристики относительных уровней среднеквадратических значений частотного $q_\chi(l_n)$ (в) и амплитудного $q_a(l_n)$ (г) шумов в зависимости от нормированного расстояния l_n до отражающей поверхности

$\delta(l_n, t)$ — фазовая характеристика автодина (ФХА), определяющая набег фазы СВЧ-излучения за время τ :

$$\delta(l_n, t) = 2\pi l_n - p_{ш}(t) - C_{ос} \sin[\delta(l_n, t) + \theta]; \quad (6)$$

$l_n = \omega_0 \tau / 2\pi = l/(\lambda/2)$ — расстояние, нормированное относительно половины длины волны λ СВЧ-излучения; $p_{ш}(t) = \Delta\omega_{ш}(t)\tau = p_a \chi_{ш}(t)$ — индекс модуляции фазы, обусловленный частотными шумами генератора; $\Delta\omega_{ш}(t)$ — шумовая модуляция частоты генерации:

$$\Delta\omega_{ш}(t) = \omega_0 [a_o(t) + \gamma a_c(t)]/[Q_n(1 - \gamma\rho)];$$

$C_{ос}$ — параметр обратной связи автодинной системы [6, 8]:

$$C_{ос} = \Delta\omega_a \tau = \Gamma\eta\omega_0 \tau (1 + \gamma^2)^{1/2}/Q_n(1 - \gamma\rho); \quad (7)$$

$\Delta\omega_a = \Gamma\eta\omega_0 L_a$ — автодинная девиация частоты; $\theta = \arctg(\gamma)$, $\psi = \arctg(\rho)$ — углы относительных фазовых смещений автодинных изменений χ_n , a_n , соответственно; $\gamma = \beta/\alpha$, $\rho = \varepsilon/Q_n$ — коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора.

При выполнении условий $p_{ш} \ll 1$, $C_{ос} < 1$ решение уравнения (6) методом последовательных приближений запишем в виде:

$$\begin{aligned} \delta(l_n, t) = & (2\pi l_n)_{(0)} - p_{ш}(t) - C_{ос} \sin \{(2\pi l_n)_{(1)} - \\ & - p_{ш}(t) + \theta - C_{ос} \sin [(2\pi l_n)_{(2)} - p_{ш}(t) + \theta - \dots \\ & - C_{ос} \sin [(2\pi l_n)_{(n-1)} - p_{ш}(t) + \theta - C_{ос} (\sin (2\pi l_n)_{(n)} - p_{ш}(t) + \theta)]\}, \end{aligned}$$

где индексы в круглых скобках означают порядок приближения.

В полученных выше выражениях (2), (3) первые члены $\chi_{ш}(t)$, $a_{ш}(t)$ представляют соответствующие аддитивные стационарные шумы в генераторе, а вторые, обусловленные воздействием отраженного излучения и его шумовой модуляцией $p_{ш}(t) = C_{ос}\chi_{ш}(t)$ фазы $\delta(l_n, t)$, описывают (кроме формирования полезного сигнала) также и мультипликативную составляющую общего шума. Сначала в этих выражениях рассмотрим составляющие, описывающие детерминированные процессы в автодинном генераторе.

Без учета первых «шумовых» членов, когда $\chi_{ш}(t) = a_{ш}(t) = 0$, выражения (2), (3) представляют частотную $\chi_n(l_n, t) \equiv \chi_n(l_n)$ (ЧХА) и амплитудную $a_n(l_n, t) \equiv a_n(l_n)$ (АХА) характеристики автодина. Данные характеристики, представленные на рисунках а, б рассчитывали согласно (2), (3) с учетом (7), (8) при $\gamma = 1$, $\rho = -0,2$ и значениях параметра обратной связи $C_{ос} = 0,8$ (кривые 1), $C_{ос} = 0,08$ (кривые 2).

Как следует из полученных кривых $\chi_n(l_n)$, $a_n(l_n)$, при выполнении неравенства $C_{ос} \ll 1$ (назовем его случаем «слабой обратной связи»), ЧХА и АХА являются практически гармоническими функциями l_n (см. кривые 2). В случае «сильной обратной связи», когда значение параметра $C_{ос}$ приближается к единице, они становятся ангармоническими (см. кривые 1). Отметим, что когда $C_{ос} > 1$ автодинные изменения параметров колебаний происходят скачками с гистерезисными явлениями, нарушая нормальную работу автодинных систем. Данные свойства автодинных характеристик и их зависимость от внутрен-

них параметров генераторов более подробно изучены в ряде работ [6—8].

Буквами «О» с цифровыми индексами 1—4 на пересечениях ЧХА $\chi_n(l_n)$ и АХА $a_n(l_n)$ оси абсцисс (см. рисунки а, б, кривые 1) обозначены положения возможных рабочих точек автодинного преобразователя для сильной обратной связи. Точки O_1, O_2 на ЧХА при $C_{oc} < 1$ — фазостабильные, не зависящие от уровня отраженного излучения и, как следует из (2), (8), им соответствуют значения набега фазы

$$\delta(O_{1,2}) = k\pi - \theta, \quad (9)$$

где k — целое число полувольт, укладывающихся между автодином и отражающим объектом, причем четным значениям k и нулю соответствуют точки O_1 , а нечетным — O_2 . Положение рабочих точек O_3, O_4 является зависимым от уровня отраженного излучения. Значения набега фаз для этих точек можно вычислить из (3) с учетом (8) по следующей формуле:

$$\delta(O_{3,4}) = (1 + 2k)(\pi/2) + \psi \pm C_{oc} \cos\{\Phi \pm C_{oc}^{(1)}\{\cos\Phi \mp \cos[\Phi \pm \dots \pm C_{oc}^{(n)}\{\cos\Phi \mp \cos[\Phi \pm C_{oc} \cos\Phi] \dots]\}\}, \quad (10)$$

где $\Phi = \psi + \theta$; для рабочей точки O_3 необходимо брать четные числа k и верхние знаки « $\pm$ », « $\mp$ », а для точки O_4 — нечетные числа k и нижние знаки. Число подстановок n в правой части

формулы (10) членов $C_{oc}^{(n)}\{\cos\Phi \mp \cos[\Phi \pm C_{oc} \cos\Phi]\}$ зависит от значения параметра C_{oc} , например, при условии $C_{oc} = 0,8$ для удовлетворительной точности расчетов требуется $n \geq 20$.

Используя (2), (3), рассмотрим поведение частотного $\chi_{ш}(l_n, t)$ и амплитудного $a_{ш}(l_n, t)$ шумов при одновременном воздействии на автодинный генератор отраженного СВЧ-излучения и собственных шумов. Для этого из выражений (2), (3) вычтем их детерминированные составляющие ЧХА $\chi_n(l_n)$, АХА $a_n(l_n)$:

$$\chi_{ш}(l_n, t) = \chi_n(l_n, t) - \chi_n(l_n) = -\chi_{ш}(t) - \sin[\delta(l_n, t) + \theta] + \sin[\delta(l_n) + \theta], \quad (11)$$

$$a_{ш}(l_n, t) = a_n(l_n, t) - a_n(l_n) = a_{ш}(t) + \cos[\delta(l_n, t) - \psi] - \cos[\delta(l_n) - \psi]. \quad (12)$$

Результаты расчетов относительных уровней среднеквадратических значений частотного $q_{\chi}(l_n) = \overline{|\chi_{ш}(l_n, t)|} / \overline{|\chi_{ш0}(l_n, t)|}$

и амплитудного $q_a(l_n) = \overline{|a_{ш}(l_n, t)|} / \overline{|a_{ш0}(l_n, t)|}$ шумов в зависимости от нормированного расстояния l_n до отражающей поверхности при принятых выше значениях γ, ρ и коэффициентах в (4), (5) $L_{с-ш} = K_{с-ш} = 400$ представлены на рисунках в, г. Кривые 1 на этих графиках получены при $C_{oc} = 0,8$, а кривые 2 — при $C_{oc} = 0,08$. Здесь: $\overline{|\chi_{ш}(l_n, t)|}, \overline{|a_{ш}(l_n, t)|}$ — среднеквадратические значения соответствующих шумов при заданном параметре обратной связи C_{oc} ; $\overline{|\chi_{ш0}(l_n, t)|}, \overline{|a_{ш0}(l_n, t)|}$ — то же, но при $C_{oc} = 0$. Усреднение по времени при вычислениях в среде программирования MathCAD [9] проводили на

интервале ± 10 отсчетов мгновенных значений шума при их общем числе на каждом интервале $l_n \in (0, 1)$, равном $1 \cdot 10^5$.

Из кривых 2 для характеристик $q_{\chi}(l_n), q_a(l_n)$ (см. рисунки в, г) следует, что при слабой обратной связи зависимость уровней как амплитудных, так и частотных шумов от относительного расстояния l_n практически отсутствует и определяется аддитивными составляющими шума. Однако в случае, когда параметр $C_{oc} \sim 1$, в автодинном генераторе наблюдается периодическая нестационарность уровней шумов (см. кривые 1), выражаемая в их зависимости от расстояния до отражающей поверхности и обусловленная действием мультипликативной составляющей общего шума автодинного генератора.

Точке O_1 «крутого» перехода ЧХА $\chi_n(l_n)$ через нуль соответствует максимум частотного шума $q_{\chi}(l_n)$, а точке O_2 «полового» перехода — его минимум, лежащий несколько ниже линии (см. кривую 2) уровня шума при слабой обратной связи. Относительный уровень шума $q_{\chi}(O_{1,2})$ в этих рабочих точках можно рассчитать по формуле, полученной из (11) с учетом (9):

$$q_{\chi}(O_{1,2}) = 1 \pm C_{oc}^{(1)} \left\{ 1 \pm \dots \pm C_{oc}^{(n-2)} \left[1 \pm C_{oc}^{(n-1)} \left(1 \pm C_{oc}^{(n)} \right) \right] \right\}, \quad (13)$$

где цифра верхних индексов при C_{oc} в угловых скобках показывает порядок приближения вычислений; знаки «+» соответствуют точкам O_1 , а «−» — точкам O_2 . При этом положению максимума частотного шума по расстоянию l_n соответствуют также максимумы амплитудного $q_a(l_n)$ шума на АХА $a_n(l_n)$. Однако положения экстремальных значений уровней шума $q_a(l_n)$ на АХА $a_n(l_n)$ не совпадают с рабочими точками O_3, O_4 (см. рисунки б, г). Относительные уровни амплитудных $q_a(O_{3,4})$ шумов в этих точках можно рассчитать по формуле, полученной из (12) с учетом (10):

$$q_a(O_{3,4}) = \overline{|a_{ш}(O_{3,4}, t)|} / \overline{|a_{ш}(t)|}. \quad (14)$$

Рассмотрим процесс преобразования виброперемещений в автодинный отклик. Для этого в выражениях (2), (3), (8) сделаем подстановку: $l_n \equiv l_n(t) = l_{n0} + z(t)$, где l_{n0} — нормированное относительно $\lambda/2$ расстояние до отражающего объекта; $z(t)$ — функция виброперемещений. При слабых вибрациях полученные выражения разложим в ряды Тейлора в окрестности l_{n0} . Сохранив в этих разложениях по два первых члена, выведем формулы для расчета переменной составляющей автодинного отклика по изменению частоты $\chi_b(t)$ и амплитуды $a_b(t)$:

$$\chi_b(t) = D_{\chi}(l_{n0})z(t) = -[d_{\chi}(l_{n0})/d\delta][d\delta(l_{n0})/dl_n]z(t); \quad (15)$$

$$a_b(t) = D_a(l_{n0})z(t) = [da(l_{n0})/d\delta][d\delta(l_{n0})/dl_n]z(t), \quad (16)$$

где $D_{\chi}(l_{n0}), D_a(l_{n0})$ — дифференциальные коэффициенты преобразования виброперемещений в соответствующий отклик автодина.

Из (15), (16) можно найти среднеквадратические погрешности измерений виброперемещений при регистрации сигналов по изменению частоты $\sigma_{\chi}(l_{n0})$ и амплитуды $\sigma_a(l_{n0})$ ко-

лебаний генератора. Очевидно, что эти погрешности, если пренебречь остальными составляющими [5], определяются уровнями эффективных значений соответственно частотных $\chi_{ш.э}$ и амплитудных $a_{ш.э}$ шумов автономного генератора, а также дополнительными (мультипликативными) составляющими шума, которые учитываются коэффициентами $q_\chi(I_H)$, $q_a(I_H)$:

$$\sigma_\chi(I_{H0}) = (\chi_{ш.э} q_\chi(I_{H0})) / (\Gamma L_a D_\chi(I_{H0})); \quad (17)$$

$$\sigma_a(I_{H0}) = (a_{ш.э} q_a(I_{H0})) / (\Gamma K_a D_a(I_{H0})). \quad (18)$$

Для расчета входящих в (17), (18) флуктуационных параметров $\chi_{ш.э}$, $a_{ш.э}$ спектральное распределение внутренних источников шумов, сосредоточенных в активном элементе генератора, примем равномерным в виде «белого» шума. Учтем также статистическую независимость квадратурных составляющих $a_c(t)$, $a_o(t)$, произведение которых при усреднении равно нулю: $\overline{a_o(t)a_c(t)} = 0$, а также известные энергетические соотношения между ними:

$$\overline{[a_c(t)]^2} = \overline{[a_o(t)]^2} = (4kT_{ш}M_{ш}\Delta F)/P_0, \quad (19)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T_{ш}$ — эквивалентная шумовая температура; $M_{ш}$ — мера шума активного элемента; ΔF — полоса анализируемых частот сигнала автодина; P_0 — мощность выходных колебаний генератора.

Тогда выражения для расчета входящих в (17), (18) шумовых параметров с учетом (19) имеют вид:

$$\begin{aligned} \chi_{ш.э} &= \overline{[\chi_{ш0}(t)]^2}^{1/2} = \\ &= [2(1+\gamma^2)^{1/2}/Q_H(1-\gamma\rho)](kT_{ш}M_{ш}\Delta F/P_0)^{1/2}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} a_{ш.э} &= \overline{[a_{ш0}(t)]^2}^{1/2} = \\ &= [2(1+\rho^2)^{1/2}/\alpha_{11}(1-\gamma\rho)](kT_{ш}M_{ш}\Delta F/P_0)^{1/2}. \end{aligned} \quad (21)$$

В случае слабой обратной связи, когда $C_{oc} \ll 1$, входящие в (17), (18) коэффициенты $q_\chi(I_{H0}) = q_\chi(I_{H0}) = 1$, а $D_\chi(I_{H0})$, $D_a(I_{H0})$ во всех рабочих точках $O_1, \dots, O_4$ равны между собой: $|D_\chi(O_{1,2})| = |D_a(O_{3,4})| = 4\pi/\lambda$. При этом формулы для расчета погрешностей с учетом (20), (21) и сделанных замечаний имеют следующий вид:

$$\sigma_\chi(O_{1,2}) = \sigma_a(O_{3,4}) = \lambda/2\pi q_{с-ш}, \quad (22)$$

где $q_{с-ш} = (P_c/P_{ш})^{1/2}$ — отношение сигнал—шум; $P_c = P_0(\Gamma\eta)^2$, $P_{ш} = kT_{ш}M_{ш}\Delta F$ — мощности отраженного СВЧ-излучения и собственных шумов активного элемента генератора, соответственно.

Если обратная связь сильная и $C_{oc} \sim 1$, в рабочих точках O_1 , O_2 уровень шума значительно возрастает, поэтому имеет

смысл рассмотреть рабочие точки с четными номерами, где уровни шума не имеют такой тенденции. Частотная характеристика автодина $\chi(I_H)$ в пределе, когда $C_{oc} \rightarrow 1$, приобретает «пилообразный» вид (см. рисунок а) и в точке O_2 имеет крутизну преобразования $|D_\chi(O_2)| \approx 4/\lambda$. Амплитудная характеристика автодина $a(I_H)$ имеет наклон волн (см. рисунок б), при котором в рабочей точке O_4 крутизна преобразования $|D_a(O_4)| \in (4/\lambda, 4\pi/\lambda)$, поэтому при расчетах примем $|D_a(O_4)| \approx 8/\lambda$. Используя вместо строчных букв для обозначения погрешности измерения виброперемещений прописные буквы сигма «Σ», выражения (17), (18) с учетом сделанных замечаний примут вид:

$$\Sigma_\chi(O_2) = (\lambda/2q_{с-ш}) q_\chi(O_2); \quad (23)$$

$$\Sigma_a(O_4) = (\lambda/4q_{с-ш}) q_a(O_4). \quad (24)$$

Применив полученные результаты, найдем важный параметр для автодинных измерителей виброперемещений — их динамический диапазон. В [10] выполнен анализ нелинейных искажений автодинного датчика для случая гармонических вибраций, когда $z(t) = Z_m \sin \Omega_B t$, где Z_m , Ω_B — амплитуда и частота вибраций. Из результатов этой работы следует, что в случае слабой обратной связи диапазон амплитуд вибраций при допустимом уровне коэффициента гармоник 5 % ограничен сверху величиной $Z_m = 0,085\lambda$. При этом нижний предел определяется уровнем флуктуаций (23) измеряемых виброперемещений. Из отношений этих величин можно получить динамический диапазон:

$$d_\chi(O_{1,2}) = d_a(O_{3,4}) \approx 0,53q_{с-ш}. \quad (25)$$

Когда обратная связь сильная, диапазон амплитуд вибраций при регистрации сигнала по изменению частоты и 5 %-м допуске на нелинейные искажения составляет $Z_m = 0,165\lambda$, а при регистрации сигналов по изменению амплитуды колебаний $Z_m = 0,085\lambda$ [10]. С учетом (23), (24) выражения для расчета динамических диапазонов в рабочих точках с четными номерами имеют вид:

$$d_\chi(O_2) = 0,33q_{с-ш}/q_\chi(O_2); \quad (26)$$

$$d_a(O_4) = 0,34q_{с-ш}/q_a(O_4). \quad (27)$$

Результаты вычислений шумовых параметров автодинного генератора согласно (20), (21) при $\gamma = 1$; $\rho = -0,2$; $\alpha = 0,1$; $P_0 = 0,015$ Вт; $T_{ш} = 600$ К; $M_{ш} = 40$ дБ; $\Delta F = 10$ кГц; $Q_H = 50$ следующие: $\chi_{ш.э} = 3,5 \cdot 10^{-7}$; $a_{ш.э} = 1,26 \cdot 10^{-4}$. Применительно к модулю «Тигель-08», выполненному на планарном диоде Ганна [7], при частоте СВЧ-излучения $f_0 = 37,5$ ГГц и амплитуде колебаний $A_0 = 3$ В данные параметры обеспечивают следующие значения параметров: $\Delta f_0 = \chi_{ш.э} f_0 = 13,1 \cdot 10^3$ Гц; $\Delta A_0 = a_{ш.э} A_0 = 3,8 \cdot 10^{-4}$ В. При этом предельный энергетический потенциал автодина составляет $\Pi_{пр} = 1/(a_{ш.э})^2 = 78$ дБ.

Отношение сигнал—шум на выходе автодина изменяется при вариациях расстояния l как $q_{с-ш} = (l_{\max}/l)^2$, где $l_{\max}$ — максимальное расстояние между антенной и отражающим объектом, определяемое по уравнению радиолокации, при котором $q_{с-ш} = 1$:

$$l_{\max} = \left[\Gamma_{\text{пр}} G_A^2 \lambda^2 S_{\text{об}} / (4\pi)^3 \right]^{1/4},$$

где G_A — коэффициент усиления антенны; $S_{\text{об}}$ — эффективная отражающая поверхность объекта.

При $G_A = 200$, $S_{\text{об}} = 100 \text{ м}^2$, $\lambda = 0,008 \text{ м}$ получаем $l_{\max} = 53 \text{ м}$. В таблице представлены результаты расчетов согласно (23)—(27) с учетом (13), (14) отношения сигнал—шум $q_{\text{с-ш}}$, погрешности виброперемещений $\sigma(O_k)$ и динамического диапазона $d(O_k)$ в k -й рабочей точке ($k = 1, \dots, 4$) при различных расстояниях l до объекта для случая слабой и сильной обратной связи.

Результаты расчетов погрешности измерения и динамического диапазона автодинного измерителя виброперемещений

Характеристики	Расстояние, м				
	0,5	1	2	5	20
	Сигнал—шум $q_{\text{с-ш}}$, дБ				
	81	69	57	41	17
$\sigma(O_k)$ при $C_{\text{ос}} < 1$, мкм	0,11	0,45	1,8	11,2	180
$\Sigma_{\chi}(O_2)$ при $C_{\text{ос}} = 0,8$, мкм	0,19	0,77	3,1	19,3	309
$\Sigma_a(O_4)$ при $C_{\text{ос}} = 0,8$, мкм	0,11	0,45	1,8	11,2	180
$d(O_k)$ при $C_{\text{ос}} < 1$, дБ	75	64	52	35	11,2
$d_{\chi}(O_2)$ при $C_{\text{ос}} = 0,8$, дБ	77	65	53	37	12,6
$d_a(O_4)$ при $C_{\text{ос}} = 0,8$, дБ	75	63	51	34,5	11

Из таблицы следует, что с уменьшением расстояния между автодином и контролируемым объектом точность измерения виброперемещений и динамический диапазон значительно возрастают. При малых расстояниях до контролируемого объекта погрешность измерения виброперемещений, обусловленная собственными шумами автодинного генератора, составляет порядка десятых долей микрометра. Результаты расчетов находятся в качественном соответствии с экспериментальными данными, представленными в работах [5, 11, 12].

В результате выполненных исследований шумовых характеристик автодинов установлено, что в случае слабой обратной связи автодинной системы «генератор — отражающий объект» зависимость уровня как частотных, так и амплитудных шумов от расстояния до отражающего объекта практически отсутствует. Однако при сильной обратной связи в автодинном генераторе наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения, нестационарность уровней шумов. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к ситуации со слабой обратной связью могут заметно снижаться (почти в 2 раза), а в других — значительно возрастать (в несколько раз), причем увеличению уровня шума соответствуют более крутые участ-

ки частотной характеристики автодина, а его уменьшению — более пологие.

Таким образом, при работе автодинных измерителей вибраций и малых перемещений в условиях сильной обратной связи при обработке выходных сигналов необходимо учитывать появление не только специфических искажений сигналов, но и зависимость уровня шума автодина от выбранной рабочей точки. При правильном выборе этой точки можно получить существенный выигрыш в точности и динамическом диапазоне. Особый интерес представляют рабочие точки с пониженной крутизной автодинной характеристики, обеспечивающей более высокую линейность преобразования и меньший уровень шумов.

Закключение. Использование в автодинных измерителях вибраций СВЧ генераторов, стабилизированных посредством внешнего высокочастотного резонатора, перспективно. По сравнению с обычными стабилизированными автодинами из-за значительно меньшей девиации частоты обеспечивается улучшение формы сигнальных характеристик при тех же уровнях отраженного излучения. Кроме того, их известное достоинство — пониженный уровень частотного шума — способствует исключению периодической нестационарности уровня шумов, что важно для улучшения качественных показателей автодинных измерителей и расширения области их применения.

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. **Pat. 005479826A US.** Microwave system for monitoring turbine blade vibration / M. Twerdochlib e. a. // 1996. N. 2.
3. **Pat. 2207523 РФ.** Способ определения параметров колебаний лопаток вращающегося колеса турбомшины и устройство для его осуществления / А. И. Данилин, А. Ж. Чернявский // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 18.
4. **Pat. 2374559 РФ.** Способ контроля режима тепловой энергетической установки и датчик для его осуществления / В. В. Болознев и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 33.
5. **Носков В. Я.** Анализ автодинного СВЧ датчика для бесконтактного измерения и контроля размеров изделий // Измерительная техника. 1992. № 3. С. 24—26; **Noskov V. Ya.** Analysis of an autodyne UHF transducer for noncontact measurement and control of the dimensions of components // Measurement Techniques. 1992. V. 35. N. 3. P. 297—301.
6. **Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В.** Физика радиоволновых и оптических автодинов. Саратов: изд-во СГУ, 2003.
7. **Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М.** Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24—42.
8. **Носков В. Я., Игнатков К. А.** Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи // Изв. высших учебн. заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 12. С. 112—124.
9. **Кирьянов Д. В.** Mathcad 14. СПб.: БХР-Петербург. 2007.