

DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-81-94
УДК 621.396: 621.317.75:621.372.8

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ВИБРАЦИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛЮСНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

А. Ю. Николаенко¹, А. А. Львов², П. А. Львов³, О. М. Глухова²

¹ *Филиал научно-производственного центра автоматизации и приборостроения имени академика Н. А. Пилюгина ПО «Корпус», Саратов, Российская Федерация*

² *Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Российская Федерация*

³ *Энгельское опытно-конструкторское бюро «Сигнал» имени А. И. Глухарева, Энгельс, Саратовская область, Российская Федерация*

Описаны преимущества и недостатки подхода к измерению параметров вибраций с помощью контактных датчиков, т. е. датчиков, имеющих механическую связь с исследуемым объектом. Проведен анализ существующих бесконтактных методов измерения: ультразвуковых, радиоволновых и оптических. Описан принцип действия бесконтактного радиоволнового измерителя перемещения на основе классического многополосного рефлектометра. Предложен новый бесконтактный способ измерения перемещения объекта, основанный на применении многополосного рефлектометра с прямым понижением частоты. Приведена схема данного измерителя и его основные уравнения. Обсуждаются преимущества предлагаемой схемы измерения. Разработан оптимальный статистический алгоритм измерения перемещения зондируемой поверхности, который заключается в оптимальной обработке сигналов блока понижения частоты по методу максимального правдоподобия. Предлагаемая схема измерения в совокупности с разработанным оптимальным алгоритмом обработки информации позволяют создать относительно недорогой и высокоточный измеритель перемещения и параметров вибрации, способный измерять координаты исследуемого объекта с большим многообразием форм и материалов с точностью до 0,01 мм и работать в условиях отсутствия или плохой оптической видимости и высоких температур. Проведенное моделирование работы измерителя подтвердило сделанные теоретические выводы.

Ключевые слова: бесконтактный измеритель, линейное перемещение, вибрация, многополосный рефлектометр, прямое понижение частоты, метод максимального правдоподобия.

Для цитирования: *Николаенко А. Ю., Львов А. А., Львов П. А., Глухова О. М.* Разработка аппаратного и программного обеспечения бесконтактного измерителя линейных перемещений и вибраций на основе многополосного рефлектометра // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 81–94. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-81-94.

Введение

Непрерывный контроль параметров технологических процессов и состояния оборудования является одним из главных требований современного производства. Подобный контроль необходим в самых разных областях: в машиностроении (вибрация станков и биение деталей), в автомобильной промышленности (контроль вибрации отдельных узлов автомобилей и всего автомобиля в целом), на железнодорожном транспорте (датчики приближения поезда), в энергетике (контроль вибрации лопаток газовых турбин), в авиастроении (контроль биений турбин) и т. д. Поэтому проблема разработки высокоточных измерителей для контроля таких механических параметров работы динамических объектов, как вибрации, ускорения, скорости, линейные перемещения, а также контроля изменения их состояния в процессе эксплуатации представляется очень актуальной.

Измерители, имеющие механическую связь с объектом [1], подвержены механическим, температурным и другим негативным воздействиям, что приводит к их сбоям и отказам. Кроме того, контактный датчик искажает истинную картину вибраций объекта, поскольку обладает собственным весом, поэтому желательно, чтобы измеритель имел бесконтактный принцип работы, высокую точность, простую конструкцию и сравнительно низкую стоимость. В настоящей статье проведен краткий анализ существующих бесконтактных методов измерения линейных

перемещений и предложен новый радиоволновой измеритель линейных перемещений и вибраций, основанный на многополюсном рефлектометре с блоком понижения частоты, сочетающий преимущества существующих методов и лишенный их основных недостатков.

Бесконтактное измерение линейных перемещений

Механическая связь датчика с исследуемым объектом далеко не всегда допустима и вызывает ряд сложностей, поэтому большое внимание уделяется разработке бесконтактных методов измерения, принцип измерения которых состоит в дистанционном зондировании перемещаемой поверхности (ПП) с помощью источника излучения и измерении характеристик отраженного сигнала [2]. Такой характеристикой может быть фаза. В этом случае выражение, связывающее координату ПП и фазу отраженного сигнала, имеет следующий вид:

$$d_k = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_k, \quad k = \overline{1, K},$$

где λ – длина волны сигнала генератора; d_k, φ_k – координата ПП и фаза отраженного сигнала в k -м измерении соответственно; K – количество измерений.

Существующие бесконтактные методы измерения

Метод ультразвуковой фазометрии [3] заключается в измерении текущего значения разности фаз опорного сигнала ультразвуковой частоты и сигнала, отраженного от исследуемого объекта. В качестве чувствительных элементов используется пьезоэлектрическая керамика. К достоинствам метода можно отнести низкую стоимость аппаратуры, малое время измерения и высокую точность измерения низкочастотных вибраций. Однако применение ультразвуковых методов измерения ограничивается невысокой разрешающей способностью, зависимостью от состояния атмосферы и уменьшением точности с ростом частоты вибрации.

Оптические и радиоволновые методы среди других бесконтактных методов измерения, таких как емкостные, индуктивные, ультразвуковые и т. п., обладают более высокой точностью, объективностью и производительностью. При этом наибольшую точность обеспечивают оптические измерители. Однако данные устройства отличаются высокой стоимостью, т. к. их оптические компоненты и аналоговые блоки обработки сигналов очень сложны. Кроме того, оптические методы предъявляют высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта и состоянию окружающей среды [4] (определенная влажность, отсутствие запыленности, задымленности и пр.).

Радиоволновые методы допускают бесконтактное измерение не только вибраций, но и перемещений, а также линейной скорости объектов. Данные методы обеспечивают работу на дистанциях до нескольких метров, в условиях отсутствия или плохой оптической видимости, высоких температур и для объектов с большим многообразием форм и материалов поверхностей. Применение радиоволновых методов делает возможным измерение вибраций и других параметров динамических узлов без нарушения конструкции или герметичности корпусов приборов [5].

Ввиду указанных преимуществ наибольший интерес из всех описанных бесконтактных методов измерения представляют именно радиоволновые методы, работа которых основана на получении информации о параметрах радиосигнала, отраженного от исследуемого объекта. Следует отметить, что более сорока лет назад Г. Энгеном и К. Хоером был предложен очень перспективный метод измерения параметров СВЧ сигналов, названный авторами методом многополюсного рефлектометра (МР) [6]. Вся обработка информации в измерителях на основе метода МР производится в цифровой форме в ЭВМ, поэтому теоретически данные измерители недорогие. Однако метод МР обладал существенными недостатками: плохой устойчивостью решений получающихся квадратичных уравнений МР, приводящей к значительным ошибкам измерения, и сложностью точной калибровки многополюсника, для которой необходимо не менее 4-х прецизионных калибровочных нагрузок. Устойчивости решений стали добиваться, создавая сложные топологии МР, содержащие гибридные ответвители, фазовращатели, линии задержки и пр., что привело к удорожанию многополюсников [7]. Решить проблему точной калибровки смогли исключительно за счет использования сверхвысокоточных эталонов отражения, доступных только в институтах стандартов развитых стран [8], поэтому стоимость подобных измерителей была выше, чем у серийно выпускаемых анализаторов СВЧ цепей [9].

В работах [2, 10, 11] описаны результаты применения МР для измерения малых скоростей движущихся объектов с помощью доплеровского радара, измерения угла прихода радиолокационного сигнала и в качестве волнового коррелятора в системах для измерения перемещения объектов и радиолокации с фазированной антенной решеткой. Однако данные попытки практического использования метода МР нельзя считать вполне удачными ввиду низкой точности измерений. Основными источниками ошибок являются низкая точность калибровки многополюсника и алгоритмов обработки информации с датчиков МР.

В работе [12] описан датчик положения и линейных перемещений на основе двенадцати-полюсного рефлектометра (ДПР). Авторами отмечено, что точность измерения фазы напрямую зависит от точности измерения мощности с 4-х измерительных портов ДПР. Их главные усилия направлены на улучшение аппаратуры самой установки: точное проектирование компонентов, помехоизолирующие корпуса, оптоволоконная связь между блоками, малошумные усилители, экранированные АЦП и ЦАП. Однако авторами получены плохие результаты по точности измерения, несмотря на калибровку многополюсника с помощью калибровочного эталона – высокоточного подвижного короткозамыкателя. Низкая точность обусловлена неудачно выбранным алгоритмом обработки информации. Вместе с тем в состав измерительной системы входит специальное оборудование, требующее точной настройки.

В работах [13, 14] предлагается бесконтактный способ измерения расстояния до плоской поверхности на основе комбинированного многополюсного рефлектометра (КМР). Комбинированный многополюсный рефлектометр представляет собой комбинацию классических методов: МР и многозондовой измерительной линии (МИЛ), анализ которых представлен в работе [15]. Авторы показали, что такой КМР может быть точно откалиброван по набору нагрузок с неизвестными параметрами. Кроме того, возможно совмещение процессов измерения и калибровки. Структурная схема измерителя на основе КМР показана на рис. 1.

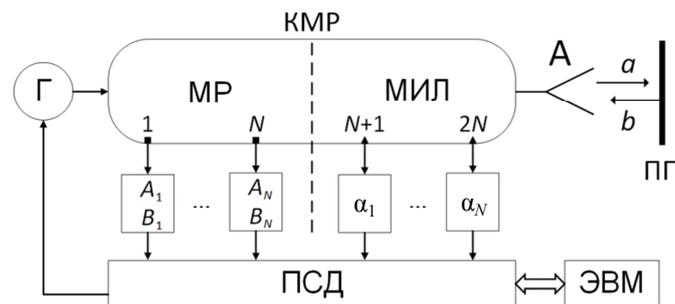


Рис. 1. Структурная схема измерителя линейных перемещений и вибраций на основе КМР:
 Г – генератор зондирующего СВЧ сигнала; МР – многополюсный рефлектометр;
 МИЛ – многозондовая измерительная линия; ПП – перемещаемая поверхность;
 a, b – зондирующий и отраженный от ПП сигналы соответственно; А – антенна;
 1, ..., N – номера датчиков МР; N + 1, ..., 2N – номера зондов МИЛ;
 A_i, B_i – комплексные коэффициенты передачи i -го датчика МР ($i = 1, \dots, N$)
 для падающей и отраженной волн соответственно;
 $\alpha_1, \dots, \alpha_N$ – коэффициенты передачи детекторов зондов МИЛ;
 ПСД – плата сбора данных

Основная идея метода МР заключается в измерении амплитуд сигналов на выходах измерительной цепи с помощью амплитудных детекторов. В качестве СВЧ детекторов могут быть использованы датчики мощности, имеющие в широком динамическом диапазоне характеристики, очень близкие к квадратичным: болометры, термисторы или диодные детекторы.

Поскольку на выходах портов МР измеряются мощности, система уравнений МР является нелинейной [16]:

$$P_i = |A_i a + B_i b|^2 \quad i = 1, \dots, N,$$

где A_i и B_i – комплексные константы, характеризующие данный МР (определяются в процессе калибровки); P_i – отклик детектора, пропорциональный мощности сигнала; a , b – комплексные амплитуды падающей на исследуемую поверхность и отраженной от нее волн соответственно.

В работах [13, 14] описаны алгоритмы калибровки КМР и измерения с его помощью расстояния до зондируемой поверхности. Точность измерения координаты исследуемой поверхности составляет 0,01 мм. Работа устройства возможна в условиях воздействия на исследуемый объект высоких температур. Предлагаемое решение позволяет использовать максимально простые конструкции многополосников и не требует высокоточных стандартов для калибровки рефлектометра.

Тем не менее ошибки измерения комплексных амплитуд откликов измерительных плеч МР P_i влияют на стабильность получаемого решения, поэтому разработчики измерителей на основе метода МР стремятся увеличить отношение сигнал/шум на входе ПСД, для чего устанавливается большая мощность генератора. Однако в этом случае не всегда соблюдается условие квадратичности характеристик детекторов мощности.

Предлагаемое решение

Наибольший интерес среди рассмотренных радиоволновых бесконтактных измерителей представляет устройство, описанное в работах [13, 14]. Однако, как уже отмечалось ранее, в измерителях на основе МР отношение сигнал/шум на выходах измерительных плеч ограничено, поскольку основной постулат метода о квадратичности характеристик используемых СВЧ детекторов выполняется только при низком уровне сигнала генератора (мощность зондирующего сигнала – порядка нескольких милливатт), а случайные ошибки измерения существенно влияют на стабильность решения нелинейной системы уравнений МР. Данные недостатки затрудняют создание на основе метода МР высокоточных измерителей линейных перемещений, поэтому необходимо предложить такое устройство для измерения фазы отраженного сигнала, которое, с одной стороны, было бы лишено недостатков традиционного метода МР, а с другой – сочетало в себе низкую стоимость, простоту конструкции и высокую точность измерений.

Мы предлагаем бесконтактный измеритель линейных перемещений и вибраций на основе МР с прямым понижением частоты измерения, структурная схема которого представлена на рис. 2.

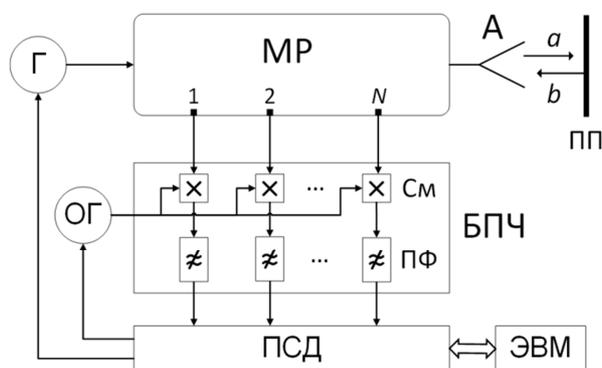


Рис. 2. Структурная схема измерителя линейных перемещений и вибраций на основе многополосного рефлектометра с понижением частоты измерения:

Г – генератор зондирующего СВЧ сигнала; МР – многополосный рефлектометр;
 ПП – перемещаемая поверхность; a , b – зондирующий и отраженный от ПП сигналы соответственно;
 А – антенна; N – количество датчиков МР; ОГ – опорный генератор;
 См – смеситель; ПФ – полосовой фильтр; БПЧ – блок понижения частоты;
 ПСД – плата сбора данных

В предлагаемом устройстве выходы измерительных плеч МР подключены не к измерителям мощности, а к смесителям БПЧ. После понижения частоты аналоговые сигналы, пропорциональные откликам измерительных плеч МР, преобразуются в цифровую форму и вводятся в память компьютера. Вся последующая обработка данных производится в цифровой форме с использованием соответствующего математического обеспечения.

Предлагаемый измеритель обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным методом МР. Так, применение БПЧ вместо детекторов мощности позволяет, с одной стороны, получить линейную систему уравнений относительно неизвестных и, как следствие, избежать потерь в точности, обусловленных неоптимальной обработкой данных, а с другой – максимально повысить мощность генератора зондирующего сигнала, что приведет к увеличению отношения сигнал/шум измерительных каналов. Сам БПЧ основан на схеме прямого преобразования и содержит только смесители и полосовые фильтры. Причем измерительные каналы, состоящие из датчика, смесителя и полосового фильтра, не должны иметь идентичные характеристики. Увеличенное число измерительных каналов позволяет реализовать оптимальные алгоритмы обработки информации.

Алгоритм измерения фазы отраженного сигнала

Бесконтактное измерение перемещения объекта предполагает зондирование его поверхности радиосигналом и измерение фазы отраженного сигнала. Смещение ПП вызывает изменение картины стоячей волны в СВЧ тракте и сигналов, снимаемых с БПЧ. Мгновенные значения напряжений на выходе БПЧ пропорциональны интенсивности суперпозиции зондирующего и отраженного сигналов и подвергаются воздействию тепловых шумов. Именно по изменению фазы отраженного сигнала судят о перемещении объекта. Поэтому для предлагаемого измерителя необходимо разработать алгоритм измерения фазы отраженного сигнала.

Предлагаемый алгоритм заключается в нахождении оценки неизвестной фазы отраженного от ПП сигнала по цифровым отсчетам измеренных напряжений ϑ_{jk} на выходе ПСД и состоит в следующем.

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, действительный сигнал на выходе j -го смесителя БПЧ имеет следующий вид:

$$v_j = \frac{1}{2} U_j \{ \cos(vt + \phi_j) + \cos[(2\omega - v)t + \phi_j] \} + c_j, \quad j = \overline{1, N_j},$$

где U_j , ϕ_j – неизвестные амплитуда и фаза СВЧ-сигнала в j -м измерительном плече МР соответственно; c_j – неизвестное смещение постоянной составляющей сигнала, обусловленное прямым понижением частоты СВЧ сигнала; ω – известная круговая частота СВЧ сигнала; v – известная разность между частотами основного (Г) и опорного (ОГ) генераторов.

Полосовой фильтр выделяет только низкочастотную составляющую сигнала $v_j(t)$:

$$\vartheta_j(t) = U_j \cos(vt + \phi_j) + c_j + \xi_j,$$

где ξ_j – ошибка измерения в j -м канале.

В ПСД сигналы ϑ_j преобразуются в цифровую форму:

$$\vartheta_j(t_k) = \vartheta_{jk} = U_j \cos(vkt + \phi_j) + c_j + \xi_{jk}, \quad j = \overline{1, N}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где τ – время между двумя последовательными отсчетами (период дискретизации); k – номер отсчета измеренного оцифрованного сигнала.

Комплексная амплитуда отклика j -го измерительного плеча u_j связана с комплексными амплитудами падающей a и отраженной b волн (см. рис. 2) уравнением

$$u_j = A_j a + B_j b + \Xi_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где A_j , B_j – известные комплексные коэффициенты передачи j -го канала для отраженной и падающей волн соответственно, найденные при калибровке; Ξ_j – комплексная ошибка измерения u_j .

Таким образом, если оценки амплитуд u_j известны, можно вычислить оценки параметров a и b . Следовательно, первый этап обработки данных ϑ_{jk} , полученных с измерительных плеч МР, должен заключаться в оценивании на их основе комплексных амплитуд u_j .

Систему (1) преобразуем для удобства следующим образом:

$$v_{jk} = U_j \cos(vkt) \cos(\phi_j) - U_j \sin(vkt) \sin(\phi_j) + c_j + \xi_{jk}. \quad (3)$$

Тогда после замены переменных

$$\begin{cases} y_j = U_j \cos(\varphi_j), \\ z_j = U_j \sin(\varphi_j), \end{cases} \quad \begin{cases} x_{1k} = \cos(v_k \tau), \\ x_{2k} = -\sin(v_k \tau), \\ x_{3k} = 1 \end{cases}, \quad j = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}, \quad (4)$$

система (3) может быть переписана в виде

$$v_{jk} = y_j x_{1k} + z_j x_{2k} + c_j x_{3k} + \xi_{jk}. \quad (5)$$

Разность частот v остается постоянной в течение всего периода измерения $K\tau$, поэтому все параметры v , x_{1k} и x_{2k} считаются известными в каждом измерении. Ошибки ξ_{jk} обусловлены действием теплового шума согласующих усилителей ПСД, следовательно, они могут считаться независимой выборкой нормального процесса с нулевым математическим ожиданием и неизвестной фиксированной дисперсией σ^2 . Неизвестные параметры y_j , z_j и c_j модели (5) необходимо оценить.

Для оценки параметров модели на основе наблюдений широко применяется метод максимального правдоподобия (ММП). Известно [17], что оценки неизвестных параметров, полученные по ММП, обладают свойствами несмещенности, состоятельности и асимптотической эффективности. А в случае распределения ошибок модели по нормальному закону оценки ММП совпадают с оценками метода наименьших квадратов (МНК). Это значит, что алгоритм, основанный на ММП, будет оптимальным в смысле минимума среднего квадрата ошибки оценивания.

Таким образом, оценки y_j , z_j и c_j вычисляются по ММП из выражения

$$\hat{\mathbf{u}}_j = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{V}_j), \quad j = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{u}}_j = (\hat{y}_j, \hat{z}_j, \hat{c}_j)^T$ – вектор соответствующих оценок; $\mathbf{V}_j = (v_{j1}, \dots, v_{jK})^T$ – вектор, состоящий из K отсчетов напряжения в j -м канале; \mathbf{X} – матрица, состоящая из величин x_{qk} (4)

$$\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2K} \\ x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3K} \end{bmatrix}.$$

Из выражений (4) следует, что y_j и z_j – действительные и мнимые части комплексных амплитуд u_j . Поэтому после того, как из системы (6) найден вектор оценок $\hat{\mathbf{u}}_j$, можно построить оценки комплексных амплитуд

$$\hat{u}_j = U_j \cdot \exp\{i \cdot \varphi_j\} = \hat{y}_j + i \cdot \hat{z}_j. \quad (7)$$

Вторая часть алгоритма заключается в оценивании неизвестных комплексных амплитуд падающей a и отраженной b волн. Для этого найденные оценки \hat{u}_j нужно подставить из (7) в (2). В результате получится система уравнений относительно неизвестных переменных a и b , подобная системе (5). Действительные и мнимые части погрешностей Ξ_j распределены нормально, поскольку ошибки ξ_{jk} имеют нормальное распределение и независимы. Поэтому оптимальные оценки параметров a и b могут быть получены по ММП. Для простоты система из N комплексных уравнений преобразована в эквивалентную систему из $2N$ действительных уравнений

$$\begin{cases} \hat{y}_j = \operatorname{Re}(A_j) \operatorname{Re}(a) - \operatorname{Im}(A_j) \operatorname{Im}(a) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Re}(b) - \operatorname{Im}(B_j) \operatorname{Im}(b) + \operatorname{Re}(\Xi_j); \\ \hat{z}_j = \operatorname{Im}(A_j) \operatorname{Re}(a) + \operatorname{Re}(A_j) \operatorname{Im}(a) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Re}(b) + \operatorname{Re}(B_j) \operatorname{Im}(b) + \operatorname{Im}(\Xi_j), \end{cases} \quad (8)$$

где Re и Im – действительная (real) и мнимая (imaginary) части комплексного числа соответственно, $j = \overline{1, N}$.

Составляющие y_j и z_j зависимы, поэтому система (8) должна быть решена в соответствии с взвешенным методом наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z}), \quad (9)$$

где $\mathbf{T} = [\text{Re}(a), \text{Im}(a), \text{Re}(b), \text{Im}(b)]^T$ – вектор неизвестных параметров, подлежащих оценке; $\mathbf{Z} = (\hat{y}_1, \hat{z}_1, \dots, \hat{y}_N, \hat{z}_N)^T$ – вектор соответствующих оценок величин y_j и z_j ; \mathbf{H} – матрица коэффициентов передачи измерительных каналов многополюсника и \mathbf{W} – диагональная весовая матрица ковариаций вектора \mathbf{Z} соответственно:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \text{Re}(A_1) & -\text{Im}(A_1) & \text{Re}(B_1) & -\text{Im}(B_1) \\ \text{Im}(A_1) & \text{Re}(A_1) & \text{Im}(B_1) & \text{Re}(B_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Re}(A_N) & -\text{Im}(A_N) & \text{Re}(B_N) & -\text{Im}(B_N) \\ \text{Im}(A_N) & \text{Re}(A_N) & \text{Im}(B_N) & \text{Re}(B_N) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{C}, \mathbf{C}, \dots, \mathbf{C});$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1},$$

где \mathbf{C} – ковариационная матрица (2×2) векторов $\hat{\mathbf{u}}_j$, определяемая соотношением (6); \mathbf{Y} – матрица ($K \times 2$), состоящая из величин x_{qk} при неизвестных y_j и z_j (5).

Таким образом, процедура оценивания неизвестной фазы отраженного сигнала производится в два этапа. На первом этапе вычисляются оценки максимального правдоподобия комплексных амплитуд u_i , на втором на основе этих оценок вычисляются оценки компонент вектора неизвестных параметров: модулей и фаз падающей и отраженной волн.

Высокая точность измерений достигается за счет линейности всех операций алгоритма. Кроме того, увеличенное число измерительных каналов позволяет уменьшить случайные ошибки измерения и, как следствие, увеличить точность оценивания фазы отраженного сигнала.

Моделирование

Преимущества предлагаемого бесконтактного измерителя были проверены с помощью имитационного моделирования его работы. Для этого было разработано специальное программное обеспечение, реализующее предлагаемый алгоритм обработки сигналов БПЧ по ММП. Частота зондирующего сигнала принята равной 35 ГГц. Количество датчиков МР равнялось 4. Отношение сигнал/шум на выходах измерительных плеч многополюсника задано равным 40 дБ. Количество отсчетов цифрового сигнала $K = 10\,000$. Параметры комплексных коэффициентов передачи измерительных плеч A и B считаются точно известными и задавались случайным образом: модули – из диапазона 0–1, фазы – из диапазона 0–360 град.

При моделировании измерения перемещения поверхности ПП была установлена в 150 мм от антенны измерителя и перемещалась с шагом 0,1 мм на величину 35 мм. В результате моделирования были получены зависимости измеренного перемещения и ошибки измерения перемещения на каждом шаге моделирования от расстояния от антенны измерителя до ПП, представленные на рис. 3.

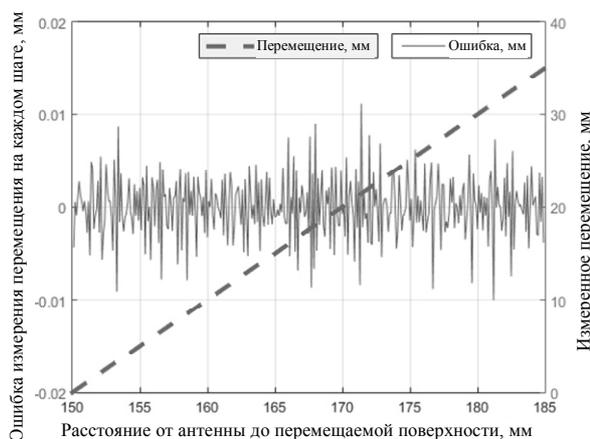


Рис. 3. Зависимости измеренного перемещения и ошибки измерения перемещения на каждом шаге моделирования от расстояния от антенны измерителя до ПП

Точность измерения составляет 0,01 мм при отношении сигнал/шум 40 дБ. Очевидно, что увеличение количества измерений K и отношения сигнал/шум приводит к увеличению точности измерения перемещения ПП.

При моделировании измерения параметров синусоидальной вибрации поверхности ПП была установлена в 100 мм от антенны измерителя. В течение 0,04 с к ПП была приложена вибрация, представленная в виде аддитивной смеси двух гармонических сигналов:

$$y(t) = a_1 \sin(2\pi f_1 t) + a_2 \sin(2\pi f_2 t),$$

где t – время; $y(t)$ – результирующий сигнал; a_1, a_2 – амплитуды первой и второй гармоник соответственно; f_1, f_2 – частоты первой и второй гармоник соответственно.

Амплитуды гармоник a_1 и a_2 приняты равными 25 и 50 мм соответственно, а частоты f_1 и f_2 – 50 и 100 Гц. Измерения перемещения ПП $y(t)$ выполнялись через каждые 10 мкс. После чего для определения параметров вибрации (амплитуд и частот гармоник) к массиву измеренных перемещений ПП применялась процедура быстрого преобразования Фурье. Зависимости измеренного перемещения и ошибки измерения перемещения от времени представлены на рис. 4.

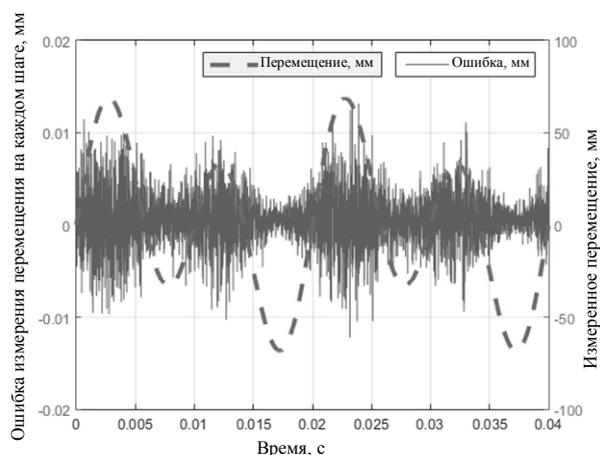


Рис. 4. Зависимости измеренного перемещения и ошибки измерения перемещения от времени

Из полученных результатов следует, что максимальные ошибки измерения перемещения ПП не превышают 0,01 мм и получены при наибольшем отдалении ПП от антенны измерителя. Для определения величины ошибки измерения амплитуды первой гармоники вибрации было проведено 100 опытов. На рис. 5 представлена зависимость данной ошибки от времени.

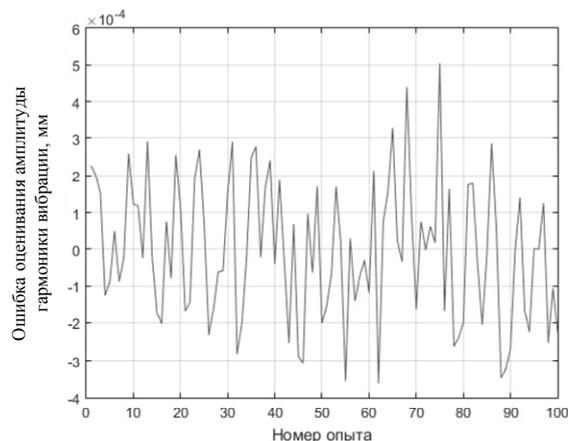


Рис. 5. Ошибка измерения амплитуды первой гармоники вибрации

Точность измерения составляет 0,001 мм.

Как уже упоминалось выше, увеличение количества измерений K и отношения сигнал/шум приводит к увеличению точности измерения перемещения ПП и, как следствие, амплитуд гармоник вибрации.

Применение многополюсного рефлектометра с прямым понижением частоты измерения для построения бесконтактного измерителя линейных перемещений и вибраций, а также использование разработанного алгоритма обработки сигналов БПЧ позволили получить точность измерений перемещения порядка 0,01 мм. Применение БПЧ вместо детекторов мощности позволяет максимально повысить мощность генератора зондирующего сигнала и получить большее соотношение сигнал/шум. Кроме того, предлагаемый бесконтактный измеритель обладает большей чувствительностью на малых частотах по сравнению с измерителями, основанными на эффекте Доплера, поскольку результатами измерения являются перемещения объекта, а не изменения его скорости.

Результаты эксперимента

Многополюсный рефлектометр (основной элемент предлагаемого измерителя) реализован на основе отрезка круглой коаксиальной линии передачи, с одного конца возбуждается генератором, в качестве которого применяется программируемый генератор от скалярного автоматического анализатора цепей типа Р2-83, а к другому его концу подключается рупорная антенна. Конструкция МР с тремя датчиками показана на рис. 6.

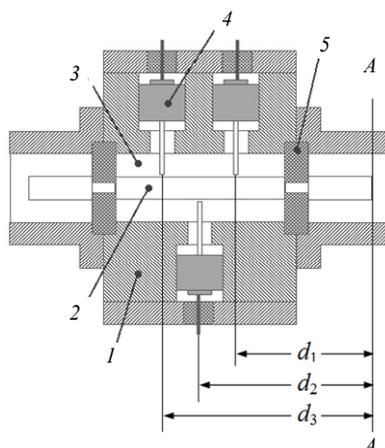


Рис. 6. Конструкция МР с тремя датчиками:

- 1 – корпус; 2 – внутренний проводник; 3 – коаксиальная линия передачи;
- 4 – датчик МР; 5 – диэлектрическая шайба; AA – отсчетная плоскость;
- d_1, d_2, d_3 – расстояния от датчиков МР до отсчетной плоскости

Вдоль продольной оси однородной коаксиальной линии передачи, образованной внутренним проводником и корпусом, на расстояниях d_j ($j = 1, 2, 3$) от плоскости AA располагаются датчики МР, электромагнитно связанные с линией передачи с помощью ненаправленных емкостных элементов связи. Датчики сильно связаны с полем СВЧ тракта, что обеспечивает высокое отношение сигнал/шум на выходах измерительных каналов МР. Внутренний проводник фиксируется относительно внешнего с помощью двух диэлектрических шайб. Элементы связи образованы круглыми отверстиями во внешнем проводнике коаксиальной линии, в которые введены внутренние проводники датчиков. В качестве смесителей блока понижения частоты, к которым подключены выходы датчиков МР (см. рис. 2), применяются широкополосные балансные смесители МР601.

Структурная схема ПСД представлена на рис. 7.

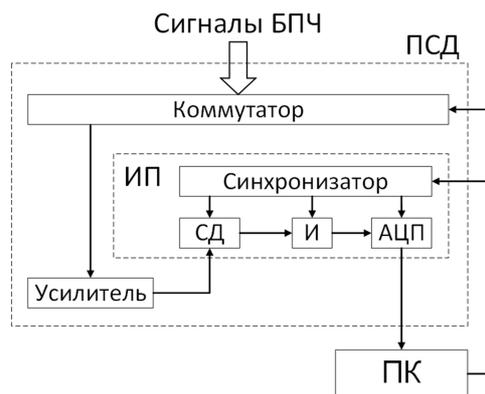


Рис. 7. Структурная схема платы сбора данных:
ИП – измеритель-преобразователь; СД – синхронный детектор;
И – интегратор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Сигналы с выходов БПЧ, пропорциональные амплитуде напряжения стоячей волны в местах расположения датчиков МР, поступают через коммутатор и широкополосный малошумящий усилитель, управляемые ЭВМ, на измеритель-преобразователь, где преобразуются с помощью синхронного детектора, интегратора, синхронизатора и 12-разрядного АЦП по следующему алгоритму: после команды начала преобразования, поступающей от ЭВМ, в течение времени T_1 производится сброс интегратора, затем в течение времени T_2 производится интегрирование сигнала с выхода синхронного детектора. Затем выход синхронного детектора отключается от входа интегратора и сигнал с выхода интегратора преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП. На ЭВМ передается уведомление об окончании преобразования и результат измерения, который вводится в оперативную память через интерфейс «Общая шина». Синхронизатор, кроме сигнала амплитудной модуляции СВЧ генератора, также формирует опорное напряжение синхронного детектора и сигналы управления интегратором.

Для измерения фазы отраженного от перемещаемого объекта сигнала были задействованы все три измерительных канала МР. Число измерений фазы K было принято равным 65 535. Следует отметить, что в данном случае ЭВМ обрабатывает цифровую информацию в реальном времени. Объект перемещался с расстояния 748 до 753 мм от опорной плоскости рупорной антенны измерителя. На рис. 8 показаны измеренная фаза отраженного от перемещаемого объекта сигнала и ошибка измерения фазы.

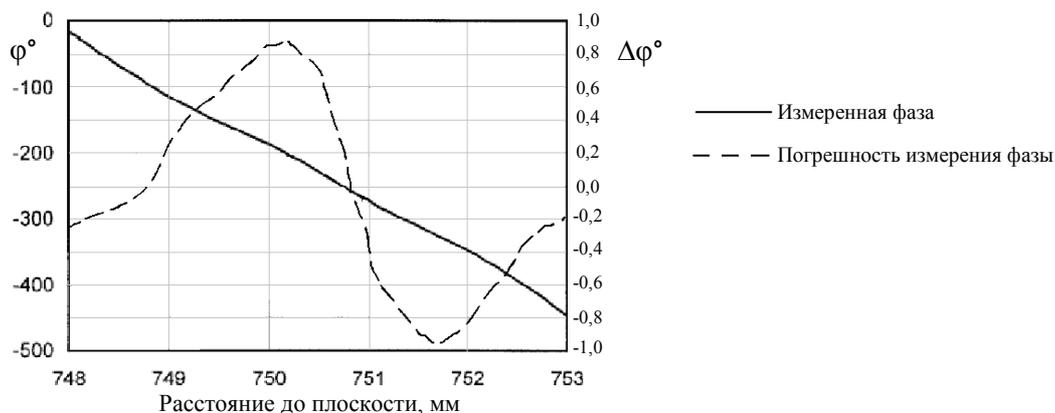


Рис. 8. Фаза φ и ошибка фазы $\Delta\varphi$ коэффициента отражения как функция расстояния до перемещаемой поверхности (1° соответствует 0,012 мм)

Погрешность измерений составила менее $\pm 1^\circ$, что соответствует ошибке измерения расстояния порядка $\pm 0,012$ мм. Такая погрешность обусловлена тем, что на практике сигнал, распространяющийся в свободном пространстве, включает в себя и паразитные переотражения, которые ухудшают его фазовые характеристики.

Использование оптимальных статистических методов обработки сигналов с датчиков МР позволило примерно на порядок повысить точность измерения без применения дорогостоящего оборудования, которым являются прецизионный частотомер и набор калибровочных нагрузок для ДПР [12]. Анализируя полученные значения погрешностей измерения фазы предлагаемым в работе устройством, можно сделать вывод о перспективности нового метода оценивания линейных перемещений и вибраций.

Заключение

В работе предложен бесконтактный радиоволновой измеритель линейных перемещений и вибраций на основе многополюсного рефлектометра с прямым понижением частоты сигналов его измерительных плеч. Субмиллиметровая точность измерения величины перемещения исследуемого объекта, а также амплитуд и частот гармоник приложенной к объекту вибрации достигается, в том числе, за счет применения оптимального в смысле минимума среднего квадрата ошибки статистического алгоритма обработки сигналов с выходов блока понижения частоты, обеспечивающего снижение случайных ошибок измерения. Предлагаемый радиоволновой измеритель, хотя и уступает в точности оптическим измерителям, но имеет простую конструкцию и гораздо меньшую стоимость, обусловленную отсутствием в структуре измерителя дорогостоящих компонентов. Использование блока понижения частоты позволяет получить линейную систему уравнений, описывающую измеритель, и большее отношение сигнал/шум, чем в классических многополюсных рефлектометрах, основанных на измерении мощности выходных сигналов. Измеритель соответствует всем требованиям современного производства и, по мнению авторов, может применяться для непрерывного контроля параметров технологических процессов и состояния оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2 кн. Кн. 1. М.: Мир, 1992. 480 с.
2. Iwaki N., Xiao F., Yakabe T. Six-port Based Wave Correlator with Application to Micro-displacement Measurement // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings (Taipei, 2013, March 25–28). Taipei, 2013. P. 972–975.
3. Гордеев Б. А., Новожилов М. В., Образцов Д. И. Применение ультразвукового фазового метода в вибродиагностике легковых автомобилей // Метрология. 1990. № 6. С. 33–36.
4. Зак Е. Когерентные световые методы измерения параметров механических колебаний // Зарубежная радиоэлектроника. 1975. № 12. С. 70–76.
5. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 204 с.
6. Engen G. F., Hoer C. A. Application of an Arbitrary Six-Port Junction to Power Measurement Problems // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1972. V. 21. P. 470–474.
7. Ghannouchi F. M., Mohammadi A. The six-port technique with microwave and wireless applications. Boston, London: Artech House, 2009. 236 p.
8. Li S., Bosisio R. G. Calibration of Multiport Reflectometers by Means of Four Open Short Circuits // IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques. 1982. V. MTT-30. P. 1085–1090.
9. Griffin E. J. Six-Port Reflectometers and Network Analysers // IEE Vacation School Lecture Notes on Microwave Measurement. London: Inst. Elec. Eng., 1983. P. 11/1–11/22.
10. Xiao F., Ghannouchi F. M., Yakabe T. Application of a Six-Port Wave-Correlator for a Very Low Velocity Measurement Using the Doppler Effect // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2003. V. 52. N. 2. P. 297–301.
11. Yakabe T., Xiao F., Iwamoto K. Six-Port Based Wave-Correlator with Application to Beam Direction Finding // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. N. 2. V. 50. P. 377–380.
12. Stelzer A., Diskus C. G., Lübke K., Thim H. W. A Microwave Position Sensor with Submillimeter Accuracy // IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques. 1999. V. MTT-12 (47). P. 2621–2624.

13. Львов А. А., Львов П. А. Бесконтактный измеритель расстояния до плоской поверхности на основе комбинированного многополосного рефлектометра // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума: в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. Т. 1. С. 69–74.
14. L'vov A. A., L'vov P. A. A combined multi-port reflectometer for precise distance measuring // Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014). Rio-de-Janeiro, Brazil, 2014. P. 146–147.
15. Nikolaenko A. Yu., L'vov A. A., L'vov P. A., Komarov V. V., Ivzhenko S. P. Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (Saint-Petersburg, 01–03 February 2017). IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910798.
16. L'vov A. A., Muchkaev A. New Technique for Measuring the Scattering Parameters of Two-Port Junctions with Single Multiport Reflectometer // 47th ARFTG Conference Digest: Spring (San Francisco, California, June 20–21). Moscone Convention Center, 1996. P. 181–187.
17. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Изд-во ГИФМЛ, 1958. 334 с.

Статья поступила в редакцию 23.07.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаенко Артем Юрьевич – Россия, 410019, Саратов; Производственное объединение «Корпус», филиал Научно-производственного центра автоматизации и приборостроения им. академика Н. А. Пилюгина; инженер-электроник конструкторского бюро; anikolaenkosstu@gmail.com.

Львов Алексей Арленович – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информационно-коммуникационных систем и программной инженерии; alvova@mail.ru.

Львов Петр Алексеевич – Россия, 413119, Энгельс, Саратовская область; Энгельское опытно-конструкторское бюро «Сигнал» им. А. И. Глухарева; канд. техн. наук; начальник отдела схемотехники и программирования; peter.lvov@gmail.com.

Глухова Ольга Михайловна – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; аспирант кафедры прикладных информационных технологий; olgatiho@yandex.ru.



DEVELOPMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE FOR A CONTACTLESS GAUGE OF LINEAR TRANSLATIONS AND VIBRATIONS BASED ON MULTI-PORT REFLECTOMETER

A. Yu. Nikolaenko¹, A. A. L'vov², P. A. L'vov³, O. M. Glukhova²

¹ Production Association "Corpus" Branch of the Research and Production Center of Automation and Instrumentation Technology named after academician N. A. Pilyugin

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russian Federation

³ "Signal" Engels Design Bureau named after A. I. Glukharev,
Engels, Saratov region, Russian Federation

Abstract. The paper describes advantages and disadvantages of the approach to measuring parameters of vibration using contact sensors, i.e. sensors having a mechanical contact with researched object. Several contactless measuring methods were analyzed: ultrasonic, radio wave, and optical. The contactless radio wave displacement gauge based on a classical multi-port reflectometer has been described. A new contactless measuring method of object displacement based

on using multi-port reflectometer with frequency down conversion unit is proposed. Scheme of this meter and its basic equations are given. The advantages of proposed measurement scheme are discussed. The optimal statistical algorithms for measuring displacement of a surface under test is developed, which consists in optimal processing of the output signals of frequency down conversion unit by maximum likelihood method. The proposed measurement scheme in combination with developed optimal algorithm for processing information allows one to create a relatively inexpensive and precision meter of displacement and vibration parameters, which is capable to measure coordinates of researched object having an arbitrary shape with submillimeter accuracy and working under conditions of poor optical visibility and high temperatures. The results of carried out computer simulation of measurement process confirmed the theoretical conclusions.

Key words: contactless gauge, linear displacement, vibration, multi-port reflectometer, direct underfrequency, maximum likelihood method.

For citation: Nikolaenko A. Yu., L'vov A. A., L'vov P. A., Glukhova O. M. Development of hardware and software for a contactless gauge of linear translations and vibrations based on multi-port reflectometer. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;4:81-94. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-81-94.

REFERENCES

1. Esh Zh. i dr. *Datchiki izmeritel'nykh sistem* [Sensors of measuring systems]. Moscow, Mir Publ., 1992. Book 1. 480 p.
2. Iwaki N., Xiao F., Yakabe T. Six-port Based Wave Correlator with Application to Micro-displacement Measurement. *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings (Taipei, 2013, March 25-28)*. Taipei, 2013. Pp. 972-975.
3. Gordeev B. A., Novozhilov M. V., Obratsov D. I. Primenenie ul'trazvukovogo fazovogo metoda v vibrodiagnostike legkovykh avtomobilei [Application of ultrasonic phase method in vibration diagnostics of cars]. *Metrologiia*, 1990, no. 6, pp. 33-36.
4. Zak E. Kogerentnye svetovye metody izmereniia parametrov mekhanicheskikh kolebaniy [Coherent light methods for measuring parameters of mechanical vibrations]. *Zarubezhnaia radioelektronika*, 1975, no. 12, pp. 70-76.
5. Viktorov V. A., Lunkin B. V., Sovlukov A. S. *Radiovolnovye izmereniia parametrov tekhnologicheskikh protsessov* [Radio wave measurements of process parameters]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 204 p.
6. Engen G. F., Hoer C. A. Application of an Arbitrary Six-Port Junction to Power Measurement Problems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1972, vol. 21, pp. 470-474.
7. Ghannouchi F. M., Mohammadi A. *The six-port technique with microwave and wireless applications*. Boston, London, Artech House, 2009. 236 p.
8. Li S., Vosisio R. G. Calibration of Multiport Reflectometers by Means of Four Open Short Circuits. *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, 1982, vol. MTT-30, pp. 1085-1090.
9. Griffin E. J. Six-Port Reflectometers and Network Analysers. *IEE Vacation School Lecture Notes on Microwave Measurement*. London, Inst. Elec. Eng., 1983. Pp. 11/1-11/22.
10. Xiao F., Ghannouchi F. M., Yakabe T. Application of a Six-Port Wave-Correlator for a Very Low Velocity Measurement Using the Doppler Effect. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, vol. 52, no. 2, pp. 297-301.
11. Yakabe T., Xiao F., Iwamoto K. Six-Port Based Wave-Correlator with Application to Beam Direction Finding. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, no. 2, vol. 50, pp. 377-380.
12. Stelzer A., Diskus C. G., Lübke K., Thim H. W. A Microwave Position Sensor with Submillimeter Accuracy. *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, 1999, vol. MTT-12 (47), pp. 2621-2624.
13. L'vov A. A., L'vov P. A. Beskontaktnyi izmeritel' rasstoianiiia do ploskoi poverkhnosti na osnove kombinirovannogo mnogopoliusnogo reflektometra [Non-contact distance meter on flat surface based on combined multipole reflectometer]. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma: v 2 t. Pod redaktsiei N. K. Iurkova*. Penza, Izd-vo PGU, 2016. Vol. 1. Pp. 69-74.
14. L'vov A. A., L'vov P. A. A combined multi-port reflectometer for precise distance measuring. *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*. Rio-de-Janeiro, Brazil, 2014. Pp. 146-147.
15. Nikolaenko A. Yu., L'vov A. A., L'vov P. A., Komarov V. V., Ivzhenko S. P. Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves. *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (Saint-Petersburg, 01-03 February 2017)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910798.

16. L'vov A. A., Muchkaev A. New Technique for Measuring the Scattering Parameters of Two-Port Junctions with Single Multiport Reflectometer. *47th ARFTG Conference Digest:Spring (San Francisco, California, June 20-21)*. Moscone Convention Center, 1996. Pp. 181-187.

17. Linnik Iu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nabludenii* [Least squares method and principles of observation processing theory]. Moscow, Izd-vo GIFML, 1958. 334 p.

The article submitted to the editors 23.07.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolaenko Artem Yur'evich – Russia, 410019, Saratov; Production Assosiation “Corpus” Branch of the Research and Production Center of Automation and Instrumentation Technology named after academician N. A. Pilyugin; Electronics Engineer Design Department; anikolaenkosstu@gmail.com.

L'vov Alexey Arlenovich – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Information and Communication Systems and Software Engineering; alvova@mail.ru.

L'vov Peter Alekseevich – Russia, 413119, Engels, Saratov region; “Signal” Engels Design Bureau named after A. I. Glukharev; Candidate of Technical Sciences; Head of Department of Electronic Systems and Programming; peter.lvov@gmail.com.

Glukhova Olga Mikhailovna – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Postgraduate Student of the Department of Applied Information Technologies; olgatiho@yandex.ru.

