

(узел 2, рис. 2), несущая часть которого выполнена из инвара, и углового отражателя. Такое конструктивное исполнение позволило значительно повысить стабильность нуля прибора и проводить точные измерения при значительном удалении выносного интерферометра от лазера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коропкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— «Автометрия», 1971, № 1.
2. Интерференционная система. Пат. США, кл. 356—106, № 3458259, опубл. 29.07.69.
3. T. C. Polanyi, H. L. Skolnick, J. Tobias. Frequency stabilization of a gas laser using optical resonance amplification techniques.— "IEEE J. Quant. Electr.", 1966, vol. QE-2, p. 152—153.
4. М. И. Дьяконов, С. А. Фридрихов. Газовый лазер в магнитном поле.— «Успехи физ. наук», 1966, т. 90, вып. 4.
5. С. Н. Атутов и др. Интерферометр на основе двухчастотного лазера для измерения линейных или угловых перемещений.— В кн. докладов: «Применение опико-электронных приборов в измерительной технике». М., 1973.

Поступила в редакцию 24 апреля 1975 г.

УДК 531.7:621.317

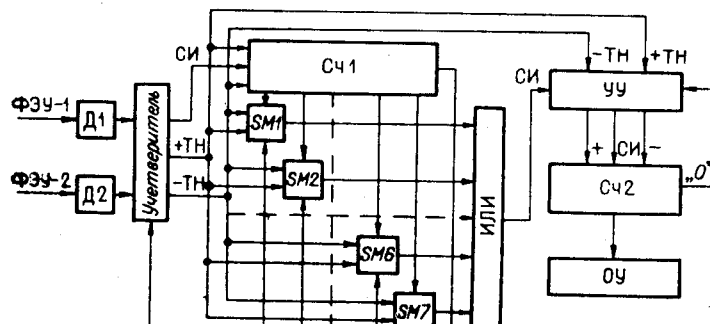
**В. М. ВЕДЕРНИКОВ, В. П. КИРЬЯНОВ, Б. Г. МАТИЕНКО,  
А. М. ЩЕРБАЧЕНКО**  
(Новосибирск)

### **МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ СЧЕТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИПЛ-2**

Дальнейшее развитие работ по созданию прецизионных лазерных измерительных устройств, изложенных в [1, 2], привело к созданию в Институте автоматки и электротрии СО АН СССР лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2.

По сравнению с [2] наиболее значительным усовершенствованиям подвергся счетно-вычислительный блок (СВБ) измерителя перемещений. Как и прежде, к его основным функциям относятся реверсивный счет интерференционных полос, умножение полученного числа на значение предварительно определенной длины волны источника света и вывод результата вычислений на цифровой индикатор или другой регистратор. Большое внимание при проектировании принципиальной схемы СВБ уделялось проблеме унификации и технологичности узлов СВБ и обеспечения его высокой функциональной гибкости. С этой точки зрения весьма перспективным оказалось использование в СВБ схемы дифференциального интегратора с последовательным переносом [3]. На рис. 1 приведена структурная схема СВБ лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2. В формирующую часть СВБ входят дискриминаторы Д1, Д2 триггера Шмитта, учетверитель и устройство проверки (УП) работоспособности СВБ.

Перемножающая часть СВБ состоит из реверсивного счетчика Сч1, декадных умножителей — сумматоров SM1—SM7, регистра коэффициента умножения RG и выходной сборки ИЛИ. Регистрирующая часть СВБ содержит реверсивный счетчик результата измерения Сч2, устрой-



ство управления реверсивным счетчиком (УУ) и отсчетное устройство (ОУ).

Принцип работы формирующей части СВБ ИПЛ-2 аналогичен соответствующей части СВБ, описанной в [2]. Выходные сигналы интерферометра Майкельсона с помощью фотодетекторов преобразуются в два электрических напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , переменные составляющие которых имеют взаимный фазовый сдвиг, равный  $90^\circ$ .

Дискриминаторы Д1, Д2 настраиваются таким образом, чтобы уровни срабатывания их соответствовали мгновенным значениям переменных составляющих  $U_1$  и  $U_2$ , расположенных симметрично относительно уровня их постоянных составляющих. В учетверителе выходные сигналы дискриминаторов дифференцируются, полученные дифференцированные импульсы формируются по длительности и амплитуде и разделяются по каналам счета «+» и «-». В результате этих операций удается получать счетные импульсы при изменении фазы переменной составляющей  $U_1$  или  $U_2$  на  $\pi/2$  радиан, что соответствует приращению оптической разности хода  $\Delta\delta = \lambda/8$ . В ИПЛ-2 счетные импульсы (СИ) и сопутствующие им сигналы направления счета  $ТН^+$  и  $ТН^-$  с выхода учетверителя поступают на вход реверсивного счетчика СЧ1. Общее количество поступивших на вход СЧ1 счетных импульсов  $N_{вх}$  определяется выражением

$$N_{вх} = \text{ent} \left[ \frac{8L}{\lambda} \right],$$

где  $L$  — измеряемое перемещение.

Величина  $\lambda$  в общем случае не остается постоянной. Она зависит от состояния окружающей среды (от температуры  $T$ , давления  $p$ , влажности  $l$  и др., т. е.  $\lambda = \lambda(T, p, l)$ ). Текущее значение  $\lambda(T, p, l)$  определяется перед началом измерения и в кодированном виде  $N_k$  заносится в регистр  $RG$ . Общее количество выходных импульсов логической схемы ИЛИ, объединяющей выходы подекадных умножителей-сумматоров, равно

$$N_{вых} \cong \frac{N_{вх} N_k}{A^n}.$$

Здесь  $A^n$  — максимальная емкость регистра  $RG$  и счетчика СЧ1,  $A$  — основание системы счисления (для ИПЛ-2  $A=10$ ),  $n$  — число разрядов  $RG$  и СЧ1 (для ИПЛ-2  $n=7$ ). С выхода ИЛИ счетные импульсы поступают на вход реверсивного счетчика СЧ2 регистрирующей части СВБ.

Счетчики СЧ1 и СЧ2 занимают более 50% всего объема оборудования СВБ. По этой причине их наиболее целесообразно унифицировать.

Так как счетчик Сч2 входит в регистрирующую часть СВБ, то требования удобства стыковки с внешними цифровыми устройствами существенно ограничивают выбор двоично-десятичных кодов, используемых в счетчике. В ИПЛ-2 счетчики выполнены в коде 8-4-2-1.

На рис. 2 приведена принципиальная схема одного разряда реверсивного счетчика, выполненная на микросхемах серии 217, взятых в качестве основных при выполнении СВБ ИПЛ-2. Работа декадного счетчика при суммировании осуществляется по схеме с выделением состояния 1001 и переводом в состояние «0000»; при вычитании, наоборот, выделяется состояние «0000» и счетчик принудительно переводится в состояние «1001» (эпюры Т1—Т4 рис. 4).

Принцип работы декадных умножителей-сумматоров основан на формировании в каждой счетной декаде четырех импульсных потоков, импульсы в которых не совпадают во времени друг с другом. Из них формируется суммарный поток, число импульсов в котором пропорционально произведению входного числа импульсов на некоторый постоянный множитель. В каждом двоичном разряде декады указанный поток импульсов формируется из тех счетных импульсов (СИ), поступивших на вход триггера данного разряда, которые не используются в операциях «заема» из предыдущего разряда или «переноса» в последующий. В СВБ ИПЛ-2 декадные умножители-сумматоры содержат две группы 3 входных вентилей типа 2ЛБ172: отдельно для направления счета «+» и «-». Принципиальная схема декадного умножителя-сумматора приведена на рис. 3, а на рис. 4—временные диаграммы его работы (рассматривается пример умножения на цифру 7). На эпюрах СИ1—СИ4 представлены импульсы на входах триггеров Т1—Т4. Неперекрывающиеся импульсы для направления счета «+» представлены эпюрами Э1-3; Э2-3; Э3-3 и Э4-3. С помощью логической схемы ИЛИ (элементы Э5 или Э6) эти импульсы можно объединять в различных сочетаниях для получения одного потока импульсов переменной плотности (эпюра  $\bar{\Sigma}$ ). Средняя плотность потока импульсов на выходе Т1  $i$ -й декады Сч1 составляет 0,5 от плотности входного потока, на выходе Т2—0,2, на выходе Т3, Т4—0,1 от плотности потока импульсов на входе  $i$ -й декады Сч1. Этому набору плотностей потоков может быть поставлен в соответствие взвешенный двоично-десятичный код 5-2-1-1. Управляя входами вентилей Э1-2, Э2-2, Э3-2 и Э4-2 или Э1-3, Э2-3, Э3-3 и Э4-3, можно получить потоки импульсов со средней плотностью от 0,1 до 0,9 от плотности входного потока. Таким образом, если в счетчике Сч1 используется код 8-4-2-1, то в регистре  $RG$  должен использоваться код 5-2-1-1. В настоящее время нашей промышленностью не выпускаются комплектующие элементы, выполняющие преобразование непосредственно в этом коде. Поэтому в ИПЛ-2 регистр  $RG$  выполнен в виде цифрового переключателя типа ПМП-1111 и специального шифратора преобразования десятичного кода в двоично-десятичный код 5-2-1-1.

Импульсы «заема-переноса» (ЗП) каждой декады используются в последующих декадах для формирования новых потоков импульсов с «весами» 5-2-1-1 и плотностями, в 10 раз меньшими предыдущих. Поток импульсов декадных умножителей-сумматоров также не перекрываются между собой и поэтому объединяются с помощью общей выходной схемы ИЛИ.

Легко убедиться (см. рис. 4, эпюра  $\bar{\Sigma}$ ) в том, что на выходе каждого декадного умножителя поток импульсов неравномерный. Эта неравномерность сохраняется и для общего потока импульсов на выходе ИЛИ и обуславливает методическую погрешность умножения. Исследованию метрологических характеристик структур, подобных структуре цифрового интегратора с последовательным переносом для различных кодов, посвящены работы [4, 5] и ряд других. Их этих работ следует,

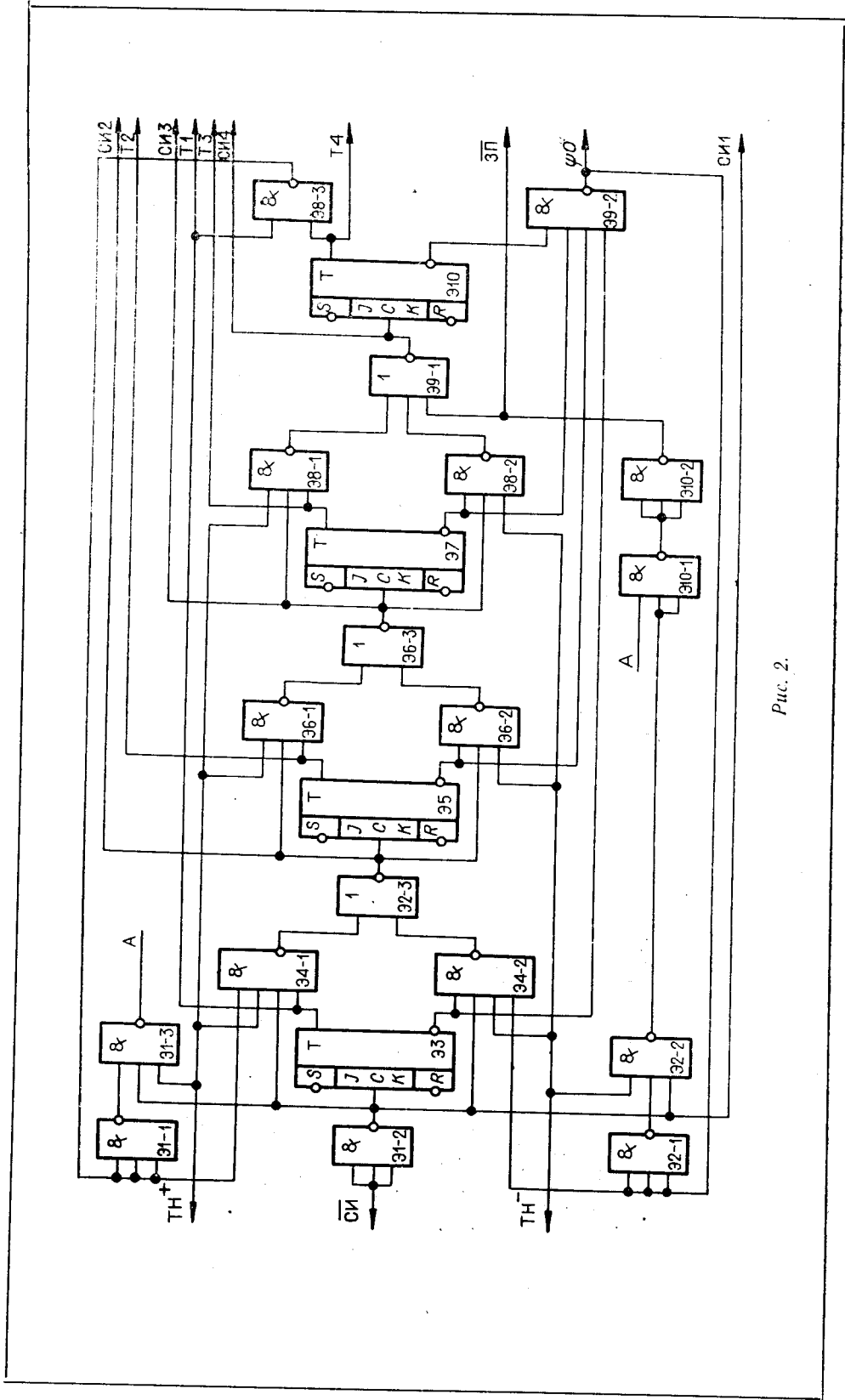


Рис. 2.

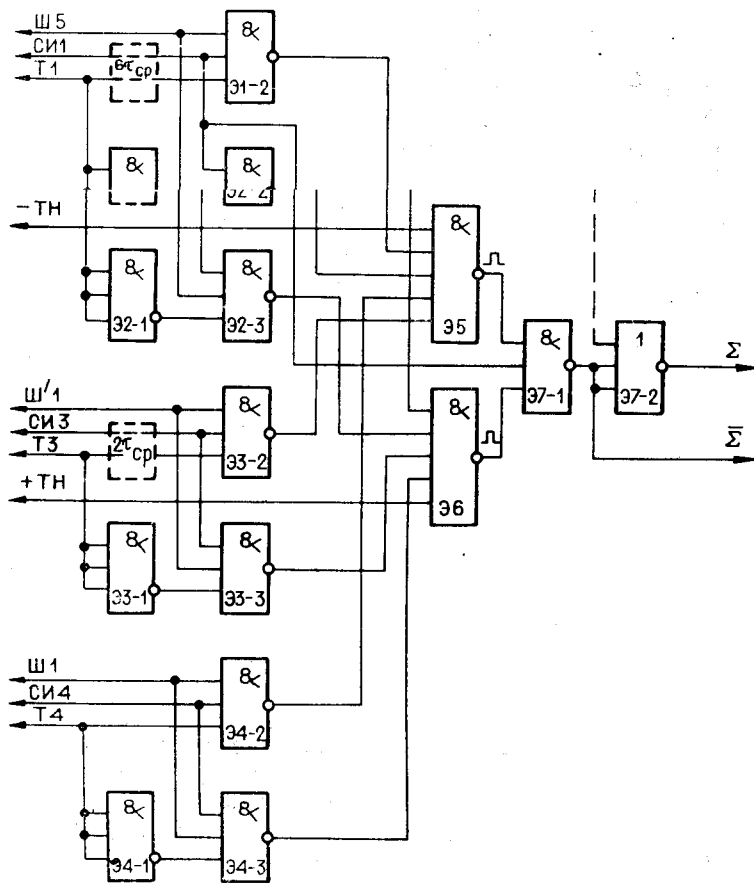


Рис. 3.

что текущие значения методической погрешности повторяются с интервалом, равным  $A^n$  входных импульсов. На концах интервала ошибка умножения определяется только погрешностью округления коэффициента умножения, а внутри интервала предельные значения методической ошибки  $\delta_{\max}$  для большинства кодов удовлетворяют выражению

$$\delta_{\max} < n\varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  — «вес» одного импульса.

Для уточнения методической погрешности предлагается воспользоваться выражением вида

$$\delta = \text{ent} \left[ \frac{1}{10^n} \sum_{i=1}^n N_{\text{вх}} a_i \right] - \frac{1}{10^n} \sum_{i=1}^n N_{\text{вх}} a_i = \sum_{i=1}^n \delta_i,$$

где

$$\delta_i = \text{ent} \left[ \frac{1}{10} b_i a_{n-(i-1)} \right] - b_i [a_{n-(i-1)} 10^{-1} + a_{n-(i-1)-1} 10^{-2} + \dots + a_1 10^{-n+(i-1)}];$$

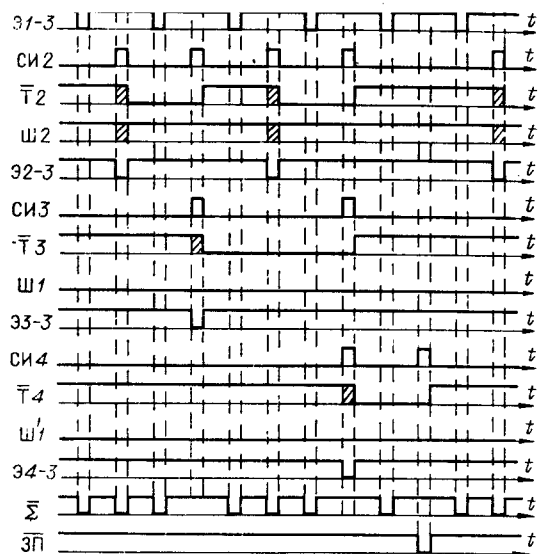


Рис. 4.

дической ошибки умножения достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Другим источником погрешности измерений может служить динамическая ошибка, которая ограничивает скорость поступлений счетных импульсов на вход счетчика Сч1 и не позволяет полностью реализовать его быстродействие. Ниже попытаемся объяснить природу этого вида ошибок и наметить метод их уменьшения. Примем допущения, что для счетного триггера 2ТК171А ( $f_{\max} = 3$  МГц) минимально допустимые длительности импульса и паузы между ними одинаковы и равны 165 нс. В каждой декаде импульс переноса задерживается на величину, равную  $4 \tau_{\text{ср}}$  (см. рис. 2). Величина  $\tau_{\text{ср}}$  нами принимается равной

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вк}} + t_{\text{вык}}}{2} = 23 \div 25 \text{ нс.}$$

Здесь  $\tau_{\text{ср}}$  — среднее время распространения сигнала в вентиле,  $t_{\text{вк}}$  — время включения вентиля,  $t_{\text{вык}}$  — время выключения вентиля. Тогда на вход 7-й декады счетчика Сч1 счетный импульс поступит с задержкой, равной  $24 \tau_{\text{ср}}$ . Очевидно, что при достаточно высоких частотах СИ запаздывание в цепях распространения переносов приведет к группированию импульсов и даже к их частичному наложению на выходе схемы ИЛИ.

Определенные искажения СИ претерпевают в декадных умножителях-сумматорах. Так, СИ4 задерживается относительно СИ1 (см. рис. 2) на время, равное  $6 \tau_{\text{ср}}$  в реверсивном счетчике, и на  $2 \tau_{\text{ср}}$  — в декадном умножителе-сумматоре (см. рис. 3). Стробирование выходного потока импульсов с помощью СИ1 на элементе Э7-1 (см. рис. 3) приводит к тому, что часть выходных импульсов укорочена на величину  $8 \tau_{\text{ср}}$ . Считая, что на входе счетчика Сч2 необходимо обеспечить импульсы с длительностью  $t_{\text{вк}} \geq 165$  нс, получим длительность формируемых в СВБ им-

ния этой методикой целесообразно иметь таблицу значений  $\delta_i$  в интервале  $[0, 10]$  входных импульсов для возможных сочетаний  $a_i$  и  $b_i$ . Для сочетания кодов 8-4-2-1 и 5-2-1-1 получено значение  $\delta_{\max} \cong 5,3 \epsilon$ , которое соответствует случаю, когда в регистре  $RG$  записан код числа 1111111, а в счетчике Сч1 зафиксировано число импульсов 7777777. Для случая лазерного измерителя перемещений, когда код числа в регистре  $RG$  однозначно определен типом лазера, величина  $\delta_{\max}$  несколько меньше. Так, для гелий-неонового лазера  $\delta_{\max}$  не превышает величины 4,82  $\epsilon$  в диапазоне до 0,8 м. Данная теоретическая оценка мето-

пульсов равной

$$t_{\text{СИ}} = t_{\text{вх}} + 8 \tau_{\text{ср}} \approx 370 \text{ нс.}$$

Считая также, что минимально допустимая пауза между импульсами  $t_{\text{н}} \geq 165 \text{ нс}$ , получим минимальный период следования импульсов на входе счетчика Сч1 равным

$$T_{\text{мин}} = t_{\text{СИ}} + 24 \tau_{\text{ср}} + t_{\text{н}} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Откуда максимально допустимая частота входных импульсов на входе СВБ не должна превышать 830 кГц. Эта оценка быстродействия СВБ достаточно хорошо подтверждается экспериментами с несколькими комплектами лазерных измерителей перемещений ИПЛ-2. Наиболее просто динамическая ошибка выявляется в режиме контроля работы СВБ (см. рис. 1). Суть этого режима заключается в том, что от внутреннего генератора устройства проверки (УП) формируются сигналы, подобные сигналам дискриминаторов для одного (по выбору) направления перемещения. Внутренний генератор запускается от кнопки оператором, а останавливается автоматически импульсом переполнения счетчика Сч1. Емкость счетчика Сч1 в ИПЛ-2 равна  $10^7$ , что обеспечивает вывод на цифровой индикатор числа, набранного в 7-разрядном регистре *RG*. Если числа на отсчетном устройстве и регистре *RG* не совпадают, то СВБ работает неправильно. При настройке блока контроля и проверке работоспособности СВБ в заданном интервале температур окружающей среды частота внутреннего генератора подбиралась индивидуально. Оказалось, что для всех изготовленных комплектов эта частота была установлена меньше 800 кГц. Это хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

В рабочем режиме максимальная скорость перемещений также не превышала 60 см/с.

Повысить скорость перемещения, например, до величин, обусловленных быстродействием счетчиков Сч1 и Сч2, можно, используя, например, метод, описанный в [6]. Суть этого метода состоит в том, что снятие информации со счетных триггеров счетчика производится не одновременно со всех триггеров, а последовательно во времени, начиная с самого младшего разряда, причем скорость перебора должна точно соответствовать скорости распространения переносов в счетнике. Для нашего случая применение этого метода практически сведется к тому, что выходы декадных умножителей-сумматоров необходимо соединить не параллельно на выходной схеме ИЛИ, а последовательно, через линии задержки (ЛЗ), эквивалентную задержкам распространения переносов в соответствующих реверсивных декадах. Указанные изменения, проведенные на рис. 3 пунктиром, позволяют практически полностью реализовать быстродействие счетчиков. Таким образом, СВБ лазерного измерителя перемещений ИПЛ-2 позволяет в реальном времени производить вычисления, допускает использование практически любых источников излучения в интерферометре без каких-либо переделок СВБ, в 2 или 4 раза менять разрешающую способность прибора или его быстродействие без замены элементов. Схема такого устройства достаточно проста и технологична. Однако, как и для итерационных умножителей, методическая ошибка умножения достаточно велика и не допускает возможности увеличения разрешающей способности за счет дополнительных измерителей дробной части интерференционных полос.

Внешний вид лазерного измерителя приведен на рис. 5. Конструктивно в состав его входят блок интерферометра с отражателем, основной блок и блок индикации. Технические характеристики прибора: разрешающая способность  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ; погрешность измерения  $0,5 \cdot 10^{-6}$ ; максимальная скорость перемещения 3,6 м/мин; пределы измерения  $0 \div 1,0 \text{ м}$ .

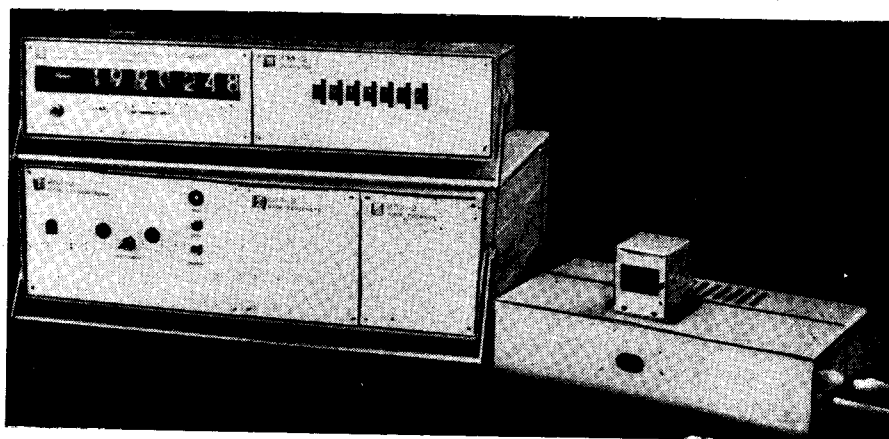


Рис. 5.

В заключение авторы выражают глубокую признательность инженерам В. Т. Березову, А. К. Мовшеву, А. К. Надыровой, О. Г. Соколову, В. И. Халимонову, принимавшим участие в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова. Лазерный интерферометр для измерения длины.— «Автометрия», 1971, № 1.
2. В. П. Кирьянов, И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— «Автометрия», 1971, № 1.
3. А. В. Шпайко. Цифровые дифференциальные анализаторы. М., ВИНТИ, 1961.
4. И. А. Вульфсон, С. И. Сливаковский. Точность линейных интерполяторов.— «Станки и инструменты», 1966, № 4.
5. Ян Си-Зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— «Автоматика и телемеханика», 1960, т. 21, № 7.
6. A. Roth. Simplify high-speed counter design.— "Electronic Design", 1970, vol. 19, № 4.

Поступила в редакцию 2 июля 1974 г.

УДК 532.57:621.378.3

Г. А. БАРИЛЛ, С. А. ТИМОХИН

(Новосибирск)

### ШУМ, ВЫЗВАННЫЙ НАЛОЖЕНИЕМ СИГНАЛОВ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТИЦ В ЛАЗЕРНЫХ ДОППЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ СКОРОСТИ

Допплеровская частота сигнала от отдельной рассеивающей частицы в лазерных измерителях скорости, как известно [1], пропорциональна скорости движения частицы. Когда же в объеме наблюдения находятся несколько частиц, сигналы от них взаимодействуют между собой и частота суммарного сигнала начинает флюктуировать даже при неизменной скорости потока. Это мешает измерению турбулентных пульсаций скорости. Флюктуации частоты, вызванные наложением нескольких импульсов, иногда называют фазовым шумом, желая подчеркнуть,