

**ФАЗОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ
С РАСШИРЕННЫМ ЧАСТОТНЫМ ДИАПАЗОНОМ**

И.А.Брагинец, канд.техн.наук, **Е.А.Зайцев**, канд.техн.наук, **А.Г.Кононенко**, канд.техн.наук,
Ю.А.Масюренко, канд.техн.наук, **А.Д.Ниженский**, докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: masjuriv@ied.org.ua

Рассмотрена возможность расширения частотного диапазона фазовых лазерных измерителей параметров вибраций путем использования в последних цифровых синтезаторов частоты в качестве генераторов напряжения модуляции светового излучения лазера. Предложена и описана структурная схема такого прибора, проведена оценка максимального значения частоты исследуемых вибраций. Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: лазер, синтезатор частоты, фазовая модуляция, частотный спектр.

Контроль параметров объектов, которые испытывают воздействие вибрационных нагрузок, по-прежнему остается актуальной задачей. При определении параметров вибраций целого ряда объектов (детали различных механизмов и машин, корпуса ракет и самолетов, вращающиеся или нагретые до высокой температуры механические объекты и др.) возникает необходимость в бесконтактных измерителях вибраций. Предполагается, что такие приборы должны измерять параметры вибраций на расстоянии в несколько метров до контролируемого объекта без установки на него дополнительных устройств или нанесения отражающих покрытий, штрихов и растров. В этом случае с расширением круга контролируемых объектов одновременно повышаются требования к метрологическим характеристикам приборов, предназначенных для бесконтактного измерения амплитуды и частоты вибраций.

Среди бесконтактных измерителей вибраций (оптических, ультразвуковых, вихретоковых и др.) заметное место занимают оптические измерители, действие которых основано на эффекте Доплера [7]. Такие приборы, содержащие полупроводниковый лазерный излучатель, обеспечивают достаточно широкий диапазон измеряемых амплитуд вибраций (от 1 мкм до 1...2 см). Однако максимальное расстояние до контролируемого объекта в этом случае ограничено и составляет всего несколько сантиметров. К их недостаткам можно отнести также достаточно дорогостоящую и сложную оптическую часть прибора. Применение таких приборов затруднено, если исследуемые колебания имеют сложную форму и относительно большую амплитуду; жесткие требования предъявляются к пространственной и временной когерентности лазерного источника излучения. По указанным причинам нами было обращено внимание на разработку лазерных измерителей перемещений и вибраций, основанных на фазовом методе измерения расстояния [4]. В таких устройствах вибрации исследуемой поверхности приводят к фазовой модуляции высокочастотной огибающей принимаемого оптического сигнала. Использование алгоритма преобразования Гильберта, что практически реализуется в структуре оптимального фазометра [5], позволяет в этом случае выделить фазовую модуляцию исследуемого сигнала и существенно уменьшить влияние "паразитной" амплитудной модуляции. Основные преимущества таких приборов по сравнению с указанными выше заключаются в следующем: расстояние до контролируемого объекта может достигать десятки метров; работа прибора осуществляется с диффузно-отражающими объектами; приборы обладают высокой помехоустойчивостью при наличии промышленных электромагнитных полей и радиационного излучения.

Проведенные нами ранее исследования были направлены на повышение разрешающей способности фазовых лазерных измерителей перемещений и вибраций [2]. Другой важной характеристикой указанных приборов является частотный диапазон измеряемых вибраций, который в разработанных устройствах [1] составляет 15...1000 Гц. Однако в целом ряде применений прибора значение максимальной измеряемой частоты вибраций недостаточно. Поэтому целью данной работы является проведение дополнительных исследований по расширению частотного диапазона фазовых лазерных измерителей параметров вибраций.

В лазерных измерителях параметров вибраций [1, 2] реализуется фазовый метод измерения расстояния с преобразованием частоты отраженного сигнала. Для определения фазового сдвига сиг-

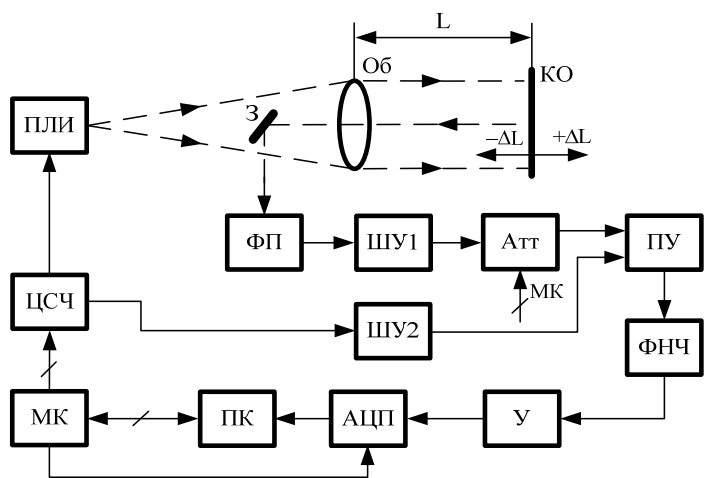
нала промежуточной частоты, пропорционального измеряемому расстоянию, используется алгоритм преобразования Гильберта. Последний осуществляется с помощью коммутируемых RC -цепочек, вносящих фазовый сдвиг $\pm 45^\circ$ с последующим синхронным детектированием исследуемого сигнала и измерением значений его квадратурных составляющих. Применение в структуре фазовых лазерных измерителей вибраций в качестве генератора напряжения частоты модуляции оптического излучения современных цифровых синтезаторов частоты, в которых предусмотрено формирование двух выходных сигналов с достаточно простой и точной установкой требуемого фазового сдвига между ними [8], значительно упрощает схемотехническую реализацию прибора. В этом случае отсутствие необходимости в преобразовании частоты и измерении фазового сдвига на промежуточной частоте позволяет уменьшить постоянную времени фильтра нижних частот, включенного на выходе синхронного детектора, что дает возможность измерения фазового сдвига с высоким быстродействием. Это обстоятельство, как будет показано ниже, позволяет увеличить значение максимальной частоты измеряемых вибраций. Кроме того, возможность изменения фазового сдвига опорного напряжения (что осуществляется относительно просто и с высоким быстродействием) исключает необходимость применения в схеме прибора управляемого цифрового фазовращателя [1, 2], что также упрощает его реализацию и уменьшает время измерения.

На рисунке показана структурная схема такого устройства, где приняты следующие условные обозначения: ЦСЧ – цифровой синтезатор частоты; ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель; Об – объектив; КО – контролируемый объект; З – зеркало; ФП – фотоприемник; ШУ1 и ШУ2 – широкополосные усилители; Атт – автоматический аттенюатор; ПУ – перемножающее устройство; ФНЧ – фильтр нижних частот; У – усилитель; К – коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь напряжения; БУ – блок управления; МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер.

Работа схемы осуществляется в три этапа. Вначале происходит установка аттенюатора Атт в положение, при котором амплитуда выходного сигнала ШУ1 приводится к номинальному значению. На втором этапе работы в процессе изменения фазового сдвига опорного напряжения устанавливается минимальное значение выходного напряжения перемножающего устройства ПУ. И, наконец, на третьем

этапе с помощью АЦП производятся выборки исследуемого сигнала и передача их значений в ПК для оценки частотного спектра вибраций контролируемого объекта.

Рассмотрим преобразовательные процессы в схеме более детально. Гармонически модулированное по интенсивности оптическое излучение от ПЛИ через объектив Об направляется на контролируемый объект КО, расположенный на заданном расстоянии L . При этом напряжение частоты модуляции подается в ПЛИ с одного из выходов цифрового синтезатора частоты ЦСЧ. Отраженный от КО оптический сигнал с помощью зеркала З направляется на фотоприемник ФП. Выходной электрический сигнал ФП подается на вход широкополосного усилителя ШУ1. Тогда выходное



напряжение последнего определяется выражением

$$u_1 = U_{1m} \sin(2\pi f_x + \varphi_x), \quad (1)$$

где U_{1m} – амплитуда напряжения; f_x – частота модуляции лазерного излучения; φ_x – фазовый сдвиг между излучаемым и принимаемым световыми сигналами, пропорциональный расстоянию до контролируемого объекта.

Со второго выхода ЦСЧ на вход широкополосного усилителя ШУ2 поступает гармоническое напряжение, частота которого выбирается также равной f_x . Выходное напряжение ШУ2, используемое в предлагаемом устройстве в качестве опорного, равно $u_2 = U_{2m} \sin 2\pi f_x$, где U_{2m} – амплитуда опорного напряжения.

На первом этапе работы устройства устанавливается в заданное положение автоматический аттенюатор Атт, на вход которого подается напряжение u_1 . При этом выходное напряжение Атт можно представить как $u_3 = \kappa_{Атт} u_1$, где $\kappa_{Атт}$ – коэффициент передачи аттенюатора. Сигналы u_3 и u_2 воздействуют на входы перемножителя П, выходное напряжение которого в этом случае определяется выражением

$$u_{n1} = \kappa_n u_3 u_2, \quad (2)$$

где κ_n – коэффициент преобразования перемножителя, его размерность 1/В.

Первоначально Атт устанавливается в положение, при котором $\kappa_{Атт}$ имеет минимальное значение. Из выходного напряжения перемножителя u_{n1} с помощью фильтра нижних частот ФНЧ выделяется его низкочастотная составляющая [3]

$$U'_{n1} = 0,5 \kappa_{Атт} \kappa_n U_{1m} U_{2m} \cos \varphi_x. \quad (3)$$

Далее по команде, поступающей от микроконтроллера МК на управляющий вход АЦП, напряжение (3) с помощью АЦП преобразуется в цифровой код, численное значение которого передается в память ПК. Затем по сигналу МК путем перестройки ЦСЧ изменяется на 90^0 фаза опорного сигнала u_2 . Тогда выражение для опорного напряжения будет иметь вид $u'_2 = U_{2m} \sin(2\pi f_x + 90^0)$. Выходное напряжение перемножителя П в этом случае

$$u'_{n1} = \kappa_n u_3 u'_2, \quad (4)$$

а низкочастотная составляющая на выходе ФНЧ

$$U''_{n1} = 0,5 \kappa_{Атт} \kappa_n U_{1m} U_{2m} \sin \varphi_x. \quad (5)$$

Составляющая напряжения (5) по аналогии с напряжением (3) преобразуется в цифровой код, численное значение которого также передается в ПК. По данным измерения U_{n1} и U'_{n1} компьютером вычисляется напряжение в соответствии с формулой

$$U_{n1} = \sqrt{(U'_{n1})^2 + (U''_{n1})^2} = 0,5 \kappa_{Атт} \kappa_n U_{1m} U_{2m} = \beta \kappa_{Атт} U_{1m}, \quad (6)$$

где β – постоянная величина, $\beta = 0,5 \kappa_n U_{2m}$.

Из последней зависимости видно, что, перестраивая по результатам измерения U_{n1} коэффициент передачи аттенюатора $\kappa_{Атт}$, можно установить его номинальное значение $U_{n1ном}$. Это является важным обстоятельством для обеспечения заданной точности измерения параметров вибрации при разных базовых расстояниях до контролируемого объекта. На данном этапе на основании измеренных значений U'_{n1} и U''_{n1} вычисляется также значение фазового сдвига исследуемого сигнала

$$\varphi_x = \arctg(U''_{n1}/U'_{n1}). \quad (7)$$

Как указывалось, на втором этапе работы устройства устанавливается минимальное значение напряжения на выходе ФНЧ. Это имеет место, если опорное напряжение формируется в ЦСЧ в соответствии с выражением

$$u'_2 = U_{2m} \sin(2\pi f_x + 90^0 + \varphi_{on}), \quad (8)$$

где $(90^0 + \varphi_{on})$ – фазовый сдвиг, вносимый в опорное напряжение, причем φ_{on} выбирается равным φ_x , вычисленному в соответствии с (7). В этом случае выходное напряжение U_{n2} фильтра нижних частот ФНЧ будет удовлетворять неравенству $U_{n2} \square U_{n1}$.

На третьем, последнем, этапе работы устройства осуществляется непосредственная оценка параметров вибраций. Поскольку $\Delta L \square L$, где ΔL – приращение расстояния, вызванное вибрациями КО, то амплитуда исследуемых вибраций $U_{виб} \square U_{n1}$. Выходное напряжение ФНЧ в этом случае может быть представлено в виде

$$U_{n3} = \beta \kappa_{Атт} U_{m1} \sin(\omega_{виб} t + \Delta \varphi_{виб}), \quad (9)$$

где $\omega_{виб}$ – угловая частота вибраций; $\Delta \varphi_{виб}$ – начальная фаза исследуемых вибраций.

Таким образом, определив частотный спектр сигнала U_{n3} , можно оценить параметры вибраций (амплитуду и частоту) контролируемого объекта.

Для определения частотного спектра сигнала U_{n3} , усиленного с помощью усилителя У, используем метод дискретного преобразования Фурье, как это описано в [2]. Дискретизация сигнала U_{n3} с заданными частотой выборок и длительностью реализации осуществляется АЦП, подключенным к выходу усилителя У. Оценим численное значение текущей выборки на выходе АЦП.

Как указывалось выше, в результате перестройки аттенюатора устанавливается равенство $U_{n1} = U_{n1ном}$. Тогда, приняв во внимание (9), нетрудно показать, что выборки исследуемого сигнала на выходе АЦП соответствуют выражению

$$N_e = \kappa_y \beta \kappa_{Аттн} \frac{U_{виб}}{U_{n1ном}} N_{ном} \sin(\omega_{виб} \frac{i}{f_\delta} + \Delta\varphi_{виб}), \quad (10)$$

где κ_y – коэффициент усиления усилителя У; $N_{ном}$ – численное значение кода на выходе АЦП, соответствующее преобразованному напряжению U_{n1} ; f_δ – частота дискретизации входного сигнала АЦП; i – целое число от 1 до i_m , причем $i_m = T_0 f_\delta$, где T_0 – длительность реализации.

Выборки N_e по сигналу, поступающему от микроконтроллера МК, переносятся в LPT-порт ПК. В компьютере файл данных, сформированный с помощью программного пакета VISUAL BASIC, используется для вычислительной обработки и оценки спектра исследуемых вибраций, как это описано в [2].

Частотный диапазон исследуемых вибраций зависит от частоты выборок исследуемого сигнала на выходе усилителя У. Граничная частота вибраций $f_{виб}$ определяется в соответствии с условием [6]

$$T_\delta \leq 1/2 f_{виб}, \quad (11)$$

где T_δ – период дискретизации сигнала.

Для определения максимально возможного значения частоты исследуемых вибраций оценим допустимое значение частоты дискретизации сигнала. Последнее оценивается из условия

$$f_\delta \leq 1/(T_{дин} + T_n), \quad (12)$$

где $T_{дин}$ – интервал времени, по истечении которого динамическая погрешность, обусловленная преобразовательными процессами в цифровом синтезаторе частоты, достаточно мала, $T_{дин} \geq 10$ мкс; T_n – длительность выполнения программы (осуществление выборок мгновенных значений исследуемого сигнала, преобразование их в цифровую форму, обработка данных), $T_n \approx 10 \dots 20$ мкс. Тогда на основании (12) $f_\delta = 33 \dots 50$ кГц, а максимально возможная частота исследуемых вибраций в предлагаемом устройстве в соответствии с (11) составляет $16,5 \dots 25$ кГц. В разработанном нами ранее устройстве [1] обеспечивалось измерение частоты вибраций с максимальным значением, равным $1,0$ кГц.

Выводы. Применение предложений авторов, основанных на использовании технических возможностей современных цифровых синтезаторов частоты в сочетании с методом обработки сигналов на основании преобразования Гилберта и рассмотренных алгоритмов функционирования и структурной схемы устройства, позволяет по сравнению с ранее достигнутыми результатами существенно увеличить максимальное значение частоты исследуемых вибраций. Кроме того, возможность установки заданных фазовых углов выходных сигналов синтезатора частоты повышает быстрдействие систем управления автоматическим аттенюатором и фазовращателем при одновременном упрощении схемотехнической реализации прибора.

1. Брагинец И.А., Зайцев Е.А. Лазерные фазовые датчики вибраций и перемещений в диапазоне частот от 15 до 1000 Гц // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч. 2. – С. 186–191.

2. Брагинец И.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Лазерный измеритель низкочастотных вибраций // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 5. – С. 74–76.

3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для ВУЗов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.

4. Кононенко А.Г., Кромплас Б.А., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Орнатский И.А., Сидорчук В.Е. Высокоточный фазовый лазерный измеритель расстояний до диффузно-отражающих поверхностей // Техн. електродинаміка. – 1999. – № 3. – С. 66–70.

5. Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Орнатский И.А., Сидорчук В.Е. Оптимальный преобразователь фаза-код для высокоточных фазовых светодальномеров // Техническая електродинаміка. – 1996. – № 1. – С. 61–64.

6. *Орнатский П.П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1976. – 432 с.

7. *Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара.* Справочник. В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – 439 с.

8. *AD9852 300 MHz Complete DDS synthesizer Reference Manual* [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/ad9852/products/product.html>. – Data of access: 01.12.11. – Title from the screen.

УДК 621.317

ФАЗОВИЙ ЛАЗЕРНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙ З РОЗШИРЕНИМ ЧАСТОТНИМ ДІАПАЗОНОМ

І.О.Брагинець, канд.техн.наук, **Є.О.Зайцев**, канд.техн.наук, **О.Г.Кононенко**, канд.техн.наук,
Ю.О.Масюренко, канд.техн.наук, **А.Д.Ніженський**, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: masjuriv@ied.org.ua

Розглянуто можливість розширення частотного діапазону фазових лазерних вимірювачів параметрів вібрацій шляхом використання в останніх цифрових синтезаторів частоти як генераторів напруги модуляції світлового випромінювання лазера. Запропоновано і описано структурну схему такого приладу, проведено оцінку максимального значення частоти досліджуваних вібрацій. Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова: лазер, синтезатор частоти, фазова модуляція, частотний спектр.

THE PHASE LASER MEASURER OF VIBRATIONS PARAMETERS WITH AN EXTENDED FREQUENCY RANGE

I.O. Bragynets, E.O.Zaitsev, O.G.Kononenko, Yu.O.Masiurenko, A.D.Nizhenskyi,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: masjuriv@ied.org.ua

The possibility of expanding the frequency range of the phase laser measurers of vibration parameters by using in them the digital frequency synthesizers as the generator of voltage modulation of the laser light is considered. The block diagram of such device is proposed and described, the estimation of the maximum frequency of investigating vibration is made. References 8, figure 1.

Key words: laser, frequency synthesizer, phase modulation, frequency spectrum.

1. *Braginets I.A., Zaitsev E.A.* Laser phase sensors of vibration and displacement in the frequency range from 15 to 1000 Hz // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2010. – Vol. 2. – Pp. 186–191. (Rus)

2. *Braginets I.A., Kononenko A.G., Masiurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D.* Laser meter of low frequency vibrations // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2006. – № 5. – Pp. 74–76. (Rus)

3. *Gonorovskii I.S.* Radio circuits and signals: Textbook for High Schools. – It is a 3rd edition recasted and added. – Moskva: Sovetskoe radio, 1977. – 608 p. (Rus)

4. *Kononenko A.G., Kromplias B.A., Masiurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D., Ornatskii I.A., Sidorchuk V.E.* High-precision phase laser distance meter to the diffusely reflecting surfaces // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 1999. – № 3. – Pp. 66–70. (Rus)

5. *Kononenko A.G., Masiurenko Yu.A., Nizhenskyi A.D., Ornatskii I.A., Sidorchuk V.E.* The optimum phase-code converter for high-precision phase light range finder // *Tekhnicheskaiya elektrodynamika*. – 1996. – № 1. – Pp. 61–64. (Rus)

6. *Ornatskii P.P.* Theoretical foundations of information and measurement technique. – Kiev: Vyshcha shkola, 1976. – 432 p. (Rus)

7. *Devices and systems for the measurement of vibration, noise and shock.* Directory. In 2 books. Book 2 / By edition V.V. Kliueva. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 439 p. (Rus)

8. *AD9852 300 MHz Complete DDS synthesizer Reference Manual* [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/ad9852/products/product.html>. – Data of access: 01.12.11. – Title from the screen.

Надійшла 25.06.2012

Received 25.06.2012