

$$S_0^* = (N + \Delta N) [\lambda(t_0) + \Delta\lambda] = \left[ N_0 - \frac{S_0}{\lambda(t_0)} \frac{\Delta\lambda}{\lambda(t_1)} \right] [\lambda(t_0) + \Delta\lambda] = S_0 \quad (6)$$

«Мертвый ход» луча, температурные изменения контролируемых объектов могут быть также учтены при обработке результатов в цифровом вычислительном устройстве [12].

Проведенный обзор методов построения счетно-вычислительных устройств лазерных измерителей перемещений позволяет сделать вывод о целесообразности использования цифровых методов обработки информации в измерительных устройствах с лазерными интерферометрами. Число-импульсные методы вычислений существенно ограничивают возможности измерительных устройств, что, в конечном счете, сужает область их применения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ленкова. Особенности интерферометров перемещений с обычными и лазерными источниками излучения.— *Автометрия*, 1972, № 5.
2. В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— *Автометрия*, 1971, № 1.
3. V. M. Borringer, A. J. Bonner. A Commercial Laser Interferometer for Length Measurement by Fringe Counting.— *The Radio and Electronic Engineering*, 1970, v. 40, № 1.
4. А. В. Шилейко. Цифровые дифференциальные анализаторы. М., ВИНТИ, 1961.
5. М. А. Карцев. Арифметика цифровых машин. М., «Наука», 1969.
6. Ян-Си-Зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— *Автоматика и телемеханика*, 1960, т. 21, № 7.
7. И. А. Вульдерсон, С. И. Сливаковский. Точность линейных интерполяторов.— *Станки и инструмент*, 1966, № 4.
8. В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— *Автометрия*, 1971, № 1.
9. Использование интерферометров в промышленности.— *Электроника*, 1970, № 10.
10. Гармен, Коркорэн. Учет изменений скорости света в лазерной интерферометрии.— *Электроника*, 1972, № 9.
11. М. И. Алькаев, И. Ф. Клисторин, В. В. Курочкин, А. М. Щербаченко. Система на основе малой ЭВМ для измерения перемещений с помощью лазерных интерферометров.— *Автометрия*, 1973, № 3.
12. В. М. Ведерников, В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, М. А. Кокшаров. Повышение точности измерителей перемещений при автоматической обработке выходной информации лазерных интерферометров.— Конференция по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ. Тезисы. Системы сбора и обработки данных с помощью ЭВМ и их элементы. Новосибирск, 1972.

*Поступила в редакцию 26 октября 1972 г.*

УДК 531.7+681.3.51

**М. И. АЛЬКАЕВ, И. Ф. КЛИСТОРИН,  
В. В. КУРОЧКИН, А. М. ЩЕРБАЧЕНКО**  
(Новосибирск)

### **СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МАЛОЙ ЭВМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ**

Прецизионные лазерные измерители перемещений состоят из двух основных элементов — лазерного интерферометра и электронной системы. Лазерный интерферометр преобразует перемещение подвижной

призмы в периодическую последовательность интерференционных полос, а электронная система осуществляет счет числа интерференционных полос и вычисление величины перемещения с целью представления ее в единицах длины метрической системы.

В общем случае задача вычисления результата измерения сводится к умножению некоторого числа, пропорционального перемещению, на значение длины волны лазера. Хотя обычный стабилизированный лазер имеет стабильность частоты около  $10^{-7}$ , длина волны лазера в интерферометре может изменяться вследствие колебаний показателя преломления воздуха, что приводит к ошибкам при измерении длины. Кроме того, для ряда задач требуется вводить в результаты измерения поправки, учитывающие влияние коэффициента теплового расширения измеряемой детали, вычисляя размер детали, приведенный к определенной температуре.

Для уменьшения ошибок измерения, вызванных изменениями параметров внешней среды, а также для коррекции результатов измерения деталей, проводимых при различных температурах, электронная часть лазерных измерителей перемещений должна содержать устройство для вычисления коэффициента, учитывающего изменения указанных факторов.

Известны число-импульсные и цифровые вычислительные устройства, применяемые в лазерных измерителях перемещений. Число-импульсные вычислительные устройства не позволяют автоматически корректировать результат измерения при изменяющихся внешних условиях [1]. Цифровые устройства лишены этого недостатка.

Использование лазерных интерферометров в прецизионных координатно-измерительных машинах для калибровки больших металлорежущих станков, работающих в производственных условиях, требует применения такой электронной системы, которая позволяла бы, во-первых, автоматически корректировать результаты измерения при изменении параметров воздуха и температуры детали, во-вторых, работать с несколькими лазерными интерферометрами, результат перемещения подвижных призм которых регистрируется реверсивными счетчиками, и, в-третьих, проводить математическую обработку результатов измерения.

Первая из указанных задач в отечественных и до последнего времени во многих зарубежных лазерных измерителях перемещений решается полуавтоматическим способом. Учет колебаний показателя преломления воздуха и коэффициента линейного расширения измеряемого объекта производится с помощью специального вычислительного блока, коэффициент умножения (пересчета) которого предварительно вычисляется по показаниям приборов, измеряющих параметры воздуха, и вводится в него вручную с помощью шифратора [2, 3].

Вторая и третья задачи не могут быть решены с помощью выпускаемых в настоящее время приборов.

Указанные задачи могут быть решены, если в качестве цифрового вычислительного устройства использовать малую ЭВМ, которая производит сбор, хранение, математическую обработку данных и вывод результатов для регистрации.

В настоящей статье рассматривается структура системы, предназначенной для измерения перемещений с помощью лазерных интерферометров и выполненной на основе малой ЭВМ, приводятся принципиальные схемы отдельных узлов и результаты испытаний системы.

Прежде чем перейти к структурной схеме системы, рассмотрим общие выражения, по которым возможно вычислить значение длины волны лазера при отклонении параметров воздуха от нормальных, а также осуществить коррекцию результатов измерения с целью компенсации теплового расширения детали.

Известны различные эмпирические формулы для вычисления длины волны лазера ( $\lambda$ ) [4, 5]. В рассматриваемой системе для вычисления  $\lambda$  использовано одно из выражений, полученных в [4],

$$\lambda = \lambda_n + [ + 59(t - 20) - 23(p - 760) + 4(e - 10)] \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

где  $\lambda_n$  — значение длины волны лазера при нормальных условиях: температуре  $t=20^\circ\text{C}$ , давлении  $p=760$  мм рт. ст. и влажности  $e=10$  мм рт. ст. Из (1) следует, что для измерения длины с относительной погрешностью  $1 \cdot 10^{-7}$  достаточно знать значения температуры с точностью до  $0,1^\circ\text{C}$ , давления —  $0,25$  мм рт. ст. и влажности —  $2,5$  мм рт. ст.

Изменения температуры среды приводят также и к изменениям размеров детали. Это может приводить к значительной погрешности при определении «истинных» размеров детали. Под «истинным» размером детали понимается ее размер при  $20^\circ\text{C}$ . Поскольку не все измерения длины могут быть выполнены в помещениях с регулируемой температурой (при  $20^\circ\text{C}$ ), необходимо предусмотреть коррекцию результатов измерений, проводимых при другой температуре.

Наиболее простой метод коррекции заключается в таком изменении численного значения коэффициента умножения, чтобы можно было в точности компенсировать тепловое расширение детали, регистрируя, вместо измеренных размеров, ее размер при  $20^\circ\text{C}$ .

Выражение для размера детали при температуре  $t_x$ , отличающейся от нормальной, может быть представлено в виде

$$L = L_{\text{ист}}(1 + \gamma\Delta t), \quad (2)$$

где  $L_{\text{ист}}$  — «истинный» размер детали;  $\gamma$  — коэффициент теплового расширения детали;  $\Delta t$  — разность температур  $t_x$  и  $t=20^\circ\text{C}$ . Учитывая, что

$$L = N\lambda^8, \quad (3)$$

где  $N$  — число интерференционных полос, пропорциональное перемещению призмы, «истинные» размеры детали можно определить как

$$L_{\text{ист}} = \frac{N\lambda}{8(1 + \gamma\Delta t)}. \quad (4)$$

Из полученного выражения следует, что для определения «истинного» размера детали необходимо умножить число интерференционных полос, пропорциональное перемещению, на коэффициент

$$K = \frac{\lambda}{8(1 + \gamma\Delta t)}. \quad (5)$$

В состав системы, структурная схема которой представлена на рис. 1, входят: лазерный интерферометр (ЛИ), блок сопряжения лазерного интерферометра с реверсивным счетчиком (РС), реверсивный счетчик с буферным регистром (БР), устройство синхронизации, малая ЭВМ, блок сопряжения внешних устройств с ЭВМ, стандартные устройства ввода — вывода: перфоратор ПЛ-150, фотосчитыватель СП-3, печатающая машинка «Consul-254», а также приборы для измерения параметров воздуха и температуры объекта измерения

**Лазерный интерферометр** с фотоэлектрическими преобразователями представляет собой прецизионный датчик, на выходе которого при перемещении подвижной призмы возникают электрические сигналы синусоидальной формы, число периодов которых за время перемещения призмы пропорционально пройденному призмой пути. Конструкция

лазера, интерферометра, а также принципиальная схема устройства стабилизации частоты лазера подробно описаны в [4, 6] и здесь не рассматриваются.

В блоке сопряжения фотопреобразователей ЛИ с реверсивным счетчиком производится усиление сигналов фотоумножителей и формирование на пороговых элементах (триггерах Шмитта) прямоугольных сигналов, фронты которых дифференцируются и затем обрабатываются логической схемой, выполненной аналогично схеме, рассмотренной в [3]. При каждом смещении интерференционной картины на  $1/4$  полосы

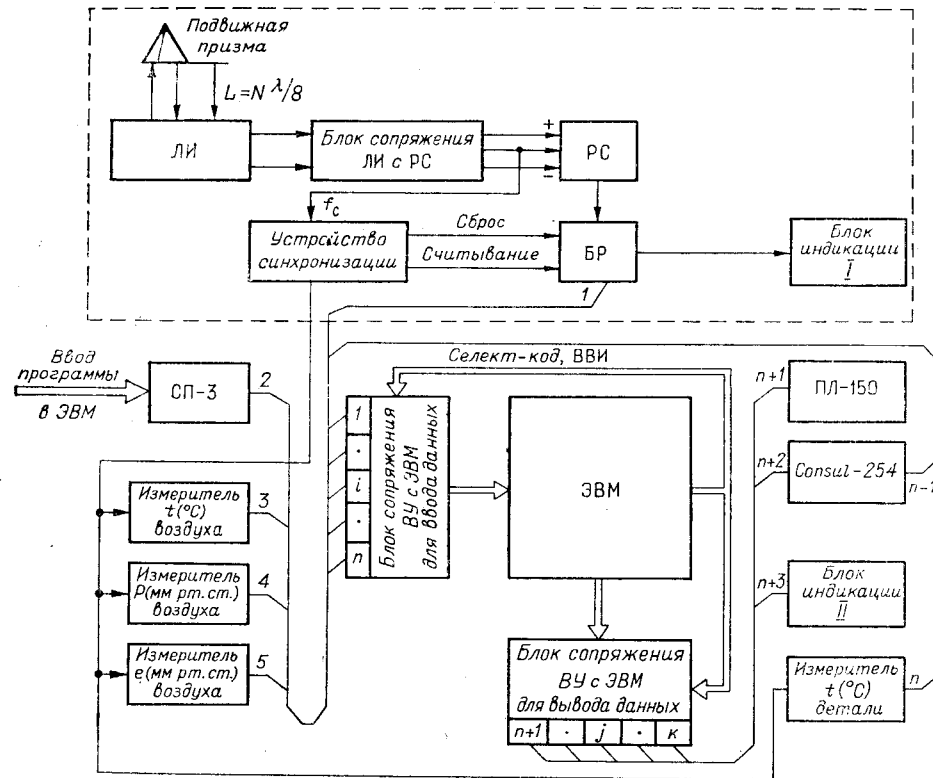


Рис. 1.

вырабатывается импульс добавления или вычитания в зависимости от направления перемещения. Итоговая величина перемещения регистрируется реверсивным счетчиком.

**Реверсивный счетчик** с буферным регистром фиксирует результат перемещения в числе  $1/8 \lambda$  со знаком «+» или «-» в зависимости от направления перемещения подвижной призмы интерферометра от исходного положения. Счетчик выполнен на интегральных микросхемах серии 217 по схеме с комбинированным переносом. Он содержит 24 двоичных разряда, из которых старший разряд используется для представления знака перемещения, а остальные 23 разряда — результата перемещения. Максимальная скорость счета импульсов составляет 2 МГц. Показания реверсивного счетчика переписываются в буферный регистр, выполненный на RS-триггерах той же серии интегральных микросхем. При переносе кода реверсивного счетчика в буферный регистр последний предварительно устанавливается в исходное состояние импульсами, вырабатываемыми устройством синхронизации. Состояния триггеров БР индицируются в двоичном коде с помощью

блока индикации I. Данные от БР через блок сопряжения поступают в ЭВМ.

**Устройство синхронизации** формирует сигналы установки БР в исходное состояние, считывания кода РС в БР, а также сигнал готовности. Устройство синхронизации предотвращает считывание содержимого РС в моменты переходного процесса, протекающего в счетчике после прихода на его вход счетного импульса. Оно содержит генератор тактовых

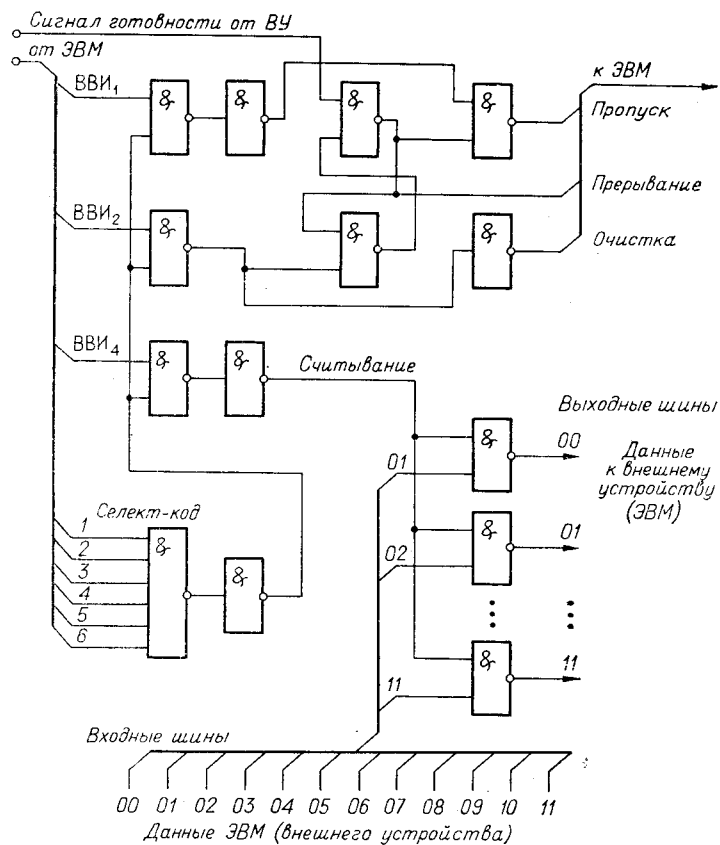


Рис. 2.

импульсов и ряд логических схем, обеспечивающих формирование указанных импульсов.

**Блок сопряжения с ЭВМ** предназначен для связи с ней внешних устройств, к которым относятся реверсивный счетчик, блок индикации II, приборы для измерения параметров воздуха и температуры измеряемого объекта.

Стандартные устройства ввода — вывода, входящие в комплект ЭВМ, соединены с ней через платы сопряжения, которые имеются в самой ЭВМ. Платы сопряжения устройств, не входящих в комплект ЭВМ, выполнены на интегральных микросхемах серии 155. Принципиальная схема этих плат изображена на рис. 2. Схемы сопряжения для ввода и вывода данных одинаковы. Отличие состоит лишь в способе подключения их входных и выходных шин к ЭВМ и внешним устройствам (ВУ). При выводе данных из ЭВМ входные шины подключаются к ЭВМ, а выходные — к внешнему устройству. При вводе данных в ЭВМ входные шины подключаются к внешнему устройству, а выходные — к ЭВМ. Обмен информацией между ВУ и ЭВМ, а также начало операций внут-

ри ВУ происходят по командам обращения к ВУ. Данные команды содержат 6-разрядный код выбора устройства (селект-код) и три разряда, которые могут программироваться для образования последовательных во времени импульсов, управляющих работой выбранного устройства. К ЭВМ могут быть подключены 64 внешних устройства, каждое из которых требует для связи с ней трех командных импульсов ввода — вывода (ВВИ).

**Блок индикации II** представляет результат измерения в виде 7-разрядного десятичного числа со знаком «+» или «-». Он содержит триггерный регистр, дешифратор двоично-десятичного числа и устройство поджига индикаторных ламп типа ИИ-14.

**Малая ЭВМ** осуществляет сбор, хранение и обработку данных, а также выводит результаты обработки для регистрации внешними устройствами. Структура команд машины — одноадресная, системачисления для чисел и команд — двоичная. Способ представления чисел — с фиксированной запятой, разрядность — 12 двоичных разрядов, принцип работы основных устройств машины — параллельный. Время цикла работы 2 мкс. Скорость работы машины не менее 250 тысяч операций типа «сложение» в секунду. Емкость запоминающего устройства — 4096 12-разрядных чисел. В основной комплект машины входят перечисленные выше перфоратор, фотосчитыватель и цифрорпечатающая машинка. Данные устройства передают в ЭВМ информацию с перфоленты или клавиатуры и принимают выходную информацию из машины на перфоленту и в виде напечатанных сообщений.

**Приборы для измерения атмосферного давления, температуры и влажности** необходимы в системе для вычисления по их показаниям длины волны лазера, а также коэффициента, позволяющего корректировать результаты измерений с целью компенсации теплового расширения измеряемой детали. Среди отечественных приборов отсутствуют серийно выпускаемые цифровые приборы для измерения температуры, давления и влажности, удовлетворяющие указанным выше требованиям. Из зарубежных приборов следует отметить кварцевый термометр 2801А фирмы Hewlett-Packard и цифровой барометр фирмы Bell and Howell [7].

Рассмотрим работу системы, в которой производится измерение перемещения с помощью одного лазерного интерферометра. Перед началом измерения в ЭВМ вводится с перфоленты с помощью СП-3 программа ее работы. Далее подвижная призма устанавливается в исходное положение, а реверсивный счетчик в состояние «0».

При движении призмы интерферометра вдоль визирной оси изменяется разность хода интерферирующих пучков. Интерференционные полосы смещаются относительно неподвижных диафрагм, расположенных перед фотоэлектрическими преобразователями. Сигналы с выхода фотопреобразователей поступают в блок сопряжения ЛИ с РС, в котором формируются импульсы суммирования или вычитания с интервалом следования  $1/8 \lambda$ , поступающие в РС и на один из входов схемы синхронизации. На другой вход схемы синхронизации поступают импульсы генератора тактовой частоты. На выходе устройства синхронизации формируются сигналы, осуществляющие перепись кодов РС в БР, а также сигналы готовности, наличие которых фиксируется специальными триггерами на соответствующих платах сопряжения буферных регистров реверсивных счетчиков с ЭВМ. Импульс генератора тактовой частоты является также пусковым для приборов, измеряющих параметры воздуха и температуру детали. После окончания измерения каждый из указанных выше приборов формирует сигналы готовности. Эти сигналы поступают на входы триггеров, регистрирующих готовность ВУ и расположенных на платах сопряжения указанных приборов с ЭВМ.

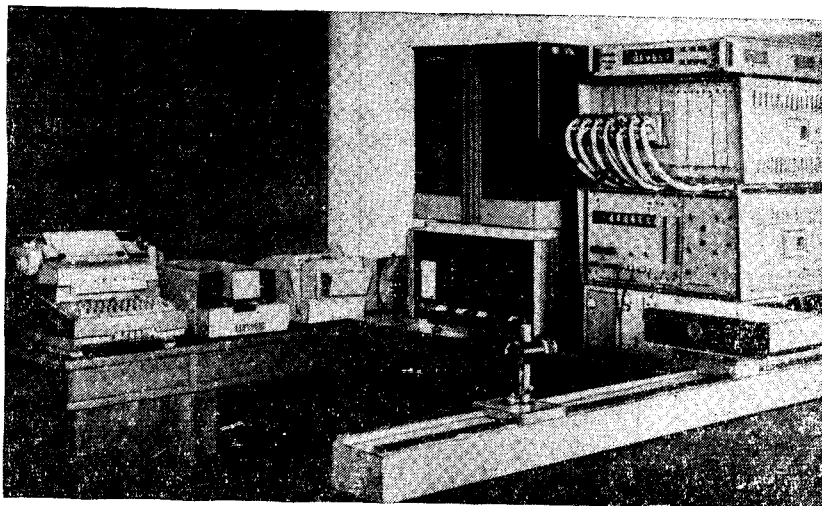


Рис. 3.

По команде «Пуск» начинает работать ЭВМ. ЭВМ по программе производит опрос регистров приборов, измеряющих температуру, давление и влажность, и вычисляет коэффициент умножения в соответствии с выражением (5). Затем ЭВМ считывает содержание буферного регистра и вычисляет величину перемещения призмы. Полученный результат после преобразования кодов регистрируется цифропечатающим устройством с указанием вида координаты и знака перемещения либо индицируется с помощью блока индикации II.

При испытании описываемой системы был использован один лазерный интерферометр. Так как ЭВМ допускает работу с 64 внешними устройствами, подключение к ней через блок сопряжения дополнительного числа интерферометров (с указанными на рис. 1 электронными блоками) не вызывает затруднений. Данные о температуре вводились в ЭВМ с кварцевого термометра типа 2801А, данные о давлении и влажности — с клавишных регистров.

Внешний вид системы изображен на рис. 3. Проверка системы показала, что она позволяет осуществлять автоматическую коррекцию результатов измерения, проводить измерения перемещений в диапазоне 0—0,64 м с погрешностью порядка  $0,5 \cdot 10^{-7} L \pm 1$  знак в диапазоне температур +8—32°С, давлений 730—790 мм рт. ст., влажности 0—20 мм. рт. ст. при максимальной скорости перемещения 4 м/мин. В системе может быть осуществлена коррекция теплового расширения детали.

Разработанная система, снабженная измерителем времени, позволит при соответствующем математическом обеспечении измерять также такие параметры движения, как средняя скорость и ускорение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Ведерников, В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, М. А. Кокшарев. Принципы построения счетно-вычислительных устройств лазерных измерителей перемещений.— *Автометрия*, 1973, № 3.
2. F. Willisen, F. Glantchnig. Ein automatisches Laser Interferometer für industrielle Landaemessungen.— *Brown Bowerg. mitteilungen*, 1968, Bd. 55, № 1—2.
3. В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— *Автометрия*, 1971, № 1.

4. В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— *Автометрия*, 1971, № 1.
5. B. E d l e n. The Refractive Index of Air.— *Metrologia*, 1966, v. 2, № 2.
6. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации частоты газового лазера по провалу Лэмба.— *Автометрия*, 1971, № 1.
7. Цифровой барометр.— *Приборы для научных исследований*, 1971, № 10.

*Поступила в редакцию 25 октября 1972 г.*

УДК 681.325.3

**Г. С. МИХЕЛЬСОН**

(Москва)

### **МЕТОД ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С КОРРЕКЦИЕЙ**

В настоящее время созрела необходимость в создании измерительных преобразователей, дополнительная погрешность которых не превышает основную, при изменении в широком диапазоне параметров окружающей среды в течение периода эксплуатации.

В работе рассматривается метод относительного время-импульсного телеизмерения [1], позволяющий исключить погрешности преобразования, связанные с изменением параметров среды, а также старением элементов преобразователя. На рис. 1 приведена блок-схема линейного время-импульсного измерительного преобразователя, состоящего из переключателя (П), компаратора (К), генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛН), в который входит токостабилизирующий элемент (ТЭ), зарядный конденсатор  $C$  и резистор  $R_1$ , служащий для ограничения тока разряда конденсатора  $C$ ; потенциометрического датчика  $R_4$  и эталонного делителя  $R_2, R_3, R_5, R_6$ . Суть метода состоит в том, что последовательно во времени преобразуются три величины: измеряемое напряжение  $U_x$  и два эталонных  $U_0, U_3$ . Последовательность этих операций выбирается следующим образом. В момент включения преобразователя размыкается контакт Кн и ГЛН создает на входе 1 двухвходового компаратора линейно-изменяющееся напряжение; при этом на вход 2 подключается напряжение  $U_0$ . В момент равенства напряжения на входах компаратора 1 и 2 (момент  $t_0$ ) (см. рис. 1) К срабатывает и переводит переключатель П во второе положение, при котором на вход 2 компаратора подключается измеряемое напряжение  $U_x$ . В момент  $t_x$  напряжение на датчике  $U_x$  сравнивается с напряжением ГЛН, и П подключает напряжение  $U_3$  на вход 2 компаратора. Цикл преобразования продолжается до момента  $t_3$ , в который напряжение на ГЛН сравнивается с напряжением  $U_3$ . В этот момент компаратор переводит П в исходное состояние, в котором Кн замкнут, а конденсатор  $C$  разряжен до напряжения  $U_{нач}$ .

Интервал времени от  $t_0$  до  $t_x$  определяет измеряемый параметр, а интервал от  $t_0$  до  $t_3$  — эталонное значение сигнала. Для передачи по каналу связи указанные временные интервалы модулируются с помощью фазоимпульсного модулятора (ФИМ). Применение ФИМ и порогового элемента в приемнике позволяет существенно сократить искажения, вносимые каналом связи.