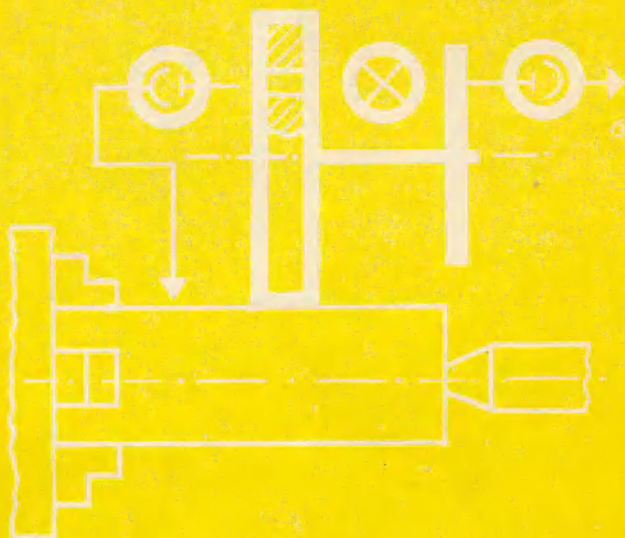


621.803.3

1120



Б. Н. ИВАНОВ

**ИЗМЕРЕНИЕ  
ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ  
МЕТОДОМ  
ОБКАТЫВАНИЯ  
РОЛИКОМ**

БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ

**Б. Н. ИВАНОВ**

**БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ**



# **ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ**

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1973

Иванов Б. Н. Измерение линейных размеров методом обкатывания роликом. М., «Машиностроение», 1973, 144 с.

В книге приведены типы и конструкции измерительных приборов и устройств для контроля диаметров и длин крупногабаритных деталей методом обкатывания измерительным роликом. Впервые в отечественной технической литературе обобщен опыт конструирования и эксплуатации устройств, принцип действия которых основан на этом методе.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность измерения методом обкатывания. Особое внимание уделено теоретическому обоснованию параметров новых конструкций устройств с самоориентацией измерительного ролика относительно поверхности контролируемой детали.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на точность измерения, дано описание методов и средств проверки точности измерения приборами и устройствами рассматриваемого типа.

Брошюра предназначена для инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектно-конструкторских учреждений и заводов, разрабатывающих и эксплуатирующих устройства для автоматизации контроля в машиностроении.

Табл. 2. Ил. 72. Список лит. 43 назв.

Рецензент канд. техн. наук Н. Н. Марков

И  $\frac{3136-123}{038(01)-73}$  123-73

Значительное улучшение качества изделий и повышение надежности машин невозможны без широкого внедрения в производство современных методов и средств автоматизации контроля технологических процессов.

Автоматические средства контроля позволяют получить объективную информацию о ходе технологического процесса, значительно сократить время контроля, а также процент брака и дают большой экономический эффект. Кроме того, автоматический контроль дает возможность автоматизировать производство и перейти к программному управлению и автоматическому регулированию.

Отечественная и зарубежная промышленность все шире применяет средства автоматического контроля в разнообразных отраслях. Однако в тяжелом машиностроении темпы внедрения средств автоматического контроля размеров пока еще недостаточны. Одной из причин такого отставания является сравнительно слабое освещение в отечественной и зарубежной технической литературе вопросов теории и практики автоматизации контроля размеров в тяжелом машиностроении.

Настоящая работа является первой попыткой систематизации и обобщения опыта отечественных научно-исследовательских организаций и заводов по разработке, созданию и внедрению средств для автоматизации контроля размеров методом обкатывания измерительным роликом, поскольку именно вопросы контроля размеров (длин и диаметров) в большей степени, чем вопросы контроля других параметров, являются специфическими для тяжелого машиностроения и мало освещены в литературе.

Основная часть книги написана канд. техн. наук Б. Н. Ивановым.

В главе II часть пункта 1 — «Приборы Краматорского НИИПТМАШа» и пункт 3, а также в главе IV часть пункта 2 — «Неровности на поверхности деталей» и пункт 3 главы VI написаны совместно Б. Н. Ивановым и инж. В. А. Мельничуком.

Пункт 1 главы III и пункт 1 главы IV, а также глава V написаны совместно канд. техн. наук Б. Н. Ивановым и инж. И. И. Елецких.

Пункт 1 главы VI написан Б. Н. Ивановым, В. А. Мельничуком и И. И. Елецких.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., д. 3, издательство «Машиностроение».

## МЕТОД КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ПОМОЩИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РОЛИКА

### СУЩНОСТЬ МЕТОДА ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ

Задачи автоматизации контроля размеров в тяжелом машиностроении, повышение точности и производительности измерительных операций, как было указано ранее, весьма актуальны. Однако их решение осложнено рядом особенностей, присущих тяжелому машиностроению. К ним относятся:

1. Значительные размеры объектов измерения (механической обработке подвергаются детали длиной и диаметром в несколько десятков метров).

2. Индивидуальный характер производства, в результате чего создается такое многообразие подлежащих измерению размеров, которое практически невозможно охватить никакими наборами специальных измерительных инструментов.

3. Жесткие режимы работы тяжелых металлорежущих станков. Обработка ведется с большими глубинами резания при значительных изменениях сечения стружки на черновых проходах, что связано со снятием большого количества стружки и значительными вибрациями элементов станков.

В таких условиях широкое применение могут найти только измерительные устройства, обладающие высокой универсальностью и надежностью. Разумеется, что эти устройства должны обеспечивать достаточную точность измерения при минимальных затратах времени и труда. В основном средства контроля больших длин и больших диаметров представляют собой простое копирование средств измерения, применяемых в машиностроении для измерения длин и диаметров до 500 мм, поэтому измерительные средства громоздки, тяжелы, неточны. Настройка их на размер длительна и требует участия при измерениях не менее двух контролеров.

Увеличение жесткости инструмента неизбежно вызывает увеличение его габаритных размеров и массы. Например, масса сварной стальной скобы размером 3000 мм составляет 30 — 50 кг; масса микрометрического нутромера, изготовленного из тонких стальных труб, для размеров до 4000 мм составляет около 12 кг и т. д. Линейные скобы, изготовленные из труб, наиболее широко распространены. Применяются они для размеров до 6000 мм, однако при длине скоб свыше 2500—3000 мм результаты произведенных ими измерений крайне неточны. Это объясняется тем, что скобы указанной длины сильно прогибаются, вследствие чего нарушается параллельность измерительных губок и в результаты измерений вносится большая погрешность. Рассматриваемые скобы имеют также очень

большую массу. Настройка их на размер длительна. Для проведения измерений диаметров свыше 2000 мм, например скобами, требуются два-три исполнителя-контролера, а для измерения диаметров свыше 5000 мм — также использование подъемно-транспортных средств. Во время измерения универсальными инструментами еще окончательно не обработанной детали оборудование, на котором ведется обработка, простаивает, в связи с чем удлиняется цикл обработки. Для измерения диаметра вала, обрабатываемого на тяжелых токарных станках, чаще всего используют диаметральные скобы различных конструкций. Измерение скобами относится к прямым методам. Главным препятствием автоматизации этих методов является громоздкость измерительных устройств и трудность их встраивания в станок.

Значительное уменьшение габаритных размеров измерительного инструмента позволяет осуществлять измерение косвенными методами, к которым относятся: 1) измерение с помощью геодезических приемов; 2) измерение диаметра по длине хорды и высоте сегмента; 3) измерение от дополнительных баз; 4) измерение обкатыванием роликом. При косвенных измерениях искомый размер определяют с помощью других размеров, связанных с ним функциональной зависимостью; применение косвенных методов для визуального контроля требует последующей обработки показаний прибора, например вычислений, пользования таблицами или графиками и т. п. Счетно-решающие устройства позволяют вычислить контролируемый размер непосредственно и таким образом устраняют существенный недостаток косвенных методов измерения. Из известных косвенных методов измерения наиболее перспективным с точки зрения универсальности и возможности автоматизации является метод измерения обкатыванием роликом. Впервые этот метод был использован для измерения диаметров. В основе метода — весьма простой принцип: ролик известного диаметра касается поверхности вращающегося изделия, установленного на станке, и вращается вместе с ним.

По формуле определяют

$$D = \frac{m}{n} d, \quad (1)$$

где  $D$  — диаметр изделия в мм;  $d$  — диаметр ролика в мм;  $n$  — число оборотов изделия;  $m$  — число оборотов ролика.

Как видно из выражения (1), задача измерения обкатыванием роликом сводится к наиболее точному определению углов поворота ролика и измеряемой детали за время измерения при условии, что вращение происходит без относительного проскальзывания ролика и детали.

Первым известным нам измерительным устройством, предназначенным для измерения диаметров по методу обкатывания роликом, являлся измерительный стенд, разработанный немецкими инженерами в 1933 г. для исследований внутренних напряжений в трубах. Измерительное устройство состояло из станины с расположенными на ней электродвигателем, редуктором и двумя парами ведущих фрикционных роликов, на которых устанавливалась измеряемая деталь. На жесткой траверсе, расположенной над измеряемой деталью, укреплялось качающееся коромысло с закрепленным на нем и частично уравновешенным массивным обкатным калибром шаровой формы, на одной оси с которым закреплялся лимб с делениями для ви-

зуального отсчета угла поворота калибра за время измерения. Число оборотов детали отсчитывалось по совмещениям метки на лимбе с неподвижным индексом.

При работе с этим устройством был применен специальный прием, который используется и в современных измерительных устройствах с дискретной системой отсчета, заключающийся в том, что при необходимости повышения точности измерений увеличивается

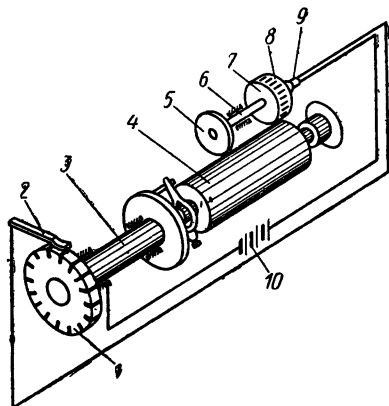


Рис. 1. Схема прибора  
Г. П. Перфильева

количество оборотов детали за один измерительный цикл. При измерении за 1000 оборотов детали при ста штрихах на лимбе обкатного калибра обеспечивался отсчет диаметра образца с точностью до 0,0001 мм. Измерения производили в термостатированном помещении. Перед измерениями поверхности тщательно промывали и протирали. Таким образом, устройство являлось типично лабораторным и не автоматизированным.

Первая попытка создания измерительного устройства для производственного контроля диаметров деталей была сделана в 1949 г. Г. Л. Перфильевым, когда им был предложен прибор со стробоскопическим индикатором для измерения диаметров быстровращающихся деталей в процессе их обработки на токарном станке [34]. Прибор работает следующим образом. К измеряемой детали 4 (рис. 1), вращающейся вместе со шпинделем станка 3, прижимается измерительный ролик 5, насаженный на специальную оправку 6. Угловая скорость вращения ролика равна скорости вращения детали, если их диаметры равны.

Для регистрации момента синхронизации вращения используется стробоскопическое устройство, состоящее из барабана 7 с прорезями 8, лампы 9, помещенной внутри барабана, и прерывателя 1, укрепленного на шпинделе станка 3. Прерыватель представляет собой диск из изоляционного материала с электропроводящими вставками, которые при вращении диска периодически замыкают цепь лампы 9 и источника тока 10 с помощью неподвижного контакта 2. Число контактов прерывателя равно числу прорезей 8 барабана 7. В случае равенства диаметров ролика и детали углы по-

ворота диска прерывателя и барабана стробоскопа одинаковы. Поэтому лампа 9 вспышкает, когда одна щель барабана занимает положение предыдущей щели в момент замыкания прерывателя предыдущей вставки диска. Наблюдатель видит одну неподвижную светлую щель на темном фоне барабана. При малейшем рассогласовании угловых скоростей барабана и прерывателя световая черта начинает двигаться в ту или иную сторону с тем большей скоростью, чем больше рассогласование. По утверждению автора прибора, чувствительность такой индикации так высока, что разность диаметров шлифуемой детали и ролика в несколько микрон обнаруживается при наблюдении за индикатором в течение 2—3 сек (при диаметре шлифуемого изделия 90 мм).

## ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ

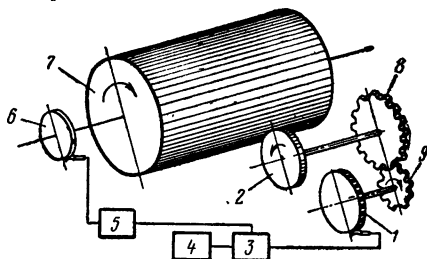


Рис. 2. Схема прибора  
Л. К. Далетина

$$D = \frac{\alpha_p}{\alpha_\theta} d, \quad (2)$$



где  $\alpha_p$  — угол поворота ролика;  $\alpha_d$  — угол поворота детали;  $d$  — диаметр ролика.

Калиброванный ролик 2 прижат к поверхности измеряемой детали 7, установленной на станке, и вращается вместе с ней без проскальзывания. Величина угла поворота измеряемой детали задается датчиком 6 и соответствует одному или нескольким целым оборотам детали, т. е.

$$\alpha_d = 2\pi k, \quad (3)$$

где  $k=1, 2, 3\ldots$

Измерение угла поворота ролика 2 осуществляется с помощью импульсного датчика угла поворота 1 (в простейшем случае дисковый прерыватель электрического тока, обеспечивающий за один собственный оборот  $z$  прерываний). Датчик угла поворота жестко связан с роликом при помощи зубчатых колес 8 и 9, образующих повышающую передачу. При вращении ролика с датчика непрерывно снимаются электрические измерительные импульсы, количество которых прямо пропорционально углу поворота ролика.

Счет измерительных импульсов производится следующим образом: датчик подключается к счетчику 4 с помощью электронной ключевой схемы 3, которая осуществляет это подключение при подаче на нее командного импульса с датчика 6. После того как измеряемая деталь 7 повернется на заданный угол  $\alpha_d$ , с датчика 6 через формирователь 5 на ключевую схему посылается второй командный импульс, отключающий датчик 1 от счетчика.

Поскольку за один оборот ролика с датчика угла поворота снимается  $in_1$  электрических импульсов, то полный угол поворота ролика можно определить как

$$\alpha_p = \frac{2\pi}{iz_d} n, \quad (4)$$

где  $n$  — полное количество импульсов, снятое с датчика и сосчитанное электронным счетчиком за время измерения;  $i$  — передаточное число зубчатой передачи, связывающей измерительный ролик с диском датчика угла поворота. Подставляя в выражение (2) значения  $\alpha_p$  и  $\alpha_d$  из соотношения (3) и (4), получим

$$D = \frac{d}{iz_d} \cdot \frac{n}{k}, \quad (5)$$

или, вводя обозначение

$$C = \frac{d}{iz_d}, \quad (6)$$

будем иметь

$$D = C \cdot \frac{n}{k},$$

где  $C$  — конструктивная постоянная для данного измерительного устройства, представляющая собой цену одного импульса.

Очевидно, если  $C=10^{-6}$ , где  $B=1, 2, 3...$  целое число, то при условии использования счетчика десятичной системы показания его будут численно равны величине измеряемого диаметра, что является существенным достоинством метода.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН

Метод обкатывания роликом в последнее время успешно используется как для измерения диаметров, так и для автоматического измерения линейных размеров в системах программного управления металлорежущими станками и другим технологическим оборудованием.

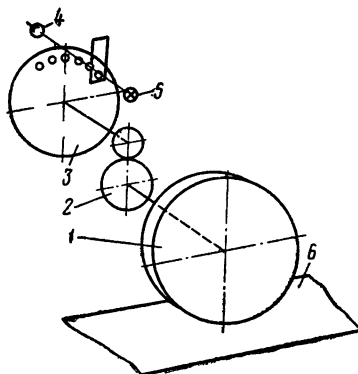


Рис. 3. Схема устройства  
для измерения длины

Сущность измерения длины этим методом заключается в определении угла поворота измерительного ролика 1 (рис. 3), перекатывающегося без скольжения по измеряемому объекту 6.

При вращении измерительного ролика датчик угла поворота, связанный с роликом зубчатой передачей 2 и состоящий из диска с отверстиями 3, осветителя 5 и фотодиода 4, выдает в счетное устройство импульсы, число которых пропорционально углу поворота ролика, а следовательно, величине перемещения ролика относительно детали.

Величину перемещения ролика относительно детали в зависимости от числа импульсов  $K$ , выданного датчиком в счетное устройство за время измерения, определяют по формуле

$$L = \frac{\pi d}{iz_0} K = C_K, \quad (7)$$

где  $i$  — передаточное число зубчатой передачи, связывающей ролик с диском датчика угла поворота;  $z_0$  — число отверстий в диске датчика.

Постоянная для каждого измерительного устройства величина  $C = \frac{\pi d}{iz\theta}$  представляет собой цену одного импульса в единицах длины.

## КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ

Устройства, работающие по методу обкатывания роликом, с учетом конструктивных особенностей их элементов можно классифицировать следующим образом.

I. По способу использования результатов измерения их можно разделить на:

- а) устройства активного контроля;
- б) устройства пассивного контроля.

II. По способу ориентации измерительного ролика относительно измеряемого объекта их можно разделить на:

- а) устройства с принудительной предварительной установкой положения ролика;
- б) устройства с автоматической ориентацией измерительного ролика в процессе измерения (самоориентацией).

III. По конструкции датчика угла поворота измерительного ролика их можно классифицировать на:

- а) устройства с фотоэлектрическими датчиками;
- б) устройства с индуктивными датчиками;
- в) устройства с емкостными датчиками;
- \* г) устройства с индуктосинными датчиками.

Канд. техн. наук Кукин Е. И. предлагает следующую классификацию устройств, работающих по методу обкатывания роликом.

I. По принципиальной схеме измерения он их делит на устройства:

- а) с использованием стробоскопического эффекта для регистрации результатов измерения;
- б) с использованием счетно-импульсных схем регистрации;
- в) с фоторегистацией мгновенного положения лимбов измерительного устройства.

II. По принципу измерения различает устройства:

- а) основанные на абсолютном способе измерения размеров (результат измерения выдается в виде абсолютной величины контролируемого размера);

- б) основанные на относительном способе измерения размеров (регистрируется отклонение измеряемой величины от заданной).

III. По измеряемому параметру различает устройства:

- а) основанные на контроле соотношения скоростей ролика и измеряемого объекта;

- б) основанные на контроле соотношения углов поворота ролика и детали (при измерении диаметров) или соотношения угла поворота ролика и пути измеряемого объекта (при измерении длин и перемещений).

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ДИАМЕТРА И НЕКРУГЛОСТИ

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ

**Приборы Красноярского сельскохозяйственного института (КСХИ).** В КСХИ на протяжении ряда лет проводилась работа по созданию и исследованию приборов для измерения диаметров при обработке на карусельных и тяжелых токарных станках [38, 42].

Принципиальная схема прибора ОП-6М приведена на рис. 4. Измерительный диск 1 посредством зубчатой передачи 2 вращает диск 3 кругового датчика с радиальными щелями по периферии. Лампочка 4 периодически освещает через щели в диске и в диафрагмах 5 фотодиод 6. Электрические импульсы поступают через усилитель 7 и эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_7$  на схему удвоения  $СУ$ , затем на схему совпадения на транзисторах  $T_8$  и  $T_9$ , на триггер  $Tr_4$  со счетным входом и после этого в электронный счетчик 8.

Предварительный усилитель 7 выполнен с общим эмиттером, температурной стабилизацией и обратной связью для получения импульсов синусоидальной формы. Фотокаскад установлен вблизи фотодиода 6 непосредственно в измерительной головке.

Эмиттерный повторитель предварительного каскада усиления на транзисторе  $T_7$  обеспечивает низкоомный выход, позволяющий работать с кабелями практически любой длины и марки, и согласование выхода усилителя 7 со входом схемы совпадения И.

После триггера  $Tr_4$  импульсы подаются на правый триод лампы  $Л_7$ , служащий усилителем первой декады счетчика 8. Левый триод этой лампы является усилителем декатрона  $Л_6$ , включающего счетчик на одно измерение за пять оборотов детали. Усилителями последующих декад служат два двойных триода.

База транзистора  $T_9$  схемы совпадения связана с управляющим устройством, от которого поступают командные сигналы, соответствующие точно одному обороту детали. В управляющем устройстве имеется три связанных между собой триггера: реактивный  $Tr_1$ , коммутирующий  $Tr_2$  и вспомогательный  $Tr_3$ . Реактивный триггер служит для увеличения крутизны фронта импульса, поступающего от датчика оборотов; триггеры  $Tr_2$  и  $Tr_3$  обеспечивают однократность срабатывания устройства, что необходимо при измерении быстро-вращающихся деталей.

Для измерения с ценой отсчета 0,01 мм за пять оборотов детали в схему управляющего устройства включается ячейка накопления командных импульсов, выполненная на коммутаторном декатроне  $Л_6$  и левом триоде лампы  $Л_7$ . Входная цепь триггера  $Tr_2$  размыкается в точке А (производится переключение на 0,01). Первый им-



пульс от датчика оборотов, открывающий схему совпадения и начинающий отсчет, подается также на левый триод лампы  $\mathcal{L}_7$  и на декатрон  $\mathcal{L}_6$ . При каждом последующем обороте измеряемой детали ориентация триггеров измениться не может и происходит лишь их отсчет декатроном  $\mathcal{L}_6$ , который после пятого оборота детали выдает импульс отрицательной полярности через точку  $B$  на базу  $T_4$ . Этот импульс опрокидывает триггер  $Tr_2$  и прекращает счет. Следовательно, счетчик регистрирует показания за пять оборотов детали. При каждом обороте детали 11 фотоэлектрические датчики оборотов 12, 13, 14 выдают импульсы, которые после усиления в усилителях на транзисторах  $T_{10}$ ,  $T_{11}$  поступают на управляющее устройство. В приборе могут использоваться также механические контакты 9, 10, включаемые непосредственно в триггер  $Tr_1$ .

Специальное устройство, обеспечивающее автоматическое введение поправки на неточность диаметра диска, состоит из коммутаторного декатрона  $\mathcal{L}_5$ , устанавливаемого в счетчике 8 на пятом месте. В катоды 2—6, 8—10 декатрона включены резисторы  $R$ , с которых снимаются импульсы в момент прихода разрядного свечения на соответствующий катод. Через разделительные диоды  $D_2$ — $D_{10}$  импульсы подаются на переключатель поправок П-1, устанавливаемый в нужное положение при периодических аттестациях диска, и после усиления сигналы, подаваемые в транзисторы  $T_{12}$  и  $T_{13}$  и на сетку правого триода лампы  $\mathcal{L}_7$ , вводятся в счетчик 8. Выводы катодов декатрона  $\mathcal{L}_5$  сгруппированы таким образом, что можно снимать импульсы с ценой  $1/100\ 000$ ,  $1/50\ 000$ ,  $1/30\ 000$ ,  $1/20\ 000$  измеряемой величины, а это соответствует отклонениям диаметра диска в 1, 2, 3 и 5 мкм. Принятая схема основана на том, что вводить дополнительный импульс значительно проще, чем реверсировать счет, поэтому измерительный диск изготовляют с гарантированным отклонением в плюс с расчетом на последующее уменьшение диаметра до номинального значения в период эксплуатации вследствие наклепа и изнашивания.

Прибор АИД-6 состоит из измерительной головки, которая закрепляется на резцедержателе суппорта или на специальном приспособлении, электронного счетно-управляющего устройства, устанавливаемого на пульте управления станка, и бесконтактного датчика оборотов, монтируемого на станине и на планшайбе станка [40].

Измерительная головка прибора (рис. 5) состоит из датчика измерительных импульсов, закрепленного в приспособлении для установки на резцедержателе станка. Приспособление состоит из корпуса 12, который при помощи шпонки 13 и поворотного клина 14 с ручкой и тарельчатыми пружинами 17 точно фиксируется на заранее выверенной базовой плите 15, привинченной винтами к резцедержателю 22. Датчик с измерительным роликом 23 закреплен на хвостовике 11, который может перемещаться на шариках 2 по направляющим 1, установленным на корпусе 12. Пружина 16 прижимает ролик 23 к поверхности контролируемой детали; шток 18, замыкая контакт 19, сигнализирует о достижении нормального измерительного усилия (равного 8,5 кгс), а замыкая контакт 20, — о максимально допустимом прижатии диска и опасности повреждения головки, при этом еще остается запас хода хвостовика в 5 мм, а измерительное усилие составляет 12,5 кгс.

Манжета 21 предохраняет направляющие от запыления.

В датчике — головке на валу 8 измерительного ролика 23, установленного на шарикоподшипниках 9, закреплен диск 7 с радиаль-

ными непрозрачными штрихами (1000 штрихов). Лампочка 4 через диафрагму 5, неподвижную шкалу (нониус) 6 и шкалу диска 7 освещает фотодиод 10 типа ФД-1, в котором вырабатываются электрические импульсы, усиливаемые фотокаскадом 3 на транзисторах

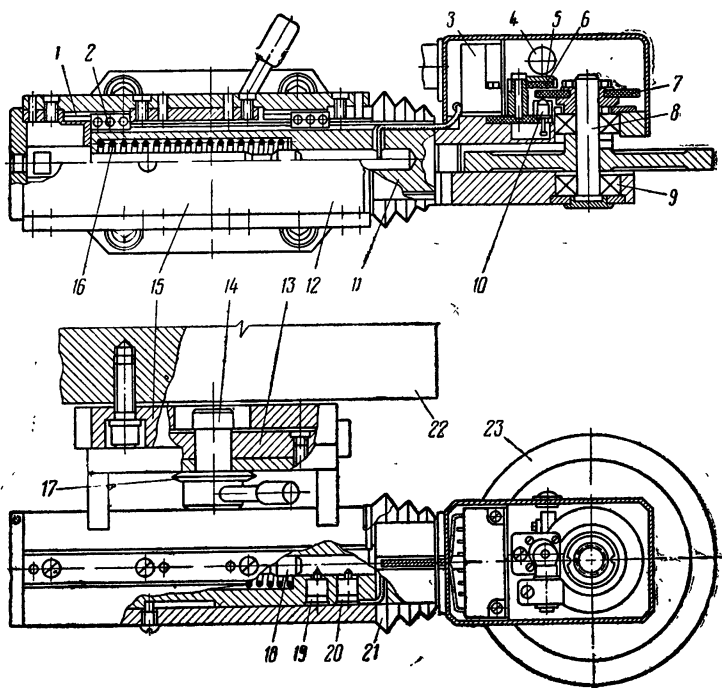


Рис. 6. Измерительная головка прибора АИД-6

и передаваемые в электронное счетно-управляющее устройство. Применение шкалы, установленной непосредственно на валу измерительного диска, и нониуса, содержащего 25 штрихов, в результате чего фотодиод реагирует на некоторый усредненный шаг, существенно повышает точность датчика измерительных импульсов. Однако, несмотря на малые размеры шкалы (диаметр равен 40 мм), стеклянная деталь требует большой осторожности при сборке и разборке датчика. Необходима также тщательная регулировка, так как величина амплитуды импульсов зависит от расстояния между шкалой и нониусом. Измерительные импульсы от датчика головки посредством экранированного кабеля поступают в электронное счетно-управляющее устройство, состоящее из схемы удвоения, схемы совпадения, пятиразрядного счетчика на декатронах, управляющего устройством, счетчика числа оборотов и блока питания. Предварительный каскад усиления, выполненный на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 6), расположен непосредственно у фотодиода ФД<sub>1</sub> во избежание помех и наводок при передаче информации по кабелю к счетчику.





Импульсы от фотокаспада поступают через схему удвоения на трансформаторе  $Tr_1$  и транзисторе  $T_3$  и затем на базу транзистора  $T_4$  схемы совпадения, состоящей из двух последовательно включенных транзисторов  $T_4$  и  $T_5$ . База транзистора  $T_5$  связана с управляющим устройством (триггером), от которого поступают командные сигналы, открывающие и закрывающие транзистор  $T_5$ . Эти сигналы отсекают серию импульсов, поступающих от измерительной головки, соответствующую точно одному обороту детали (или пяти оборотам), так как триггер опрокидывается при поступлении импульсов с датчика оборотов детали.

С выхода схемы совпадения импульсы поступают на триггер со счетным входом на транзисторах  $T_6$  и  $T_7$  и затем на усилитель первой декады счетчика — на правый триод лампы  $L_3$ ; усилителями последующих декад служат лампы  $L_4$  и  $L_5$ .

При измерениях за один оборот детали с триггера ( $T_6$ ,  $T_7$ ) четные импульсы поступают в счетчик, а нечетные — на лампочку  $L_2$  подсветки отсчета 0,05 мм; при измерениях за пять и десять оборотов переключателем  $P_2$  замыкается нижняя цепь выхода триггера, и все импульсы проходят в счетчик. Точность отсчета при этом составляет 0,01 мм. Счетчик построен на декатронах ОГ-3 по общепринятой схеме.

В приборе применяется пятиразрядный счетчик. Поскольку один импульс, поступающий на первый декатрон при измерении за один оборот, соответствует 0,1 мм, то счетчик позволяет производить измерение диаметров до 10000,0 мм. При больших диаметрах к результату следует добавлять 10000 мм. При измерении за пять оборотов детали один импульс на первом декатроне соответствует 0,01 мм и емкость счета составляет 10000 мм.

В управляющее устройство входят датчик оборотов с усилителем и три связанных между собой триггера: реактивный ( $T_{12}$ ,  $T_{13}$ ), коммутирующий ( $T_{14}$ ,  $T_{15}$ ) и вспомогательный ( $T_{16}$ ,  $T_{17}$ ), выполненные на транзисторах. Бесконтактный фотоэлектрический датчик оборотов состоит из фотодиода  $\Phi D_2$  типа  $\Phi D-1$ , освещаемого лампой  $L_{12}$ , предварительного каскада усиления на транзисторе  $T_9$ , установленного непосредственно в датчике оборотов детали, и усилителя на транзисторах  $T_{10}$ ,  $T_{11}$  (триггера Шмидта).

Триггер Шмидта и реактивный триггер служат для увеличения крутизны фронта импульса, поступающего от датчика оборотов; триггеры  $Tr_4$  и  $Tr_5$  обеспечивают одноразовость срабатывания устройства, что необходимо при автоматическом контроле диаметров.

С помощью кнопки «сброс» триггеры устанавливаются в исходное положение — триоды  $T_{14}$  и  $T_{16}$  закрыты, а триоды  $T_{15}$  и  $T_{17}$  открыты. С коллектора триода  $T_{15}$  снимается напряжение, управляющее триодом  $T_5$  схемы совпадения; в исходном состоянии триггеров схема совпадения закрыта и счета нет. Первый положительный управляющий импульс от усилителя датчика оборотов приводит реактивный триггер, собранный на триодах  $T_{12}$  и  $T_{13}$ , в неустойчивое состояние — положительный импульс с нагрузки триода  $T_{12}$  поступает на базу открытого триода  $T_{17}$  вспомогательного триггера и на базу закрытого триода  $T_{14}$  коммутирующего триггера.

Вспомогательный триггер изменяет свое состояние и положительным импульсом с коллектора триода  $T_{16}$  перебрасывает коммутирующий триггер. Закрывшийся триод  $T_{15}$  снимает положительное запирающее смещение с базы транзистора  $T_5$  схемы совпадения и начинает отсчет.

После одного оборота детали от датчика оборотов поступает второй импульс, реактивный триггер  $Tr_3$  выдает положительный импульс на базу триода  $T_{14}$  коммутирующего триггера (во время измерения триод  $T_{14}$  открыт, а  $T_{17}$  закрыт), который изменяет свое состояние и закрывает схему совпадения; отсчет прекращается.

Снятие показания производится визуально по декартнам счетчика и по лампе  $L_2$  подсветки отсчета 0,05 мм, питание которой включается одновременно с установкой подсветки запятой на 0,1 (лампа  $L_{13}$ ).

При измерении за пять оборотов детали (переключатель  $P_2$  устанавливается в положение «5 оборотов») в схему управляющего устройства включается ячейка накопления командных импульсов, выполненная на левом триоде лампы  $L_3$  и коммутаторном декартоне  $L_{11}$ , а в схему счета включаются оба выхода триггера  $Tr_1$ . Входная цепь коммутирующего триггера  $Tr_4$  замыкается в точке А. Переключатель  $P_2$  переключается на первый импульс, соответствующий 0,01 мм. Этот импульс открывает схему совпадения, начинает отсчет и подается от триггера  $Tr_3$  на лампу  $L_3$  и на декартон  $L_{11}$ . При каждом последующем обороте детали ориентация триггеров измениться не может и происходит лишь отсчет импульсов декартоном  $L_{11}$ , который после пятого оборота выдает импульс отрицательной полярности на базу триода  $T_{15}$ . Этот импульс опрокидывает коммутационный триггер  $Tr_4$  и прекращает отсчет. Последующие импульсы не могут изменить состояния триггеров, пока не будет произведена их начальная установка нажатием кнопки «сброс». Таким образом, счетчик регистрирует показание за пять оборотов детали, и чтобы прочесть на табло величину диаметра, необходимо в полученном результате перенести запятую влево на один знак (переключатель  $P_2$  включает лампу  $L_{14}$  подсветки запятой на число 0,01).

Повторное измерение может быть сделано лишь после сброса предыдущих показаний счетчика и начальной ориентировки триггеров (при нажатии кнопки «сброс»); при этом разряд декартонов устанавливается на нулевые катоды.

Для работы прибора требуется постоянный и переменный ток нескольких различных напряжений. С этой целью силовой трансформатор имеет соответствующие обмотки. Выпрямители выполнены на полупроводниковых диодах, они обеспечивают напряжения: +450 в для анодных цепей декартонов и лампы  $L_3$ , +300 в для усилителей декартонов, +150 в для питания цепей подкатодов декартонов, +3 в используется в цепи подготовки триггеров и для смещения усилительных ламп, триггеров, фотокасакада, датчика оборотов, —80 в для индикации отсчета 0,05 мм, подсветки запятых, сигнализации прижатия. Питание осветительных лампочек производится переменным током напряжением 6,3 в. Лампа  $L_1$  связана с балластным сопротивлением  $R_9$ .

В связи с тем что прибор предназначен для работы в цехе, где возможны значительные колебания напряжения сети, предусмотрена его стабилизация в широких пределах. По переменному току стабилизация осуществляется резонансным трансформатором  $Tr_2$ , анодные напряжения стабилизированы газовыми стабилизаторами  $L_{17}$ — $L_{19}$ , сеточное смещение и питание транзисторов — полупроводниковым стабилизатором на двух кремниевых стабилитронах Д808 и транзисторе  $T_{18}$ . Все это обеспечивает нормальную работу прибора при колебаниях напряжения питания в пределах 180—260 в. За счет

принятой системы стабилизации, применения больших емкостей конденсаторов фильтров и разделительных диодов допускается кратковременное падение напряжения ниже 180 в.

Для предохранения прибора от влияния импульсных промышленных помех, распространяемых по проводам питания и электромагнитным путем, во входную цепь переменного тока включен

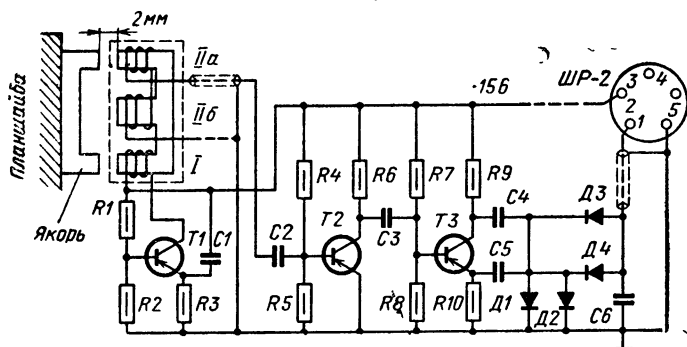


Рис. 7. Принципиальная схема индуктивного датчика прибора АИД-6

фильтр  $M$  и применен электростатический экран в силовом трансформаторе, фотокасад помещен в экранированный кожух измерительной головки. Для передачи импульсов от датчика к счетчику применяется экранированный кабель.

Измерительная головка монтируется на суппорте неподвижно или при помощи вспомогательных устройств. Установка головки на резцедержателе карусельного станка производится при помощи базовой плиты 5 (рис. 5) так, чтобы ось вращения измерительного диска располагалась строго параллельно оси вращения детали; проверка производится по торцу диска накладным уровнем с ценой деления 40 сек, допустимый перекос осей составляет 5 мин. Торцовое биение диска недопустимо.

В перерывах между измерениями головка отводится от детали, а после окончания смены снимается и укладывается в специальный футляр.

Счетно-управляющее устройство устанавливается в специальном защитном кожухе на пульте управления станков. Кожух предохраняет прибор от ударов и от попадания пыли, поэтому он должен быть закреплен и, когда не производятся измерения, закрыт.

Схема индуктивного датчика оборотов приведена на рис. 7. Он состоит из якоря, который крепится к планшайбе станка, магнитопровода, устанавливаемого на станине станка, и генератора с усилителем, располагаемых вблизи магнитопровода на станине. Усилитель соединяется при помощи экранированного кабеля и разъема ШР-2 с электронно-счетным устройством. Электронный прибор ОП-7 для активного контроля диаметров имеет ряд элементов, аналогичных элементам прибора ОП-6М: схемы входа, счета, ввода поправки, управляющее устройство.

В приборе ОП-7Д счетчик построен на коммутаторных декастро-нах, показания которых автоматически сравниваются с заданным размером на блоке сравнения, и при необходимости производится выдача команд на остановку или подналадку станка. Прибор обеспечивает измерение с ценой отсчета  $\pm 0,05$  или  $\pm 0,01$  мм, автома-

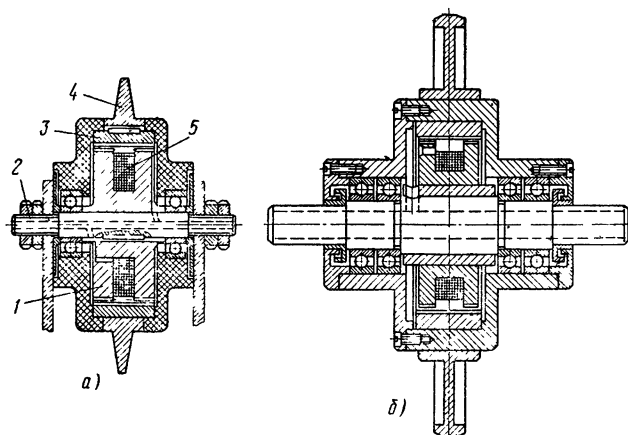


Рис. 8. Индуктивные датчики-ролики КЗТС (а) и ЦНИИТМАШа (б)

тическое измерение диаметров от 100 до 10000 мм с ручным включением и визуальным отсчетом показаний, автоматическое измерение диаметров с установленным ритмом по заданной программе: подведение измерительной головки, измерение, сброс цифр, отсчет показания, повторное измерение, автоматический контроль в процессе достижения заданного размера или границ допусков с выдачей сигналов на подналадку или остановку станка.

Входное устройство прибора ОП-7Д аналогично прибору ОП-6М.

Принципиальная схема датчика импульсов измерительной головки прибора ОП-7Д аналогична схеме головки прибора ОП-6М, но отличается по конструкции, так как требования, предъявляемые к прибору активного контроля, более жесткие.

Измерительная головка прибора ОП-7Д имеет механизм подведения диска, электродвигатель которого включается через промежуточное реле исполнительным реле. Весь механизм с головкой может крепиться при помощи быстросъемных элементов на специальных базовых площадках по бокам суппорта станка (в зависимости от направления перемещения суппорта).

Одной из последних моделей приборов для активного контроля является прибор АИД-8, отличающийся использованием в регистрирующем устройстве цифровой индикации.

Приборы Краматорского завода тяжелого станкостроения и ЦНИИТМАШа (г. Москва). Почти одновременно с Л. К. Лалетиным на Краматорском заводе тяжелого станкостроения (КЗТС), а затем в ЦНИИТМАШе, были разработаны измерительные устройства с индуктивными круговыми датчиками. Датчики отличаются простотой конструкции и высокой надежностью, но обладают малой

дискретностью. Впервые круговой датчик бы встроен в измерительный ролик.

Индуктивный датчик КЗТС (рис. 8, а) состоит из ротора 3 и статора 1, имеющих соответственно внутренние и наружные эвольвентные зубцы. Статор неподвижно закреплен на оси 2 и имеет кольцевую проточку. В этой проточке помещена электрическая обмотка 5, питание которой осуществляется постоянным током. Провода от обмотки выведены через полую ось 2. Ротор установлен на

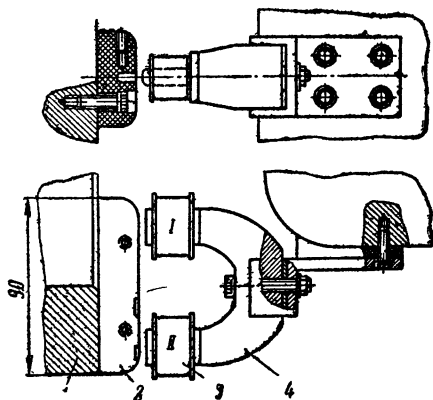


Рис. 9. Датчик командных импульсов  
ЦНИИТМАШ

крышках, сидящих на шарикоподшипниках, и несет на себе измерительный ролик 4. Между вершинами зубьев имеется небольшой зазор. В процессе измерения вместе с измерительным роликом вращается жестко связанный с ним ротор, при этом периодически изменяется суммарный магнитный зазор между вершинами зубьев и в катушке наводится переменное синусоидальное напряжение, частота которого зависит от скорости вращения детали, диаметра ролика и числа зубьев индуктивного датчика. Переменное напряжение блоком формообразования цепи датчика преобразуется в кратковременный импульс напряжения, который подается в счетчик импульсов. Статор индуктивного датчика имеет 300 зубьев, в то время как на роторе нарезано всего 30 зубьев. Цена одного импульса датчика при диаметре ролика 120 мм равна 0,025 мм.

Индуктивный датчик ЦНИИТМАШ (рис. 8, б) принципиально не отличается от датчика КЗТС, однако имеет иное конструктивное оформление и другую техническую характеристику.

Датчик ЦНИИТМАШ за один оборот ролика выдавал в электронный блок 840 импульсов. Диаметр ролика составлял 210 мм. Для обеспечения цены импульса в 0,01 мм приходилось проводить измерения за 25 оборотов измеряемой детали. Запитанный постоянным током индуктивный датчик создавал тормозной момент, поэтому рабочее прижатие измерительного ролика составляло 70—80 кгс.

Позднее, с целью уменьшения длительности измерительного



параллельности осей измерительного ролика и измеряемой детали при любой переустановке измерительного устройства.

Для уменьшения погрешности измерения, появляющейся в результате изменения относительного положения осей вращения ролика и детали, была разработана конструкция измерительного устройства с механизмом самоориентации измерительного ролика относительно образующей измеряемой детали.

В НИИПТМАШе [11] разработано и испытано устройство для стационарной установки на специальном или свободном от резцовой головки суппорте тяжелого токарного станка (рис. 10). Неподвижный источник света 3 (рис. 10, а) и вращающийся делительный диск 4 с непрозрачными радиальными штрихами, закрепленный на одном валу с измерительным роликом 2, создает при вращении модулированный световой поток, направленный на неподвижный фотодиод 5. Возникающие вследствие этого в фотодиоде электрические импульсы поступают в эмиттерный повторитель 6, смонтированный в блоке фотозлектрического датчика измерительного ролика. Эмиттерный повторитель предназначен для согласования выходного сопротивления фотодиода с входным сопротивлением кабеля, по которому сигнал передается на вход усилителя 7 электронного прибора. Частота усиленных сигналов удваивается электронным умножителем 8, собранным на фазоинверсном каскаде с разделительной нагрузкой, выходы которого работают на общую нагрузку через диоды (рис. 10, б).

Режим электронного умножителя обеспечивает во всем рабочем диапазоне частот колебания длительности между  $t_1$  и  $t_2$  не более 5—10%.

После умножения импульсы подаются в усилитель 9 (рис. 10, а), чтобы получить необходимый по величине сигнал для запуска формирующего каскада 10. Сформированные импульсы поступают в счетчик 11. Результат счета импульсов читается против светящихся точек на декартонах. Управление началом и окончанием измерения, т. е. счет импульсов, осуществляется счетчиком 12.

Датчиком числа оборотов измеряемой детали служит неподвижный фотодиод 15, который принимает световой поток неподвижного источника 17, модулированный флажком 16, жестко закрепленным на планшайбе станка. Световые импульсы в фотодиоде 15 преобразуются в электрические и поступают через переключатель 14 в усилитель 13. Усиленные сигналы формируются каскадом 18, дифференцируются и запускают счетчик 12 числа оборотов детали.

Связи между счетными ячейками в счетчике и связи в счетных ячейках со входами формирующих каскадов 10 и 18 выбраны таким образом, что в исходном состоянии вход формирующего каскада 18 открыт, а вход формирующего каскада 10 закрыт.

Первый импульс с датчика числа оборотов детали приводит счетчик 12 в такое положение, при котором вход формирующего каскада 10 открывается, и счетчик 11 начинает считать импульсы, поступающие с датчика измерительного ролика. Счет импульсов продолжается в течение времени четырех оборотов детали, т. е. до возникновения в датчике числа оборотов детали пятого импульса (второй, третий, четвертый импульсы не влияют на общее состояние схемы). Этот импульс приводит счетчик 12 в такое положение, при котором входы формирующих каскадов 10 и 18 закрываются и счет импульсов прекращается. В таком запертом состоянии схема может находиться сколь угодно долго.

Для проведения повторного измерения необходимо схему привести в исходное состояние, что достигается нажатием кнопки 19 «сброс». Повторное измерение начнется в тот момент, когда после нажатия кнопки «сброс» в цепи счетчика пройдет первый импульс с датчика числа оборотов детали.

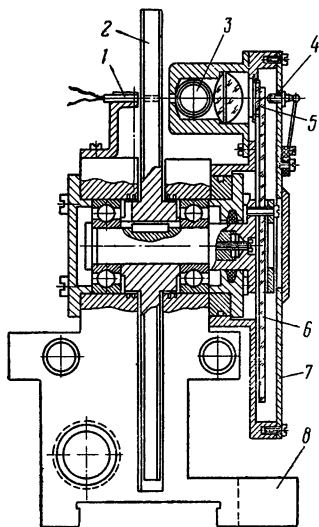


Рис. 11. Измерительная головка стационарного устройства ИД-2

В устройстве ИД-2 предусмотрен контроль исправности электронного прибора и датчика измерительного ролика. Для осуществления этого контроля переключатель 14 переводится в положение, при котором на вход усилителя цепи счета числа оборотов детали включается неподвижный фотодиод 1, который представляет собой совместно с неподвижным источником света 3 и отверстием во вращающемся измерительном ролике 2 датчик числа оборотов измерительного ролика.

При работе в режиме контроля показание счетчика 11 должно быть равно диаметру измерительного ролика  $201,60 \pm 0,01$  мм. Измерительный ролик 2 (рис. 11) установлен на одном валу со стеклянным диском 6, на котором нанесена круговая решетка с 2520 непрозрачными радиальными штрихами. На корпусе 8 закреплен кожух диска 7, несущий на себе фотодиод 4, осветитель 3 и круговую решетку 5, которая является копией решетки диска 6. Осветитель расположен между кожухом диска и измерительным роликом и в процессе работы датчика испускает два пучка света в противоположных направлениях. Один световой пучок, проходя через систему линз осветителя, решетку 5 и диск 6, попадает на фотодиод 4 (ФД-1) и, модулируясь штрихами при вращении диска, создает в фотодиоде импульсы, количество которых пропорционально углу поворота измерительного ролика. Второй световой пучок проходит через отверстия в корпусе осветителя и измерительном ролике и попадает на фотодиод 1 (ФД-2), закрепленный на корпусе датчика.



Так как в измерительном ролике предусмотрено только одно отверстие, то во время проверки работы электронной части устройства при вращении ролика ФД-2 имитирует работу датчика числа оборотов детали (выдает командные импульсы в отсчетное устройство). При проверке, так же как и при измерении детали, считывание импульсов происходит строго за четыре оборота диска.

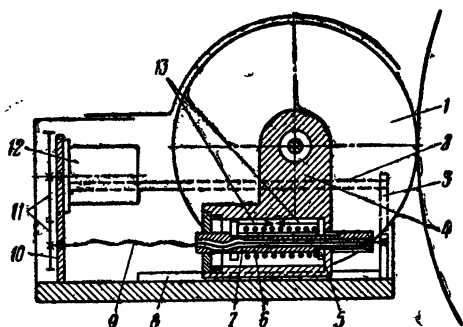


Рис. 12. Механизм перемещения и прижатия ролика ИД-2

Механизм перемещения и прижатия ролика к измеряемой детали состоит из реверсивного электродвигателя со встроенным редуктором, зубчатой передачи, ходового винта, расположенного в корпусе пружинного механизма, прижатия, направляющих, по которым перемещается датчик.

Механизм подвода-отвода ролика 1 (рис. 12) состоит из двух верхних цилиндрических направляющих 2, закрепленных в стойках 3 и 10 и нижней прямоугольной направляющей 8, фиксируемой двумя регулируемыми бронзовыми планками. Цилиндрические направляющие сопряжены с бронзовыми втулками, запрессованными в корпусе измерительной головки 4. Реверсивный электродвигатель 12 через зубчатую передачу 11 приводит во вращение ходовой винт 9, перемещающий удлиненную маточную гайку 7, размещенную внутри корпуса. Гайка имеет некоторую свободу перемещения относительно корпуса датчика в осевом направлении. Гайка имеет буртик для упора предварительно сжатой пружины 6, ограниченной с другой стороны скользящей шайбой 5, упирающейся в стенку полости в корпусе датчика со стороны измеряемой детали.

Предварительное сжатие пружины выбрано в соответствии с силой сопротивления перемещению датчика к измеряемой детали, усилие от гайки через пружину передается на корпус датчика. После упора измерительного ролика в измеряемую деталь или корпуса датчика в специальный упор, если расстояние до детали превышает ход датчика, датчик останавливается и гайка перемещается вперед, сжимая пружину до такой степени, пока кулачок, закрепленный на скользящей шайбе 5, не переключит конечного выключателя 13, установленного на маточной гайке 7. При этом выключается электродвигатель и включается зеленая лампочка на панели электронного прибора.

Регулировка усилия прижатия измерительного ролика к измеряемой детали (10 кгс) осуществляется изменением положения конечного выключателя.

Для отвода датчика от детали переключатель рода работ на панели электронного прибора ставится в положение «Выкл.». При этом электродвигатель вращается в обратном направлении, гайка перемещается до упора в корпус, и датчик отводится назад.

В блоке измерительного ролика смонтирован эмиттерный повторитель, а снаружи закреплен разъем для присоединения кабеля. Передняя подвижная часть кожуха закреплена на корпусе датчика и телескопически надвигается на заднюю. Корпус блока измерительного ролика прикрепляется к специальной плите, устанавливаемой на резцедержателе станка. Плита имеет два симметричных поперечных призматических паза, в которые входят ориентирующие выступы основания блока измерительного ролика, что обеспечивает постоянство ориентации блока относительно плиты.

Лабораторные испытания показали, что прибор ИД-2 при линейных скоростях поверхности измеряемой детали 5—20 м/мин имеет довольно стабильные результаты измерений (рассеивание не более  $\pm 0,02$  мм).

Промышленные испытания показали, что при установке измерительного блока на нерабочем суппорте устройство может обеспечить измерение диаметров свыше 2000 мм и по 3-му классу точности в режиме чистовой обработки измеряемой поверхности.

Проведенные НИИПТМАШем на Новокраматорском заводе сравнительные испытания показали, что точность измерения устройствами с самоориентацией измерительного ролика относительно поверхности измеряемой детали (соответствие показаний действительному размеру) более высокая, чем у устройств без самоориентации. Первые модели приборов НИИПТМАШа с самоориентацией измерительного ролика имели два ролика; один измерительный со встроенным датчиком импульсов, а второй — ведущий [14]. Громоздкость конструкции измерительной головки, непригодность ее для измерения внутренних цилиндрических поверхностей и другие недостатки привели к тому, что в последних моделях приборов НИИПТМАШа использована схема однороликового механизма для самоориентации. На базе этой схемы создан прибор ИД-6.

Датчик измерительных импульсов прибора ИД-6 (рис. 13) вмонтирован в ролик 1 диаметром 100,8 мм, который непосредственно связан с ротором 2. Ротор с внутренними зубьями установлен в крышках 3, 4 с помощью шарикоподшипников. Между крышками помещена текстолитовая катушка 5 с обмоткой 6, неподвижно закрепленная на оси датчика, и зубчатый блок 7 с наружными зубьями. На текстолитовой катушке имеются три оси, на которых установлены промежуточные зубчатые колеса, зацепляющиеся с зубчатым венцом измерительного ролика и малым зубчатым колесом блока 7.

При вращении измерительного ролика посредством внутреннего зубчатого венца трёх промежуточных зубчатых колес 8, малого венца блока 7 приводится во вращение большой зубчатый венец блока 7, что обеспечивает ускоренное вращение статора в направлении, противоположном вращению ротора. Поэтому за один оборот измерительного ролика датчик выдает 2520 импульсов. Для обеспечения цены импульса 0,01 мм измерение производится за два оборота ролика. В значительной мере происходит усреднение шаго-

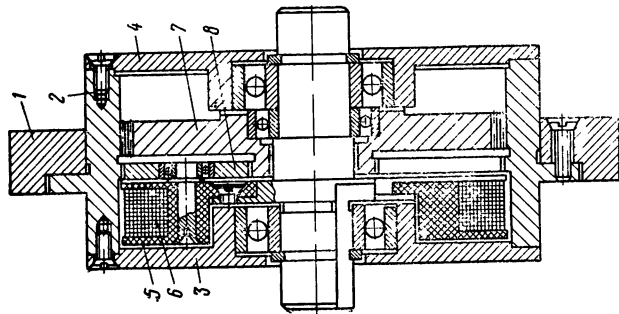


Рис. 13. Индуктивный датчик-ролик ИД-6

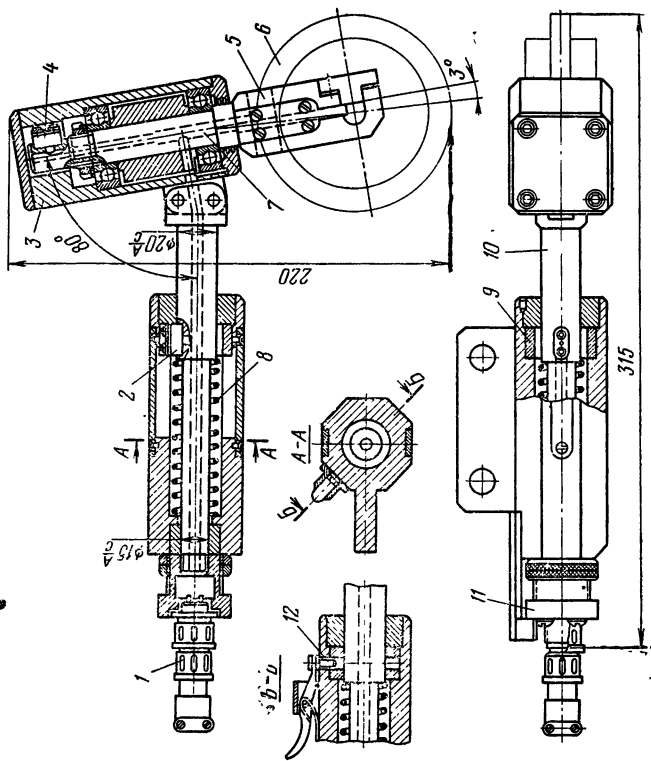
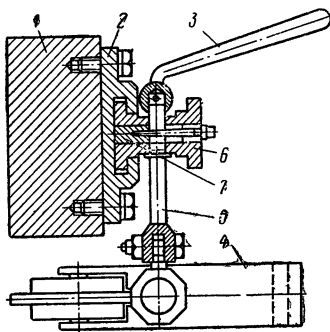


Рис. 14. Измерительная головка ИД-6

вой погрешности импульсообразующих зубьев, а наличие трех параллельно работающих промежуточных зубчатых колес приводит к частичному усреднению погрешности кинематического редуктора.

Усилие прижатия ролика к измеряемой детали составляет 20—25 кгс. Измерительный ролик установлен в вилке 5, которая может свободно поворачиваться вокруг двух пересекающихся осей 7 и 10 (рис. 14). Ось качания, направленная нормально к поверхности из-

Рис. 15 Установочное приспособление ИД-6



меряемой детали, нагружена цилиндрической пружиной 8, создающей усилие прижатия ролика к детали. На конце оси 10 размещены указатель 11 с сигнальным контактом заданного усилия прижатия ролика 6 и кабельный разъем 1. Провод, соединяющий кабельный разъем с датчиком, уложен внутри осей 7 и 10 и вилки 5. Качающиеся части головки сбалансированы корпусом 3.

Допустимый угол качания ролика относительно осей 7 и 10 ограничивается двумя специальными шпонками 2 и 4 (рис. 14), заблокированными с контактами сигнализации перекоса ролика. Если перекос ролика превышает величину зазора в шпонках, контактная пластинка, прикрепленная к шпонке, соприкасается со стенкой шпоночного паза и на панели электронного счетчика загорается красная лампочка, запрещающая проведение измерений.

Ограничительная шпонка 2 в переднем положении входит в прорезь поворотного кольца 9. При изменении направления вращения измеряемой детали нажимом на рычаг фиксатора 12 это кольцо раскрепляется и измерительная головка поворачивается на 180°.

Перед измерениями измерительная головка устанавливается на тыльной стороне резцедержателя с помощью установочного приспособления, снабженного эксцентриковым зажимом. Это избавляет при проведении измерений от снятия и повторной установки резца на используемом для контроля суппорте.

Установочное приспособление (рис. 15) состоит из плоской со сквозным горизонтальным Т-образным пазом плиты 2, устанавливаемой на резцедержателе 1 и кронштейне 5 с Т-образной направляющей 6. Установочная плита постоянно закреплена на задней плоскости резцедержателя, что уменьшает вероятность повреждения ее стружкой. К кронштейну 5 прикрепляется измерительная головка 4. Кронштейн фиксируется на резцедержателе с помощью рукоятки 3 и эксцентрика 7. Регистрирующее устройство прибора ИД-6 выполнено на базе декартовой индикации с применением декартонов ОГ-3 и ОГ-8.

Функциональная схема регистрирующего устройства поясняется схемой, представленной на рис. 16. К измеряемой детали 1 с помощью самоустанавливающейся измерительной головки прижимается измерительный ролик 2, внутри которого размещен высокочастотный индуктивный датчик угла поворота ролика. На станине 19

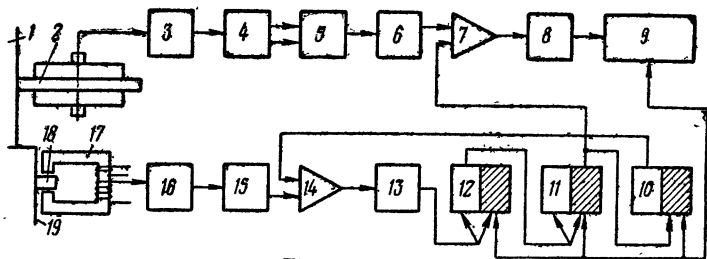


Рис. 16. Функциональная схема прибора ИД-6

станка размещен старт-стопный датчик. Он состоит из незамкнутого сердечника 17 с обмоткой. При прохождении флажка 18 между полюсами сердечника происходит замыкание магнитного потока через воздушный зазор. Индуцируемый при этом в обмотке электрический импульс используется как управляющий в электронно-счетном устройстве. В состав регистрирующего устройства входят каналы обработки информации от датчика измерительного ролика и старт-стопного датчика, схема управления и шестиразрядный десятичный счетчик импульсов. Канал датчика измерительного ролика состоит из усилителя импульсов 3, двухкаскадного усилителя 4, фазоинвертора 5, формирователя 6, определителя 7 момента перехода сигнала через нуль, импульсного усилителя 8, счетчика 9; канал старт-стопного датчика — из усилителя 16, формирователя 15, блока запрета 14, импульсного усилителя 13 и управляющих триггеров 10, 11 и 12.

Взаимодействие элементов блок-схемы при измерении происходит следующим образом. Перед измерением схемы устанавливаются в исходное состояние, при котором индикаторы счетчика 9 показывают нуль, а триггеры 10, 11 и 12 — в положение, показанное на блок-схеме (проводящий транзистор обозначен заштрихованным треугольником). При этом в блок 7 подается сигнал, запрещающий поступление импульсов в счетчик 9. Сигнал старт-стопного датчика после усиления в усилителе 16 поступает в формирователь 15, на выходе которого формируется импульс. Последний после прохождения через блок запрета 14 и импульсный усилитель 13 опрокидывает триггер 12, который опрокидывает триггер 11, в результате чего на блок 7 подается сигнал, разрешающий прохождение импульсов на вход счетчика 9.

После полного оборота планшайбы станка сигнал с старт-стопного датчика возвращает триггер 12 в исходное состояние (состояние триггеров 10 и 11 не измеряется).

По завершении второго оборота следующий сигнал датчика опрокидывает триггер 12, в связи с чем опрокидываются триггеры 10 и 11 и прекращается поступление разрешающих сигналов из бло-

ков совпадения 7 и 14; вследствие этого прекращается поступление сигналов старт-стопного датчика в триггеры 10, 11 и 12 и счетчик 9. На этом цикл измерения заканчивается, а результат измерения, т. е. величина диаметра измеряемой детали, фиксируется на табло счетчика 9.

В приборе ИД-7 применено регистрирующее устройство с цифровой индикацией, что позволило улучшить его эксплуатационные качества. Одновременно усовершенствована конструкция измерительной головки [13].

Принципиальная схема каналов обработки информации, поступающей от датчиков в регистрирующее устройство прибора ИД-7, показана на рис. 17. Сигнал с датчика диаметра через конденсатор  $C_{17}$  поступает в двухкаскадный усилитель, собранный на транзисторах  $T_{13}$  и  $T_{14}$  по схеме с общим эмиттером. С выхода усилителя сигнал через емкость  $C_{19}$  подается в фазоинверсный каскад, выполненный на транзисторах  $T_{15}$  и  $T_{16}$  по балансной схеме, нагрузкой которого служит вход определителя перехода сигнала через «0», представляющий собой мост с плечами в виде транзисторов  $T_{17}$  и  $T_{18}$  и резисторов  $R_{63}$  и  $R_{66}$ . В диагональ моста включена цепь, состоящая из диодов  $D_7$  и  $D_8$ , которые совместно с резистором  $R_{69}$  и диодом  $D_9$  работают в схеме «И» на два входа. При отсутствии сигнала на базах транзисторов  $T_{17}$ ,  $T_{18}$  сигнал на выходе схемы «И» имеет максимальную величину, а при подаче сигнала на вход потенциал одного из коллекторов транзисторов  $T_{17}$  или  $T_{18}$  (зависит от фазы сигнала) понижается и соответственно уменьшает выходное напряжение схемы «И».

Ввиду большого коэффициента усиления усилителя и значительной величины напряжения входного сигнала насыщение транзисторов происходит на малом участке нарастания входного напряжения, в результате чего момент перехода сигнала через «0» фиксируется с достаточно высокой степенью точности.

За период  $T$  сигнал два раза достигает нулевого значения, поэтому происходит удвоение частоты следования сформированных импульсов по сравнению с частотой синусоидального напряжения, подаваемого на вход определителя. Положительные импульсы через конденсатор  $C_{23}$  поступают на вход усилителя, выполненного на транзисторе  $T_{19}$ , и далее на схему совпадения. Схема совпадения выполнена на транзисторах  $T_{20}$  и  $T_{23}$  и имеет два входа: импульсный вход—база транзистора  $T_{20}$ , и потенциальный вход—база транзистора  $T_{23}$ . С выхода схемы совпадения сигнал поступает на вход формирующего каскада (транзисторы  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ ), представляющего собой триггер Шмидта. Сформированный сигнал выдается на вход счетчика.

Сигнал старт-стопного датчика поступает на вход усилителя, собранного на транзисторе  $T_1$  по схеме без начального смещения. Вследствие этого положительная полуволна сигнала датчика диаметра ограничивается, а отрицательная — после усиления подается через конденсатор  $C_1$  на вход триггера Шмидта. Резистор  $R_6$  служит для установки уровня срабатывания последнего. Перепад напряжения на коллекторе транзистора  $T_4$  дифференцируется цепочкой  $C_3R_{12}$ , и положительный импульс через диод  $D_1$  поступает на схему совпадения, выполненную на транзисторах  $T_5$  и  $T_{24}$ . Из схемы совпадения через конденсатор  $C_8$  импульс поступает в усилитель, выполненный на транзисторе  $T_6$ , из которого — на вход логической схемы.

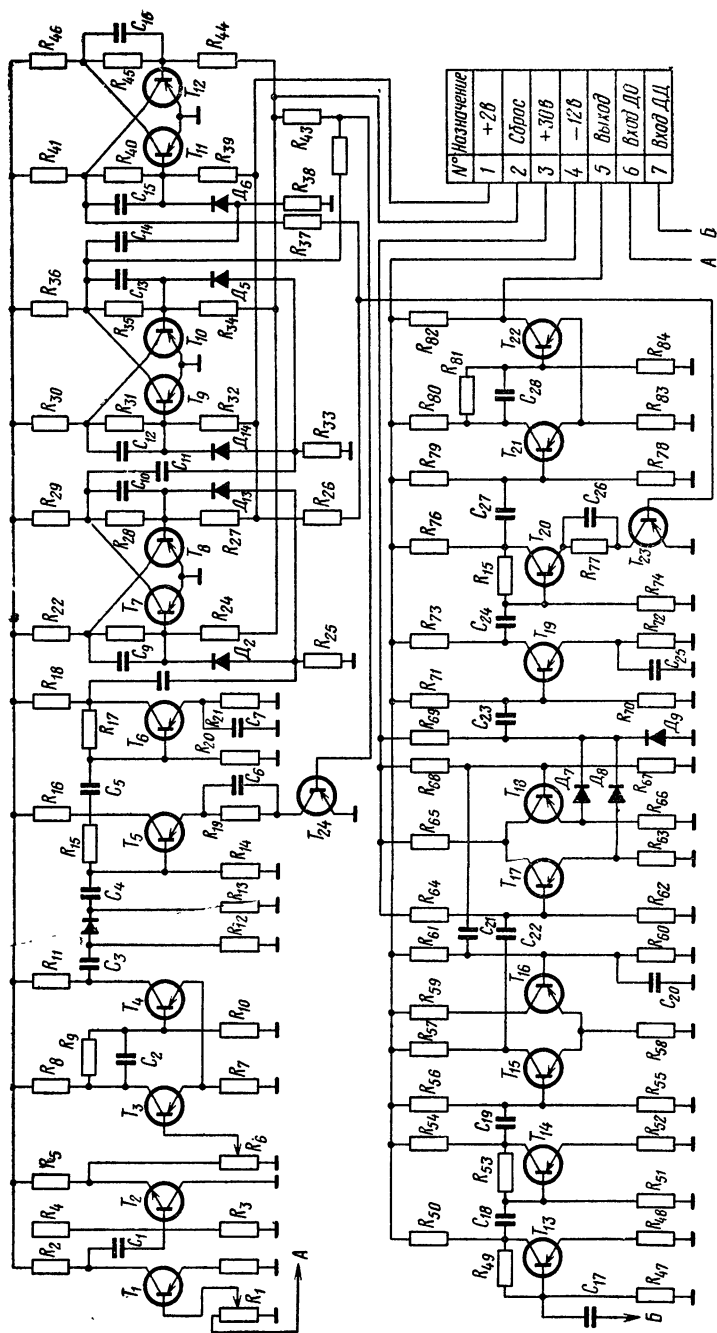


Рис. 17. Принципиальная схема канала обработки информации прибора ИД-7

Логическая схема предназначена для счета числа оборотов детали и управления схемами совпадения в блоках каналов датчиков диаметра и оборотов деталей. В схему входят три триггерных ячейки на транзисторах  $T_7$ — $T_{12}$ , выполненные по схеме с независимым смещением. Установка триггеров в исходное состояние производится отсоединением сопротивления смещения базы транзистора одного из плеч триггера от источника положительного смещения и подачей на него напряжения — 12,6 в.

Напряжение для управления схемами совпадения снимается непосредственно с плеч триггеров. Соединения между триггерными ячейками и точки снятия управляющего напряжения выбраны таким образом, чтобы обеспечить работу прибора согласно приведенной в описании блок-схеме.

Схема пересчетной ячейки счетчика и индикации представлена на рис. 18. Импульс положительной полярности, сформированный в канале датчика диаметра, дифференцируется цепью  $C_{13}$ ,  $R_{61}$  и в виде положительного импульса небольшой длительности подается через диоды  $D_2$  и  $D_3$  на базы первого триггера  $T_{18}$ ,  $T_{19}$ . Такой импульс приводит к кратковременному запирающему транзисторов. В следующий момент, после прекращения импульса, триггер опрокидывается и проводящим становится транзистор, который до этого был заперт. Действительно, если проводящим являлся транзистор  $T_{18}$ , то напряжение на конденсаторе  $C_2$  было меньше, чем на конденсаторе  $C_1$ , и, следовательно, после прекращения пускового импульса, когда оба транзистора заперты, проводящим станет транзистор  $T_{19}$ , у которого коллектор имеет большой отрицательный потенциал.

Первый триггер ( $T_{18}$ ,  $T_{19}$ ) после каждого второго импульса передает пусковой импульс на следующий триггер ( $T_{20}$ ,  $T_{21}$ ), при этом выходные импульсы первого триггера передаются через емкость  $C_{12}$  на базу транзистора  $T_{25}$ . Так как этот транзистор заперт, то он никакого действия на работу схемы не оказывает.

При поступлении на вход декады семи импульсов транзисторы  $T_{19}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{23}$  оказываются в проводящем состоянии. Восьмой импульс опрокидывает первые три триггера в исходное состояние, при этом положительный перепад напряжения с коллектора транзистора  $T_{22}$  через дифференцирующую цепь  $C_9$ ,  $R_{64}$  опрокидывает четвертый триггер ячейки (транзисторы  $T_{24}$ ,  $T_{25}$ ). При опрокидывании четвертого триггера на коллекторе транзистора  $T_{24}$  возникает высокий отрицательный потенциал, который через сопротивление  $R_{62}$  запирает пусковые диоды  $D_4$  и  $D_5$  второго триггера.

Следующий девятый импульс приводит триггер (транзисторы  $T_{18}$ ,  $T_{19}$ ) в состояние, когда проводящим оказывается транзистор  $T_{19}$ . С приходом десятого импульса первый триггер опрокидывается в первоначальное состояние, при этом положительный фронт напряжения с коллектора транзистора  $T_{18}$  после дифференцирования цепочкой  $C_{12}$ ,  $R_{65}$  опрокидывает четвертый триггер (транзисторы  $T_{24}$ ,  $T_{25}$ ), и все четыре триггера устанавливаются в исходное состояние. Положительный перепад напряжения с коллектора транзистора  $T_{24}$  подается на выход, где после дифференцирования он запускает первый триггер следующей пересчетной ячейки. Таким образом, блок, состоящий из четырех триггерных ячеек, с помощью обратных связей производит деление поступающих в него импульсов на 10, выдавая один из десяти импульсов на выход. Для визуального контроля числа импульсов, подаваемых в пересчетную ячейку (в пределах от



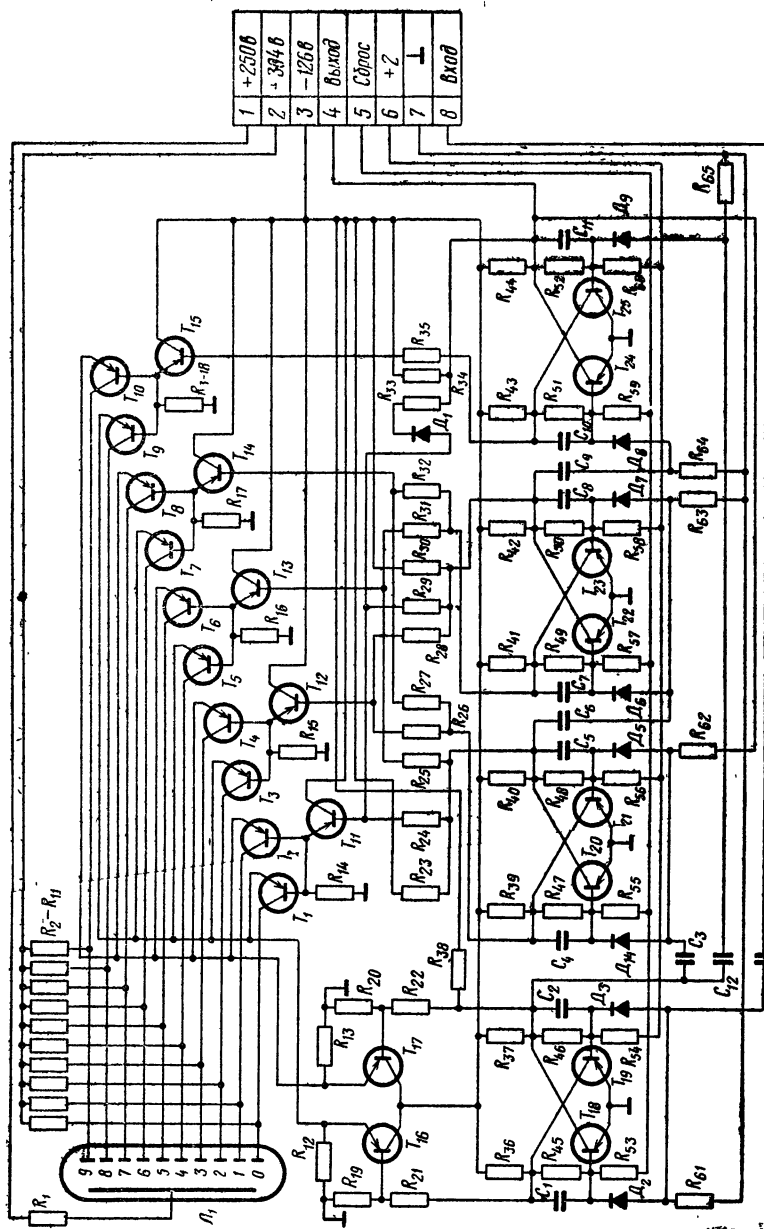


Рис. 18. Принципиальная схема пересчетной ячейки и индикации прибора ИД-7

0 до 9), применена цифровая индикаторная лампа ИН-1, которая управляется дешифратором.

На триггерных ячейках каждая из десяти цифр закодирована в виде определенного чередования проводящих и запертых триггерных транзисторов. Дешифратор должен оставить открытым только один из десяти транзисторов поджигания  $T_1—T_{10}$ , и, следовательно, загорится только одна цифра в индикаторной лампе ИН-1.

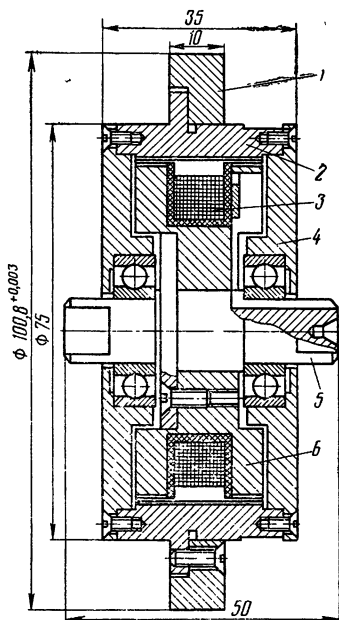


Рис. 19. Индуктивный датчик-ролик ИД-7М

Дешифратор состоит из эмиттерных повторителей, собранных на транзисторах  $T_{16}$ ,  $T_{17}$ , которые служат для усиления мощности сигнала с первого триггера и питания эмиттерных цепей транзисторов поджигания  $T_1$ ,  $T_{10}$  и цифровой индикаторной лампы ИН-1. Эмиттерные повторители ( $T_{11}—T_{15}$ ) прекращают поступление токов в коллекторные цепи триггеров. Работу дешифратора рассмотрим на конкретном примере. Допустим, что в декадном счетчике хранится число, соответствующее цифре 3. Это должно вызвать свечение цифры «Три» на индикаторе, что соответствует проводящему состоянию транзистора  $T_4$ , для чего требуется подать положительное напряжение на базу  $T_4$  и отрицательное — на его эмиттер. Все остальные транзисторы поджигания заперты по эмиттеру или базе, или по тому и другому одновременно. Проводящий транзистор поджигания снижает потенциал соответствующего катода цифрового индикатора ИН-1 до нуля. Остальные девять катодов имеют потенциал  $+30$  в и не светятся.

При кратковременных измерениях диаметров деталей датчики приборов ИД-6 и ИД-7 с механическим умножением импульсов при

помощи встроенного планетарного редуктора работали удовлетворительно.

Однако при длительных измерениях, которые могут потребоваться, если приборы будут использоваться для активного контроля, заметно влияние нагревания датчика в основном в результате работы зубчатых передач.

В связи с этим в модели прибора НИИПТМАШа ИД-7М применены безредукторный датчик и электронный умножитель. Датчик

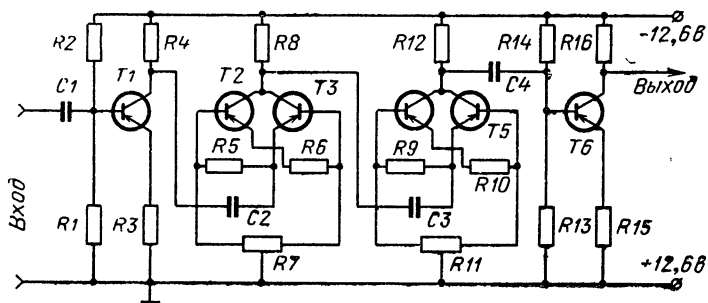


Рис. 20. Принципиальная схема умножителя импульсов

(рис. 19) вмонтирован в измерительный ролик 1 диаметром 100,8 мм, который непосредственно связан с ротором 2 датчика. Ротор установлен на крышках 4. Между крышками помещен неподвижно закрепляемый на оси 5 статор 6 с электрической обмоткой 3. На внутренней поверхности ротора нарезано 210 импульсообразующих зубьев модуля 0,3 мм с заостренными вершинами; на наружной поверхности статора — 630 зубьев модуля 0,1 мм. Между вершинами зубьев статора и ротора имеется зазор величиной 0,01—0,03 мм.

Рабочее усилие прижатия измерительного ролика к измеряемой детали составляет 25 кгс.

Для получения количества импульсов, соответствующего 0,01 мм, при двухоборотном измерении необходимо иметь 5040 импульсов за один оборот ролика. Для обеспечения этих условий в приборе ИД-7М применен электронный восьмикратный умножитель.

Удвоение импульсов осуществлялось и ранее в индикаторе перехода сигнала через нуль. Умножение на 4 производится схемой (рис. 20), собранной на шести транзисторах, включенной в цепь перед удвоителем<sup>1</sup>.

Транзистор  $T_1$  является усилителем сигнала датчика. Транзисторы  $T_2$  и  $T_3$  образуют удвоитель частоты без фазосдвигающего трансформатора. Коллекторы транзисторов  $T_2$  и  $T_3$  подсоединены к общей нагрузке, а их базы и эмиттеры соединены крестообразно. Поэтому положительная полуволна сигнала отпирает один транзистор, а второй в это время находится в запертом состоянии. В результате на общей коллекторной нагрузке образуется положительный импульс. Когда фаза сигнала изменится на  $180^\circ$ , оба транзистора изменят свои состояния и на общей нагрузке опять появится положительный импульс. Таким образом, за период прохождения вход-

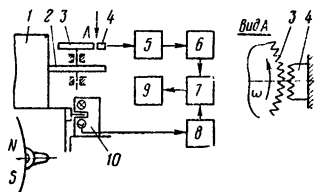
<sup>1</sup> Разработана инж. Костецким Ю. И.

ного сигнала на выходе будут появляться два положительных импульса, т. е. частота импульсов будет удваиваться.

Аналогично работают и транзисторы  $T_4$  и  $T_5$ .

**Приборы Львовского политехнического института.** Известный интерес представляют приборы ИБД-1, ИБД-2 и ИБД-3, разработанные во Львовском политехническом институте (ЛПИ).

Рис. 21. Схема датчика командных импульсов, разработанного ЛПИ



Прибор ИБД-1 выполнен на базе фотоэлектрических датчиков и по принципу действия аналогичен приборам КСХИ ОП-5, ОП-6 и др.

Прибор ИБД-3 отличается от всех вышеописанных тем, что в качестве импульсообразующего элемента в нем использован круговой емкостной датчик (рис. 21), представляющий собой диск 3 с 1800 зубьями, рядом с которым укреплен неподвижно зубчатый сектор 4 с 250 зубьями, обращенными к зубьям диска. Диск 3 и сектор 4 образуют переменный конденсатор, емкость которого зависит от относительного положения диска и рейки. Датчик импульсов электрически связан с генератором 5 высокочастотных колебаний (около 3 МГц). При вращении измерительного ролика 2 контролируемой деталью емкость датчика изменяется примерно по синусоидальному закону, что приводит к разбалансу моста генератора с такой же частотой. Эти колебания усиливаются, калибруются, а затем подаются в формирующий каскад 6, где они преобразуются в импульсы прямоугольной формы и попадают в селектор 7. Команда на начало счета измерительных импульсов подается датчиком 10 через формирующий каскад 8. Результаты измерения фиксируются на табло декартронного счетчика 9. Измерение производится за четыре оборота детали.

Отличительной особенностью приборов Львовского политехнического института является использование для установки флажка старт-стопного датчика постоянного магнита, что обеспечивает оперативность его установки на станке. Флажок может устанавливаться как на планшайбе, так и на обрабатываемой детали. Датчик состоит из флажка, основание которого выполнено в виде магнитного прихвата, осветителя и светочувствительного элемента.

Если в приборе ИБД-1 использовался фотоэлектрический датчик с повышающей зубчатой передачей, а в ИБД-3 — емкостной, конструктивно мало отличающийся от индуктивного, то ИБД-2 принципиально отличается от других приборов. В нем применен способ фоторегистрации мгновенных положений лимба в моменты, соответствующие началу и концу одного или нескольких полных оборотов измеряемой детали. Эти моменты фиксируются датчиком, связанным с импульсной лампой и выдающим сигнал точно через один оборот детали<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Кукин Е. И., Рабинович А. Н., Гребень Ю. И. и Траубе Л. В. Устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей Авторское свидетельство № 146497. «Бюллетень изобретений», № 8, 1962

Мгновенная регистрация положений лимба осуществляется фотографированием их на стандартную киноленту с помощью импульсного источника света.

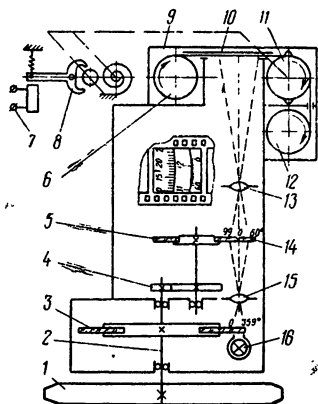


Рис. 22. Схема прибора ИБД-2

Схема прибора ИБД-2 приведена на рис. 22. Обкатывающийся по обрабатываемой детали измерительный ролик 1 жестко закреплен на валу 2, вращающемся в подшипниках. На этом валу посажен лимб 3 отсчета долей оборота, который вращается вместе с роликом 1. Вращение вала 2 передается через понижающую передачу 4 лимбу 5 счетчика оборотов, размещенному в одной плоскости с нониусом 14. Объектив 15 изображает участок лимба 3 в плоскости нониуса 14. Объектив 13 изображает нониус вместе с участком лимба 3 и участок лимба 5 в плоскости расположения светочувствительного материала. Под лимбом 3 в экране закреплена импульсная лампа 16, при помощи вспышек которой регистрируются мгновенные положения двух лимбов на фотопленке. Фоторегистратор 9 содержит стандартную фотокассету 6 с запасом пленки, которая через фильмовый канал 10 подается зубчатым барабаном 11 в приемную кассету 12.

Привод зубчатого барабана осуществляется от электромагнитного реле плунжерного типа МР-2 через спусковой механизм 8, управляемый электромагнитом 7 одновременно со вспышкой импульсной лампы.

Приемная кассета фоторегистратора снабжена отрезным ножом для перерезания пленки и легко снимается, что позволяет быстро обработать документ.

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ С УЧЕТОМ НЕКРУГЛОСТИ

Для измерения диаметра детали с учетом некруглости в НИИПТМАШе разработан опытный прибор, который может показывать максимальный диаметр и величину разности полуосей эллипса. Это достигается путем ввода в показания измерительного ролика — датчика, характеризующего величину среднего диаметра измеряемой

детали, поправки, равной величине отклонения фактического диаметра детали от полученного среднего диаметра<sup>1</sup>.

Прибор выполнен на базе фотоэлектрического датчика (рис. 23) с круговой решеткой. Измерительный ролик 13 и диск 14 с круговой решеткой посажены на одном валу, расположенном в корпусе 12

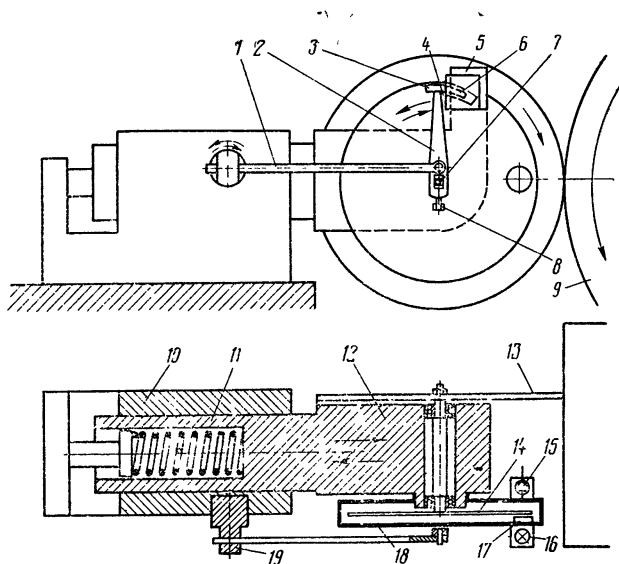


Рис. 23. Схема измерительной головки для контроля диаметров с учетом некруглости

устройства. Корпус устанавливается в направляющих установочного приспособления 10, при помощи которого ролик прижимается к измеряемой детали 9. Диск закрыт кожухом 18, на котором установлен осветитель 16, фотоэлемент 15 и решетка 17. Для введения поправки на неточность формы поперечного сечения измеряемого вала фотоэлемент, осветитель и неподвижная решетка установлены в кожухе 18, который может поворачиваться вокруг оси диска 14 и при измерении давать дополнительные числа импульсов, соответствующие вносимой поправке. Корпус 12 связан при помощи рычажной передачи 1, 2 с неподвижным основанием 10 прибора, которое устанавливается на суппорте станка. Ось вращения рычага 2 совмещена с осью вращения диска 14. Отношение плеч рычага 2 обеспечивает

<sup>1</sup> Иванов Б. Н. и Мельничук В. А. Способ измерения диаметра изделия методом обкатки мерным роликом и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство № 147326, кл. 42в. «Бюллетень изобретений», № 10, 1962.

необходимое передаточное отношение для внесения поправки в счет импульсов. Передаточное отношение регулируется винтом 8.

Верхнее плечо рычага 2 зажато между жестким упором 4, укрепленным на кронштейне 5 корпуса и упором 3, жестко связанным с кожухом 18 диска 14. Упор 3 является одновременно сердечником электромагнита 6, укрепленного на кронштейне 5. Рычаг 2 шарнирно связан с тягой 1; левый конец его соединен с неподвижным основанием 10 посредством поворотной втулки 19 с тягой 1, проскальзывающей при усилиях, превышающих предварительно заданные натяжения (известный принцип [37] плавающего контакта).

В процессе измерения диаметра вала, имеющего эллипсность поперечного сечения, подпружиненная часть устройства перемещается на величину, равную разности длин полуосей эллипса, которая соответствует разности между максимальным и средним диаметрами измеряемой детали. Это перемещение используется для ввода поправки в показания прибора посредством рычажной передаточной, которая в процессе измерения перемещает фотозащелку, решетку и осветитель в направлении, противоположном вращению диска.

Перед измерением включается электромагнит 6, прижимающий посредством упора 3 рычаг 2 к жесткому упору 4. После начала отсчета электромагнит выключается. Начало измерения может соответствовать двум случаям.

Если ролик находится в контакте с деталью на участке, где ее радиус-вектор увеличивается, подвижная часть установочного приспособления с закрепленным на ней датчиком в процессе измерения будет перемещаться влево. Верхний конец рычага 2 упрется в жесткий упор 4. Рычаг 2 после этого начнет перемещаться вместе с корпусом 12 параллельно своему положению. Перемещаясь влево, он передвинет тягу 1 в «плавающей» втулке 19, закрепленной на неподвижном основании приспособления. Скольжение в плавающей втулке будет происходить до тех пор, пока радиус-вектор поверхности, проходящий через оси вращения измеряемой детали и измерительного ролика, не перестанет увеличиваться. При дальнейшем повороте измеряемого изделия, под воздействием прижимной пружины 11, начинается движение вправо; рычаг 2 поворачивается вокруг оси 7, так как сопротивление повороту кожуха 18 значительно меньше сопротивления в «плавающей втулке». Верхний конец рычага 2 толкает влево упор 3 кожуха 18, вызывая поворот кожуха с блоком «осветитель—решетка—фотозащелка» в направлении, противоположном вращению диска. После прохождения измерительного ролика через точку минимального диаметра изделия свободный верхний конец рычага 2 возвращается к упору 4, оставив кожух смещенным на необходимую для компенсации счета величину.

Если начало измерения совпадает с участком, на котором происходит уменьшение радиуса-вектора поверхности измеряемой детали, то процесс будет происходить вначале в обратном порядке, т. е. сначала кожух сместится на какую-то долю поправки, а затем процесс измерения будет происходить в указанном выше порядке. Во всех случаях результат будет одинаков: кожух, т. е. база отсчета, к концу измерения будет смещен в направлении, противоположном вращению диска, на величину поправки. Следовательно, на табло электронного счетчика будет зафиксирована цифра, соответствующая максимальному диаметру детали.

После считывания и сброса величины максимального диаметра может быть определена и величина самой поправки. Для этого из-

мерение должно быть проведено с включенным электромагнитом.

Недостатком описанной схемы является то, что на результатах оценки некруглости будет сказываться биение (погрешность положения) детали, которое, как показали опыты, снижает точность измерения, особенно на карусельных станках.

Контролируемая деталь 1, закрепленная на планшайбе карусельного станка 2, приводится во вращение приводом планшайбы станка. Измерительный ролик 13 прибора, головка которого устанавливается на суппорте станка 14, прижимается к поверхности контролируемой детали и, тем самым, приводится во вращение.

Второй, аналогичный первому, ролик-датчик 12 прижимается к технологической проточке планшайбы станка и приводится во вращение. Оба ролика связаны с круговыми датчиками преобразования угла поворота в синусоидальный электрический сигнал.

Напряжение синусоидальной формы с первого датчика поступает в усилитель-формирователь 11, где превращается в последовательность электрических импульсов прямоугольной формы с постоянной амплитудой и длительностью. Сформированные таким образом импульсы поступают в блок 8, преобразующий последовательность электрических импульсов в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного синусоидального напряжения, которое, в свою очередь, пропорционально скорости обкатывания роликом поверхности контролируемой детали. Со второго датчика (ролик 12) сигнал поступает в блоки 10 и 9. Из преобразователей 8 и

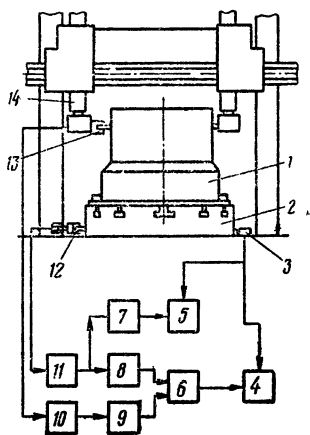


Рис. 24. Схема прибора для измерения диаметров с учетом некруглости

\* Костецкий Ю. И., Иванов Б. Н., Борисов В. В. Устройство для измерения больших диаметров на станке после обработки. Авторское свидетельство № 292056. «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», № 4, 1971.



9 напряжения подаются в блок алгебраического суммирования 6. Алгебраическая сумма входных напряжений прямо пропорциональна разности частот входных сигналов, а следовательно, в данный момент прямо пропорциональна отклонению формы детали от круглости и за полный оборот детали изменяется строго в соответствии с изменением формы детали.

Подавая сигналы, поступающие из сумматора в регистрирующее устройство 4, можно записать результаты измерения некруглости контролируемой детали в виде диаграммы.

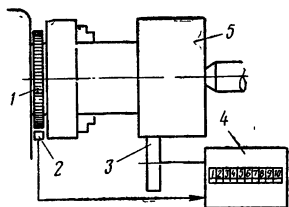


Рис. 25. Схема прибора для измерения некруглости

Измерение диаметра детали происходит следующим образом. Сигнал с блока 11 в виде последовательности прямоугольных импульсов поступает на схему «И» блока 7, на которую от старт-стопного датчика 3 поступает разрешающее напряжение. Далее, после схемы «И» импульсы поступают в цифровое счетное устройство 5, с которого считывается результат измерения диаметра. Одновременно сигнал старт-стопного датчика 3 поступает на самописец 4, второй канал регистрирующего устройства, где фиксируется начало и конец оборота контролируемой детали.

В Бюро взаимозаменяемости (г. Москва) предложен способ измерения крупногабаритных деталей<sup>1</sup>, который позволяет определять диаметр и некруглость. Для определения действительного диаметра и некруглости детали регистрируют числа оборотов измерительного ролика на отдельных равномерно расположенных участках по окружности поперечного сечения детали и суммируют зарегистрированные на одних и тех же участках числа оборотов ролика (рис. 25).

Для осуществления контроля используют делительное устройство 1 с отметчиком 2 и счетный механизм 4, связанный с измерительным роликом 3 и снабженный запоминающим устройством, последовательно суммирующим числа оборотов ролика на одних и тех же участках детали 5.

Усредненное значение радиуса профиля на данном участке определяют по формуле

$$R_i = \frac{dn_i z}{2},$$

где  $R_i$  — средний радиус детали;  $d$  — диаметр измерительного ролика;  $z$  — доля оборота детали, на которой осуществляется измерение ( $z$  — должно быть четным);  $n_i$  — число оборотов детали. Для определения действительного диаметра в данном направлении необходимо сложить радиусы, измеренные на противоположных участках.

Разность между наибольшим и наименьшим диаметрами характеризует некруглость контролируемой детали.

<sup>1</sup> Марков Н. Н. и Палей М. А. Способ измерения цилиндрических крупногабаритных деталей. Авторское свидетельство № 162974, кл 42в, 24. «Бюллетень изобретений», № 11, 1964.

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Общеизвестно, что с увеличением размеров измеряемых деталей свыше 100 мм температурная погрешность становится доминирующей [6].

При измерении диаметров больших деталей в цеховых условиях задача уменьшения влияния температурной погрешности представляет наибольшую сложность.

В 1961 г. была предложена и реализована система [10], осуществляющая ввод дополнительного числа импульсов, соответствующего поправке, равной отклонению максимального диаметра измеряемой детали от среднего путем смещения в процессе измерения базового элемента датчика импульсов.

В КСХИ предложена схема, предусматривающая съем поправочных импульсов с последнего разряда счетчика, выполненного на коммутаторном декатроне, и подачу этих импульсов снова на вход электронного счетчика. Эта схема предназначена для ввода в показания поправки на систематическую погрешность [41].

НИИПТМАШем<sup>1</sup> предложен способ и устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей, при которых можно сравнительно простыми средствами автоматически вводить любую поправку в результат измерения. Обычно при измерении методом обкатывания роликом начало и окончание счета импульсов, выдаваемых датчиком измерительного ролика, определяется временем поступления командных импульсов. Командные импульсы поступают при вполне определенном положении планшайбы станка, на которой укреплена измеряемая деталь, и следуют один за другим через целое число оборотов. Относительная предмеренная задержка выдачи командных импульсов на начало и конец счета измерительных импульсов при этом не предусмотрена.

В устройстве НИИПТМАША задержка начала съема измерительных импульсов осуществляется за счет временного смещения командного импульса на величину, соответствующую поправке, превышающей ее возможное максимальное значение для данного типа прибора и условий измерения, и за счет последующей корректировки времени окончания счета импульсов. Это осуществляется также благодаря временному смещению запирающего командного импульса с

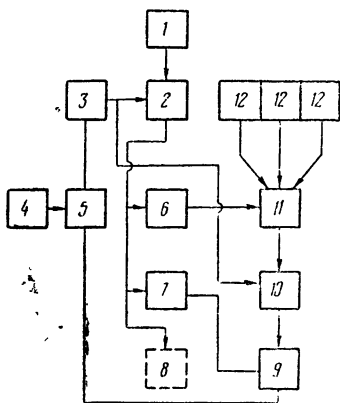


Рис. 26. Схема устройства для ввода поправок при измерении диаметров

<sup>1</sup> Мельничук В. А., Костецкий Ю. И. и Иванов Б. Н. Способ измерения диаметров цилиндрических изделий. Авторское свидетельство № 258625, кл. 42 в. «Бюллетень изобретений», № 1, 1970.

помощью суммарного управляющего воздействия (например, в виде выходного напряжения, определенного для заданной поправки величины) выдаваемого датчиками и задатчиками поправок.

Командный импульс датчика 4 (рис. 26) запуска электронного счетчика 8 подается в блок задержки 5, чем обеспечивается задержка срабатывания триггера 3, управляющего схемой 2 начала счета измерительных импульсов, выдаваемых датчиком 1 измерительного ролика. При этом промежуток времени, в течение которого происходит задержка, заведомо больше, чем время, необходимое для последующего поступления с датчика измерительного ролика количества импульсов, соответствующего наибольшей возможной суммарной поправке. Этот же задержанный импульс включает схему 10 и открывает схему сумматора 11 и выход на умножителе 9. Сумматор получает напряжения от корректирующих датчиков и задатчиков 12.

В процессе измерения диаметра на сумматор 11 подается также корректирующее напряжение с блока 6, преобразующего частоту следования измерительных импульсов в напряжение.

Выходное напряжение сумматора поправок через схему «И» (блок 10) подается на умножитель 9, в котором оно перемножается с напряжением, пропорциональным количеству импульсов, снимаемых с входа счетчика за время измерения (выходное напряжение блока 7 коррекции).

Выходное напряжение блока 9 поступает в блок 4 задержки и является управляющим воздействием, изменяющим ее длительность, что обеспечивает ввод результирующей поправки в показания прибора после запуска блока задержки конечным импульсом датчика оборотов детали (стоп-импульсом).

УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЛИН  
И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙУСТРОЙСТВА  
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛИН  
ПРОКАТЫВАЕМОГО МЕТАЛЛА

Метод обкатывания роликом нашел практическое применение в ряде устройств, созданных в Краматорском НИИПТМАШе, для измерения длин листов, а также для повышения точности резки полос в линиях резки прокатных станов<sup>1</sup>. В последнем случае измерительное устройство является составной частью системы точной безупорной остановки листов в районе гильотинных ножиц. Применение их позволило значительно повысить точность раскроя полосы, ликвидировать дорогие и громоздкие упоры и автоматизировать (программировать) процесс резки полос, что в конечном счете приводит к большой экономии за счет уменьшения количества отходов металла и увеличения производительности.

Блок-схема устройства для измерения и программирования величины перемещения полосы металла, транспортируемого рольгангом, показана на рис. 27. Полоса металла 1, подлежащая разрезке, транспортируется рольгангом 10. К поверхности полосы прижат измерительный ролик 2, обкатывающий полосу без проскальзывания; ролик кинематически связан с диском 5 фотоэлектрического датчика импульсов (осветитель 3 и фотозлемент 4). Угол поворота ролика соответствует длине пути, пройденного полосой металла, и преобразуется в пропорциональное ему число импульсов, выдаваемое в блок формирования 23. Из блока формирования сигналы через блок 22 и переключатель направления счета 21 и блок начала счета 26 и поступают на реверсивный счетчик 20.

Блок начала счета начинает пропускать импульсы после получения сигнала на начало счета от фотоимпульсатора 7 с осветителем 12, установленного вдоль рольганга. Число импульсов, поступившее в реверсивный счетчик 20 при движении полосы после начала счета, соответствует длине, на которую переместилась полоса металла.

Число импульсов, соответствующее необходимой длине отрезаемой полосы, устанавливается задатчиком длины 14 и в виде кода поступает в блок сравнения 19 через корректор цены импульса 15. При достижении в блоке сравнения равенства числа импульсов, поступившего из счетчика 20, числу импульсов, заданному задатчиком 14, с выхода блока 19 поступит импульс в распределитель сигналов 27 с пятью выходами 28—32. С выхода 28 подаются команд-

<sup>1</sup> Эстерзон Ю. Я., Верещагин Л. А., Иванов Б. Н., Витушинский Л. М., Клец Н. К., Горбань А. Д., Хургин М. С. и Гринчук П. С. Устройство для автоматического останова полосы металла Авторское свидетельство № 156828, кл. В21с. «Бюллетень изобретений», № 16, 1963

ные сигналы о начале предварительного торможения роликов рольганга, с выхода 29 — о начале окончательного торможения; с выхода 30 и 31 сигналы подаются при пересечении концом полосы передней и задней границ поля допуска; с выхода 32 — при вторичном пересечении задней границы поля допуска в случае возврата конца полосы в это поле.

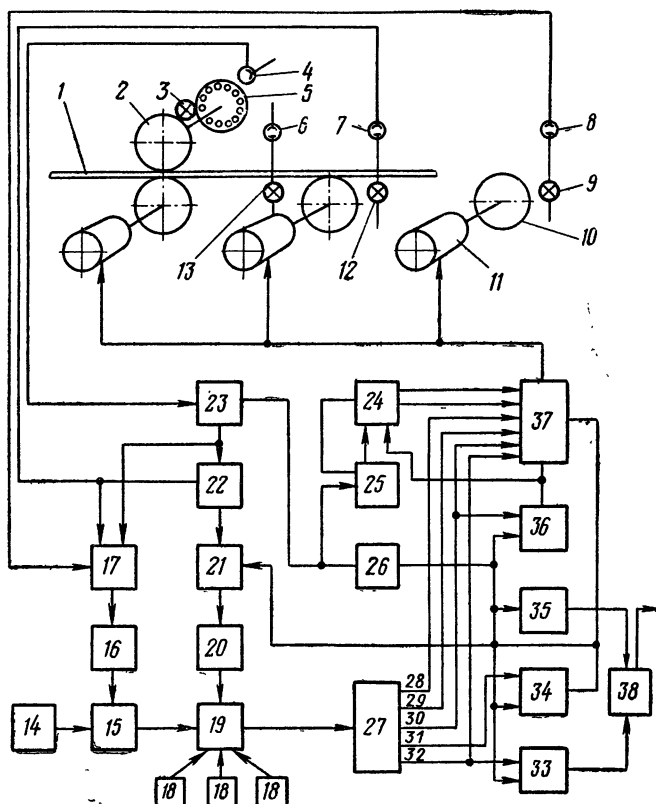


Рис. 27. Схема системы автоматизации точного останова прокатываемых листов

Команды на выполнение указанных действий задаются задатчиками 18, подключенными к блоку сравнения 19. Командные сигналы с распределителя сигналов 23 поступают через блоки 24 и 25 в блок 37, управляющий электроприводом 11 рольганга. Момент остановки фиксируется блоком нулевой скорости 26, связанным с блоком формирования 23.

При остановке полосы в поле допуска с блока 26 поступает команда в блок 36 и логический блок 35, который через блок 38 выдает сигнал на рез в схему управления ножницами.

Если конец полосы выйдет за поле допуска, то при команде с выхода 31 через логический блок 34 выдается сигнал на включение электропривода 11 в обратном направлении, в связи с чем конец полосы возвращается в зону поля допуска.

При пересечении полосой металла задней границы поля допуска (после реверса привода рольганга) с выхода 32 будет подана команда в блок останова полосы 37 и одновременно в логический блок 33, связанный с блоком 38 управления ножницами.

Фотоимпульсатор 6 при затемнении концом полосы осветителя 13 выдает команду на опускание измерительного ролика 2. После срабатывания фотоимпульсатора 7 начинается измерение длины пути, проходимого полосой.

Для исключения влияния при износе или температурных деформациях изменения диаметра измерительного ролика на точность измерения в устройстве установлен на определенном расстоянии от фотоимпульсатора 7 фотоимпульсатор 8 с осветителем 9. Число импульсов с фотоимпульсаторов 7 и 8, пропорциональное длине полосы между ними, подается через блоки 16 и 17 на счетчик и далее в корректор 15, связанный с блоком сравнения 19.

На рис. 28 показана схема системы, также разработанной в НИИПТМАШе<sup>1</sup>, для точного раскроя полосы 1 на листы необходимой длины. Информация о величине перемещения полосы поступает в электронно-счетное устройство 7 от датчика 3 измерительного ролика 2. Электронно-счетное устройство формирует необходимый закон изменения задающего напряжения в функции заданной программы и величины фактического перемещения полосы. Задающее напряжение поступает на вход блока 9 управления возбуждением генератора 12, обеспечивающего слежение за изменением напряжения на двигателе 11 подающих роликов 4.

После возврата ножниц 5 в исходное положение, осуществляющих с помощью двигателя 10 порезку полосы на листы, блок 7 выдает команду на запуск подающих роликов. При движении полосы датчик импульсов измерительного устройства выдает информацию в виде унитарного кода в считывающий счетчик импульсов 6, в который с пульта управления задатчиком 8 была заранее введена программа, соответствующая заданной длине листа. В момент пуска задающее напряжение имеет максимальную величину, соответствующую выбранному значению скорости. С помощью обратной связи по току двигателя подающих роликов система управления возбуждением генератора обеспечивает ускорение с постоянным током (моментом) двигателя.

После достижения установившегося значения напряжения элект-

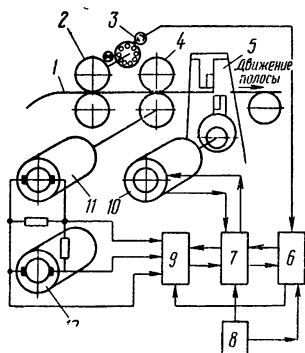


Рис. 28. Схема системы автоматизации точного останова прокатываемых листов

<sup>1</sup> Разработана инженерами Эстерзоном Ю. Я., Елецким И. И., Левковичем А. А. и др.

родвигателя 11 до его остановки поддерживается пропорциональным заданному напряжению.

В определенный момент процесса измерения, когда до достижения заданного размера полосе остается еще пройти небольшой отрезок пути (порядка 500—700 мм), электронно-счетное устройство начинает обеспечивать снижение величины задающего напряжения, в связи с чем осуществляется процесс торможения полосы. Закон изменения скорости полосы при торможении с помощью настройки регулируемых элементов электронно-счетного устройства выбирается таким, чтобы обеспечить необходимую точность остановки полосы при минимальном времени торможения.

На рис. 29 показана конструкция узла измерительного ролика. Ролик 19 имеет наружный диаметр  $251^{+0,02}$  мм и ширину 150 мм;

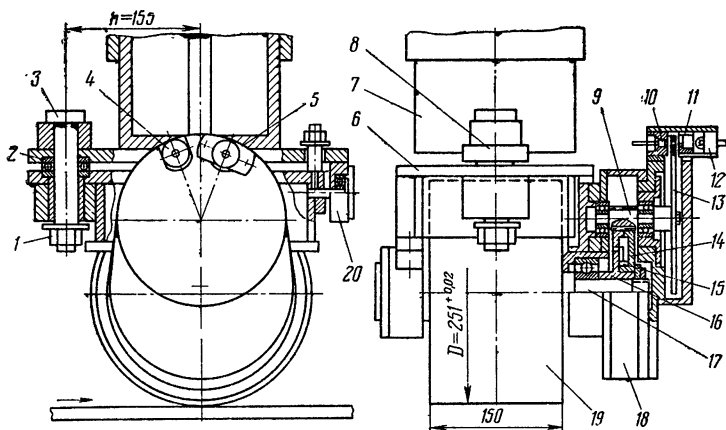


Рис. 29. Измерительная головка

его рабочая поверхность отполирована. Ролик напрессован на ось 17, вращающуюся на подшипниках качения, установленных на кронштейнах 6. Рама удерживается на шкворне 3, запрессованном в отверстие планки 8 гайкой 1. Планка 8 крепится винтами неподвижно к нижнему торцу цилиндрической направляющей трубы 7.

Усилие прижатия ролика к полосе воспринимается упорным шарикоподшипником 2 и роликом 20. Диск 13 датчика импульсов имеет у наружного края 120 отверстий, равномерно расположенных по окружности, и вращается от измерительного ролика через одноступенчатую зубчатую передачу с числом зубцов на шестерне 9, равным 14 и на колесе — 92.

Для устранения люфтов в передаче зубчатое колесо выполнено из двух половин 14 и 16, между которыми размещена пружина кручения 15. Передача собрана в корпусе 18.

Датчик импульсов состоит из осветителя 12, диафрагмы 11 и фотодиода 10, собранных в одном корпусе.

В узле ролика имеется два совершенно аналогичных по конструкции датчика импульсов 4 и 5, работающих от одного диска. Один из датчиков является резервным.

Цена импульса указанного измерительного устройства  $C=1$  мм. Описанная система раскроя полосы на листы находится в промышленной эксплуатации и обеспечивает точность пореза листов по длине в пределах  $\pm 2,5$  мм независимо от длины листов.

На рис. 30 показана конструкция измерительного устройства (также с фотоэлектрическим датчиком импульсов), предназначен-

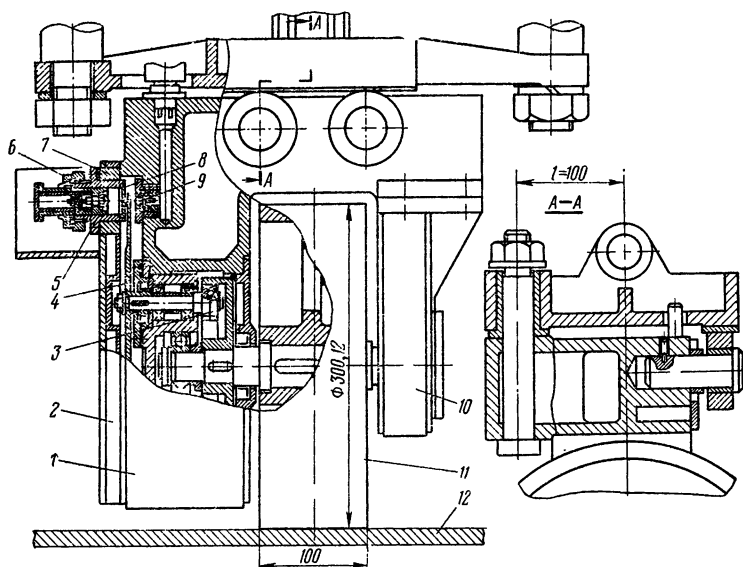


Рис. 30. Измерительная головка с водяным охлаждением

ная для работы в тяжелых температурных условиях. Поскольку температура полосы 12, перемещение которой измеряется роликом, достигает  $700-800^{\circ}\text{C}$ , возникла необходимость принудительного охлаждения проточной водой корпусов 1 и 10 и крышки 2. Измерительный ролик 11 имеет наружный диаметр  $300,12^{+0,02}$  мм и ширину 100 мм. Ролик изготовлен из высокопрочной стали, рабочая поверхность его закалена до высокой твердости. Для передачи вращения от ролика к диску 4 датчика используется также безлюфтовая зубчатая передача 3 с внутренним зацеплением, чем достигнута большая компактность редуктора. В диске 4 датчика у наружного края имеется 200 отверстий диаметром 1,5 мм.

Для получения с фотодиода 9 сигнала максимальной амплитуды может изменяться положение осветителя 5 и диафрагмы 8 по отношению к диску 4. Осветитель фиксируется гайкой цапгового зажима 6, набор прокладок 7 служит для изменения положения диафрагмы. Измерительное устройство имеет цену импульса  $C=1$  мм.

Чувствительным элементом датчика импульсов устройств, показанных на рис. 29 и 30, является фотодиод ФД-1, освещаемый лампой 12 в; 0,28 а через отверстия в диафрагме и импульсообразующем диске.



Конструкции измерительных устройств, показанные на рис 29 и 30, имеют ряд недостатков. Измерительный ролик может самоустанавливаться только по направлению перемещения полосы. Отсутствие самоориентации по ширине полосы, которая бы обеспечивала равномерное прижатие ролика по всей длине образующей, может

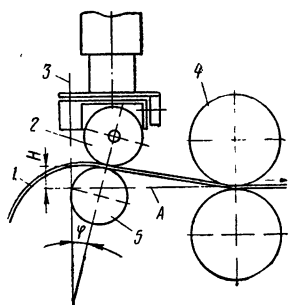


Рис. 31. Схема установки измерительного ролика при контроле тонких листов

приводить к появлению погрешностей измерения. Безлюфтовый зубчатый редуктор, с помощью которого осуществляется передача вращения от ролика к импульсообразующему диску, является источником больших сопротивлений вращению ролика, для преодоления которых необходимо значительно увеличивать силу прижатия. Указанные недостатки явились препятствием для использования устройства в системах автоматического контроля длины листов небольшой толщины из мягких материалов и с жесткими допусками на длину.

Одной из основных причин трудности использования измерительных устройств, показанных на рис. 29 и 30, в линиях резки тонкого листа являются специфические условия транспортирования его по рольгангу.

Для устранения деформации полосы 1 в процессе измерения измерительный ролик 2 (рис. 31) прижимают к полосе по линии ее касания с опорным роликом 5. Транспортирование полосы производится подающими роликами 4, установленными перед ножницами.

Поскольку для устранения изогнутости полосы после ее выхода из петлевой ямы опорный ролик должен быть поднят по отношению к уровню А на некоторую высоту  $H$ , величина которой в зависимости от жесткости полосы может изменяться с помощью механизма подъема, линия касания полосы с опорным роликом должна быть смещена относительно вертикали на угол  $\varphi$ .

При наличии даже незначительной неперпендикулярности линии касания измерительного ролика с полосой к направлению ее перемещения, которая обусловлена главным образом неточной установкой опорного ролика, на измерительный ролик действует боковое усилие  $S$ , стремящееся устранить непараллельность между направлением перемещения полосы и плоскостью вращения ролика.

Однако этому процессу препятствует непараллельность, измеряемая углом  $\varphi$ , между осью шкворня 3 и нормалью к полосе в месте ее касания с измерительным роликом: при повороте ролика относительно оси шкворня его боковая кромка касается движущейся полосы, которая отбрасывает его в противоположную сторону до соприкосновения противоположной кромки с движущейся полосой.

Таким образом, возникают колебания ролика в направлении, перпендикулярном к перемещению полосы, с частотой, зависящей от ее скорости. В результате этого на полосе из алюминиевого сплава при измерении длины стальным роликом с полированной рабочей поверхностью возникали царапины от боковых кромок ролика в виде двух параллельных прерывистых линий, а если применялся ролик

с пластмассовым покрытием, то след был отчетливо замечен только на тонкой полосе из мягкого сплава.

Колебания ролика являются причиной не только повреждения поверхности полосы, но и снижения точности измерения, так как между полосой и роликом неизбежно возникает проскальзывание [4].

В конструкции измерительного устройства, показанной на рис. 32\*, шкворневая подвеска рамы 8 к планке 9 механизма прижатия заменена сферической опорой — сферическим шарикоподшипником 10, центр которого размещен на оси вращения опорного ролика 11.

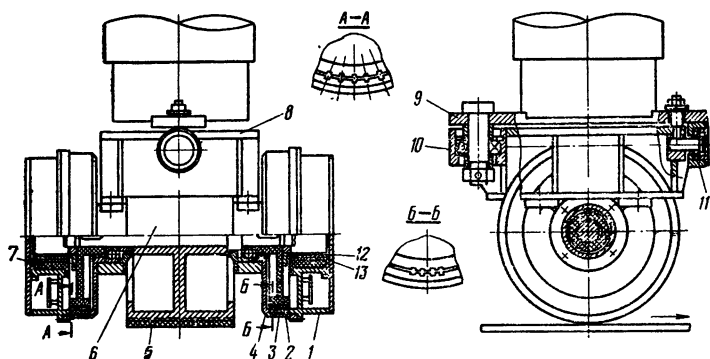


Рис. 32. Измерительная головка с индуктивными датчиками

Рама измерительного ролика 5 имеет три степени свободы, и ролик 5 может самоустанавливаться как по направлению перемещения полосы, так и по ее ширине.

Датчик импульсов, расположенный на противоположной стороне измерительного ролика и образованный ротором и статором аналогичного устройства, но с 53 обмотками (разрез АА на рис. 32), имеет цену импульса примерно 15 мм и предназначен для работы в системе сопровождения бракованных листов.

Для преобразования угла поворота измерительного ролика в унитарный код применен датчик типа «индуктосин». Ротор 2 и статор 3 датчика изготовлены из текстолита. Ротор крепится на валу 6 измерительного ролика, статор размещен в дуралюминиевом корпусе 4. От проворота в корпусе статор удерживается крышкой 1. Ротор и статор тщательно центрируются, радиальный зазор между ними выдерживается в пределах 0,2—0,3 мм. На наружной поверхности ротора и внутренней поверхности статора нарезано по 400 пазов. Глубина паза составляет 0,5 мм, ширина — 0,4 мм, расположены они равномерно по окружности. В пазах ротора и статора закреплены петлеобразные обмотки, выполненные из провода толщиной 0,29 мм.

Подвод энергии к обмотке ротора осуществляется через вращающийся трансформатор, подвижная обмотка 12 которого закреп-

\* Елецких И. И. Устройство для измерения длины листов. Авторское свидетельство № 258617, кл. 42в, «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», № 1, 1970.

лена на роторе, а неподвижная 13 расположена во втулке 7, запрессованной в центральное отверстие крышки 1. Неподвижная обмотка трансформатора входит непосредственно в контур питающего высокочастотного генератора. Частота генератора равна примерно 300 кГц. Коэффициент трансформации вращающегося трансформатора выбран так, чтобы обеспечить наибольшую передачу энергии в обмотку статора со стороны ротора. Наибольшая рабочая частота выходных импульсов не превышает 5 кГц.

При смещении витков обмотки ротора относительно статора имеет место резко выраженная модуляция амплитуды высокочастотных импульсов сигнала.

Полученные с датчика импульсы поступают на вход счетчика длины листа. Цена одного импульса равна 1 мм.

## УСТРОЙСТВА

### ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТАНКОВ

Измерительные устройства, основанные на методе обкатывания роликом, могут быть успешно использованы также для автоматического измерения линейных размеров в системах программного управления металлорежущими станками и другим технологическим оборудованием.

Например, при обработке отверстий в корпусах деталей на расточных станках необходима точная установка подвижного суппорта станка относительно технологической базы, которая осуществляется в настоящее время с помощью индикаторов, мерных штанг, оптических приборов и т. п. Такая установка является сложной и трудоемкой операцией, трудно поддающейся механизации и автоматизации.

Известные системы для контроля и программирования линейных перемещений сложны в изготовлении и требуют при их установке на существующее оборудование значительных переделок станков.

Например, устройство для контроля линейных перемещений системы Ферранти [25] основано на применении точных линейных решеток, изготовление которых для использования при измерении больших линейных перемещений крайне сложно.

Использование метода обкатывания роликом значительно упрощает задачу создания встраиваемого в существующие станки устройства для автоматического контроля линейных перемещений рабочих органов.

Примером может служить устройство<sup>1</sup>, показанное на рис. 33, которое предназначено для контроля линейных перемещений элементов расточных станков.

Ввиду высоких требований к точности измерений, рассматриваемое устройство оборудовано механизмом автоматической коррекции температурной деформации измерительного ролика и обрабатываемой детали.

Контроль линейных перемещений подвижного узла станка 7 относительно неподвижной станины 1 осуществляется с помощью

<sup>1</sup> Иванов Б. Н. и Елецких И. И. Устройство для автоматического контроля линейных перемещений. Авторское свидетельство № 267929, кл. 42в, 24. «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», № 13, 1970.

датчика линейных перемещений, состоящего из измерительного ролика 8, прижатого к линейке 6 пружинами 2, стеклянного диска 3 с радиально расположенными непрозрачными штрихами, нанесенными равномерно по окружности у края диска, и неподвижного сектора 5 с 30—40 радиальными штрихами с теми же параметрами, что и у штрихов диска.

При вращении измерительного ролика на выходе фотодиода 4 создается ряд импульсов, число которых пропорционально измеряемому перемещению. Импульсы регистрируются счетчиком 20. Визуальный контроль за величиной перемещения осуществляется с помощью устройства 19, связанного со счетчиком и установленного на пульте управления станком.

Сравнение положения подвижного узла станка с заданным при помощи задающего устройства 22 происходит в блоке 21, который в момент равенства заданного и действительного перемещений выдает сигнал через усилитель 18 и блок управления 17 в привод 16 механизма перемещения подвижного узла.

Механизм коррекции температурных деформаций измерительного ролика и обрабатываемой детали состоит из датчика 15 температуры измерительного ролика, датчика 14 температуры обрабатываемой детали, усилителя 13 с переменным коэффициентом усиления, сумматора 12, блока управления 11, привода 10 и винтовой пары 9.

При отклонении температуры ролика и обрабатываемой детали от нормальной (20°C) сигналы от соответствующих датчиков температуры поступают через сумматор 12 в блок управления 11 приводом 10, с помощью которого измерительный ролик, имеющий форму конуса, может быть смещен в сторону меньшей или большей величины обкатного диаметра.

Величина указанного смещения пропорциональна разности сигналов, поступающих в сумматор от датчиков температуры. При этом с целью исключения погрешности, обусловленной разницей коэффициентов линейного расширения материала измерительного ролика и материала обрабатываемой детали, сигнал от датчика 14 корректируется усилителем 13, коэффициент усиления которого выбирается оператором (станочником) в зависимости от материала обрабатываемой детали (для этого на усилителе имеется соответствующая шкала).

В сумматор могут вводиться и другие поправки, связанные, например, с износом ролика.

Описанное измерительное устройство конструктивно не сложно, а поэтому легко встраивается в действующее оборудование.

Для осуществления координатных перемещений элементов крупных расточных станков предложено<sup>1</sup> встраиваемое устройство, которое можно монтировать в станок при его модернизации. Оно состоит (рис. 34) из датчика перемещений 2, закрепляемого на подвижном узле станка (шпиндельной бабке, столе, суппорте и пр.), электронного счетчика импульсов 3, дешифратора 4 и линейки 1. Кроме этого, для автоматической установки узла станка на заданную координату устройство имеет блок управления двигателем перемещения узла 5, связанным со счетчиком импульсов. Датчик линейных перемещений с помощью калиброванного измерительного ролика связан с гладкой линейкой 1. При перемещении подвижного

<sup>1</sup> Канд. техн. наук Ивановым Б. Н. и инж. Железковым И. Н.

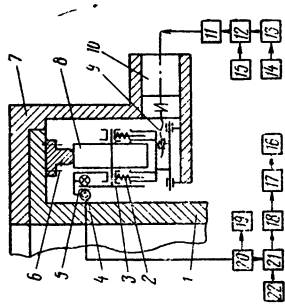


Рис. 33. Схема устройства для контроля линейных перемещений

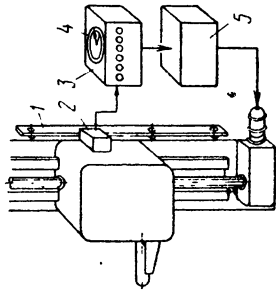


Рис. 34. Устройство для осуществления координатных перемещений

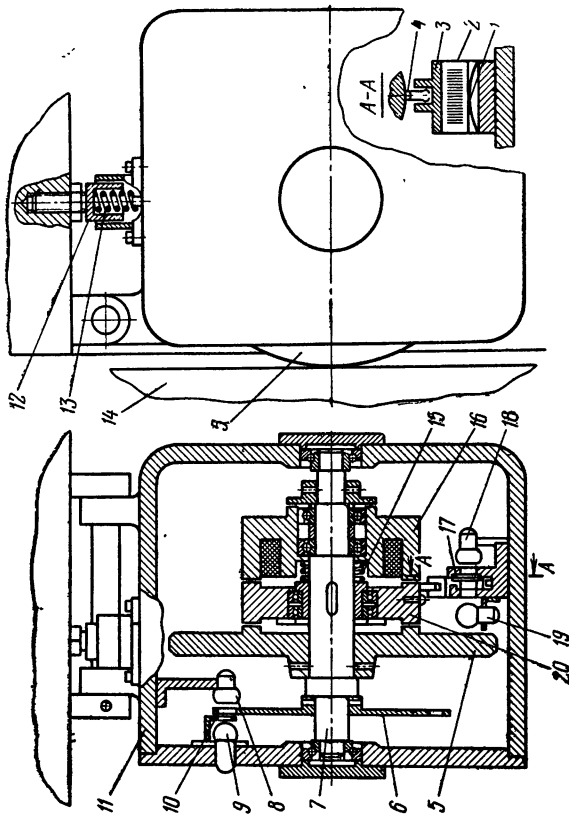


Рис. 35. Датчик устройства для осуществления координатных перемещений

узла станка ролик обкатывается по линейке и датчик выдает импульсы, которые регистрируются счетчиком и сравниваются с заданным дешифратором количеством импульсов, соответствующим требуемой величине перемещения.

Конструкция датчика координатных перемещений показана на рис. 35. Датчик состоит из пластмассового или металлического корпуса 11, внутри которого установлен вал 7 с жестко закрепленными на нем измерительным роликом 5 и делительным диском 6 с круговой дифракционной решеткой. На том же валу 7 посажены на подшипниках электромагнитная муфта 16 и якорь 20. Делительный диск вместе с делительным сектором 10 в процессе перемещения датчика по линейке 4 изменяют величину светового потока, попадающего на фотоэлемент или фотосопротивление 8 от источника света 9.

Аналогичная модуляция света, попадающего от источника света на фотоэлемент 19 или фотосопротивление 18, происходит при вращении якоря 20 благодаря подвижной 2 и неподвижной 17 дифракционными решеткам (подвижная решетка 2 прижимается к направляющей 3 плоской пружиной 1).

Датчик крепится к станку посредством оси, а его корпус находится под воздействием пружины 13, установленной в стакане 12 так, что измерительный ролик всегда прижат к линейке 14 с определенным усилием.

В момент трогания подвижного узла станка катушка электромагнитной муфты 16 обесточена и якорь 20 прижат к ролику 5 пружиной 15. В этом случае будет перемещаться подвижная дифракционная решетка 2 относительно неподвижной 17. Это приводит к изменению силы света, падающего на фоторезистор 18, т. е. датчик будет выдавать импульсы, которые после формирующего каскада и усилителя будут попадать в электронный счетчик по первому каналу. Как только ролик 5 повернется на достаточный угол, фоторезистором 8 будет выработан первый импульс, который прекратит поступление импульсов по первому каналу и даст разрешение поступлению импульсов от фоторезистора 18 в электронный счетчик по второму каналу. В этот же момент будет включена электромагнитная муфта 16, которая притянет якорь 20.

При подходе подвижного узла к установленной дешифратором координате электронный счетчик выдает импульс на снижение скорости привода перемещения, а затем на отключение электромагнитной муфты. За 1—2 мм до отработки заданной координаты снова разрешается подача импульсов по первому каналу, а по второму — прекращается.

При совпадении числа импульсов, установленных дешифратором и подсчитанных счетчиком, выдается импульс на окончательную остановку привода перемещения. Количество штрихов на дифракционных решетках, делительном диске и расстояния от оси вращения ролика выбираются, исходя из необходимости получения цены импульса, кратной единице длины. Например, цена импульса делительного диска может соответствовать 1,0, 0,1 или 0,001 мм.

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ

### ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Основными источниками возникновения погрешности измерения являются следующие факторы:

1. Неточность изготовления измерительного ролика по наружному (рабочему) диаметру, а также износ его рабочей поверхности в процессе эксплуатации.

2. Биение наружной поверхности ролика.

3. Изменение обкатного диаметра ролика из-за упругих деформаций, обусловленных усилием прижатия ролика к измеряемому объекту.

4. Наличие неровностей на поверхности измеряемого объекта.

5. Температурная деформация измерительного ролика и измеряемого объекта (полосы, плиты).

6. Неточность установки измерительного ролика, выражающаяся:

а) в непараллельности между осью вращения ролика и поверхностью измеряемого объекта;

б) в непараллельности между плоскостью вращения ролика и направлением перемещения измеряемого объекта;

7. Дискретность отсчета.

8. Неточность изготовления кинематического редуктора и импульсообразующего диска датчика.

9. Проскальзывание ролика относительно измеряемого объекта в периоды неустановившегося движения и из-за вибраций.

Ниже рассмотрены составляющие погрешности измерения, обусловленные каждым из перечисленных источников.

**Неточность изготовления и износ рабочей поверхности ролика.** Наибольшее влияние на точность измерения оказывает отклонение диаметра ролика от расчетного, что является результатом погрешности обработки рабочей поверхности ролика по диаметру и износа его в процессе эксплуатации.

Погрешность измерения, обусловленная неточностью изготовления ролика и износом его рабочего диаметра, может быть определена на основании уравнения (7) после его дифференцирования по  $d$ :

$$\Delta_1 = -\frac{\Delta d}{d} L, \quad (8)$$

где  $\Delta d$  — величина отклонения диаметра ролика от расчетного.

Уравнение (8) показывает, что величина относительной погрешности измерения, вызванная отклонением диаметра ролика от рас-

четного значения, равна относительной погрешности изготовления измерительного ролика. Например, если измерительный ролик с номинальным диаметром  $d=250$  мм изготовлен с отклонением  $\Delta d = \pm 0,25$  мм, то погрешность измерения длины  $L = 10\,000$  мм будет составлять  $\Delta_1 = 10$  мм.

Неточность изготовления измерительного ролика по наружному рабочему диаметру может явиться одним из основных источников погрешности измерения. Поэтому в устройствах, предназначенных для измерения перемещений или длины листов при холодной прокатке, рабочий диаметр ролика выдерживается по первому или второму классу точности (относительная погрешность наружного диаметра должна находиться в пределах 0,005—0,02%).

В измерительных устройствах, предназначенных для выполнения измерений с более высокой точностью, например для контроля координатных перемещений подвижных элементов металлорежущих станков и т. п., измерительный ролик должен быть изготовлен с еще большей точностью.

Например, для осуществления измерения с помощью ролика с рабочим диаметром 100 мм линейного размера 10 000 мм с погрешностью  $\Delta_1 = 0,1$  мм, отклонение диаметра ролика от номинального не должно превышать, согласно формуле (8), 0,001 мм. Составляющая погрешности  $\Delta_1$ , обусловленная неточностью изготовления ролика, является систематической и может быть исключена вводом соответствующей поправки.

С целью уменьшения эксплуатационного износа ролика при работе на стальной горячекатаной полосе, его рабочая поверхность закаливается до твердости RC 60—65.

**Биение наружной поверхности ролика.** Погрешность, обусловленная биением наружной цилиндрической поверхности измерительного ролика относительно оси вращения (рис. 36), возникает вследствие наличия эксцентриситета наружной цилиндрической поверхности ролика относительно его геометрической оси, эксцентриситета посадочной поверхности, по которой ролик сопрягается с подшипниками, и биения подшипников опоры ролика. Наиболее существенной является погрешность из-за эксцентриситета наружной цилиндрической поверхности, которая может быть найдена приближенно на основании следующих соображений.

При повороте измерительного ролика на некоторый угол  $\varphi$  длина пути, пройденная измеряемым объектом, равна длине дуги  $l_{\Delta\varphi}$  ролика. Но при этом датчик измерительного устройства на основании уравнения (7) регистрирует длину

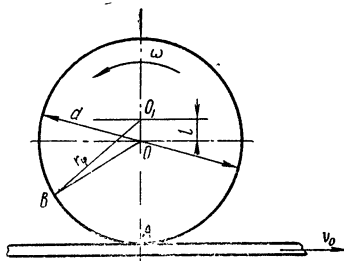


Рис. 36. К анализу влияния биения ролика на точность измерения

$$L = \frac{\pi d}{i z_0} \quad K = \frac{\pi d}{i z_0} \cdot \frac{\varphi i z_0}{2\pi} = \frac{1}{2} d \cdot \varphi,$$



где  $K = \frac{\varphi i z_0}{2\pi}$  — число импульсов, выданное датчиком счетному устройству при повороте ролика на угол  $\varphi$ .  
Длина дуги  $l_{AB}$  может быть найдена из условия

$$l_{AB} = \int_0^{\varphi} r_{\varphi} d\varphi, \quad (9)$$

где  $r_{\varphi}$  — расстояние точек ролика, находящихся в данный момент в контакте с полосой, от оси вращения  $O$ .

Из  $\triangle OO_1B$  найдем

$$r_{\varphi} = \frac{1}{2} d \sqrt{1 - \left(\frac{2e}{d}\right)^2 \sin^2 \varphi + e \cos \varphi}. \quad (10)$$

Поскольку обычно эксцентриситет  $e$  значительно меньше диаметра ролика  $d$ , то, пренебрегая членом  $\left(\frac{2e}{d}\right)^2 \sin^2 \varphi$ , на основании уравнений (9) и (10) получим

$$l_{AB} = \int_0^{\varphi} \left( \frac{d}{2} + e \cos \varphi \right) d\varphi = \frac{1}{2} d\varphi + e \sin \varphi,$$

откуда величина погрешности измерения, обусловленная эксцентриситетом,

$$\Delta_2 = l_{AB} - L = e \sin \varphi. \quad (11)$$

За полный оборот ролика погрешность  $\Delta_2$  будет изменяться по синусоидальному закону в пределах от  $+e$  до  $-e$ .

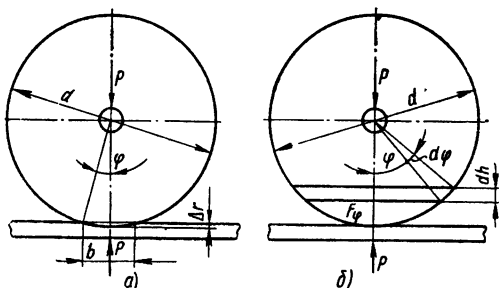


Рис. 37. К определению упругих деформаций измерительного ролика

Поскольку величина эксцентриситета ролика не превышает обычно сотых долей миллиметра, то в случае измерения длин с большими допустимыми отклонениями погрешностью  $\Delta_2$  можно пренебречь.

**Упругие деформации ролика.** Полагая, что измерительный ролик является сплошным металлическим цилиндром, нагруженным давлением (рис. 37), распределенным по ширине площадки контакта по эллиптическому закону, и учитывая не только деформацию в непосредственной близости от площадки контакта, но и общую деформацию цилиндра, уменьшение наружного диаметра ролика можно приближенно определять по формуле

$$\Delta d = 4q \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \left( \ln \frac{2R}{b} + 0,407 \right), \quad (12)$$

где  $q$  — давление на единицу длины образующей ролика;  $\mu$  — коэффициент Пуассона для материала ролика;  $E$  — модуль упругости для материала ролика;  $b$  — ширина площадки контакта с измеряемым объектом.

Для случая контакта цилиндра с плоскостью, согласно формуле Герца, половина ширины площадки контакта

$$\frac{b}{2} = \sqrt{4q \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \cdot \frac{d}{2}}. \quad (13)$$

Из рис. 37, а следует, что величина упругого уменьшения диаметра

$$\Delta_1 d = 2\Delta_1 r = d (1 - \cos \varphi).$$

Учитывая, что величина  $b$  очень мала по сравнению с  $d$ , угол  $\varphi$  может быть найден по формуле

$$\varphi = \frac{b}{d}.$$

Так как при малых значениях  $\varphi \cos \varphi = 1 - \frac{1}{2} \varphi^2$ , то

$$\Delta_1 d = \frac{1}{2} d \varphi^2 = \frac{b^2}{2d},$$

или, на основании формулы (13),

$$\Delta_1 d = 4q \frac{1 - \mu^2}{\pi E}.$$

Упругое сжатие слоя цилиндра высотой  $dh$  (рис. 37,б) согласно закону Гука

$$\delta(dh) = \frac{P dh}{E F_\varphi}, \quad (14)$$

где  $P$  — усилие прижатия ролика;  $F_\varphi = dB \sin \varphi$  — площадь слоя цилиндра;  $B$  — ширина измерительного ролика:

$$dh = \frac{1}{2} d \sin \varphi d\varphi.$$

Подставляя эти значения в уравнение (14), получим

$$\delta(dh) = \frac{P d \varphi}{2 E B}.$$

Величина упругого уменьшения диаметра ролика, обусловленная общей деформацией сжатия цилиндра,

$$\Delta_2 d = \int_0^{\pi} \frac{Pd\varphi}{2EB} = \frac{\pi P}{2EB} = \frac{\pi q}{2E}, \quad (15)$$

где  $q = \frac{P}{B}$  — давление на единицу длины образующей измерительного ролика.

При измерении длин прокатываемых листов погрешностью  $\Delta_3$ , обусловленной столь незначительным уменьшением диаметра ролика, можно пренебречь.

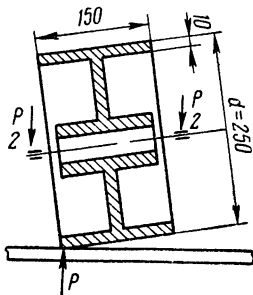


Рис. 38. К определению упругих деформаций измерительного ролика

В измерительных устройствах, предназначенных для точных измерений (например, координатных перемещений элементов станков и механизмов), упругая деформация ролика может быть компенсирована некоторым увеличением его диаметра при изготовлении ролика, определяемым при проектировании устройства по формуле (12).

Этот метод компенсации приемлем в том случае, если усилие прижатия ролика при эксплуатации устройства остается неизменным, что обычно и имеет место в действительности.

В устройствах, предназначенных для измерения величины перемещения полосы (например, в агрегатах поперечной резки), на измерительный ролик при разгонах и торможениях полосы действуют большие динамические нагрузки. С целью их уменьшения измерительный ролик изготавливают не сплошным, а пустотелым. Обычно диаметральному сечению ролика придают форму, показанную на рис. 38. В этом случае при наличии даже небольшой непараллельности между осью вращения ролика и полосой, не превышающей 10—15 угловых минут, изменение величины обкатного диаметра ролика от действия силы прижатия  $P$  может быть весьма значительным.

Величину деформации рассчитывают по формуле [2]

$$\Delta d = 0,0186 \frac{Pd^3}{EJ}.$$

При размерах алюминиевого ролика, показанных на рис. 38, и усилие прижатия  $P=100$  кгс уменьшение диаметра  $\Delta d=0,66$  мм, а погрешность измерения листов длиной, например, 4000 мм, согласно уравнению (8), будет составлять  $\Delta_{13}=10,5$  мм.

Такая погрешность недопустима, и при разработке конструкции измерительного устройства должны приниматься меры, обеспечивающие равномерное прижатие ролика к полосе по всей длине образующей.

**Неровности на поверхности измеряемого объекта.** Исследования устройств для изменения диаметров [11, 24, 31] приводят к

выводу, что микронеровности контролируемой детали, которые имеют место при шероховатости поверхности, соответствующей 5-му и более высокому классам чистоты, при контроле длин более 1000 мм и допустимом поле рассеивания результатов измерения не менее 0,05 мм, практически на точность измерения не влияют.

Волнистость поверхности может оказывать влияние только в том случае, если амплитуда и частота волн на поверхности таковы, что при заданной относительной скорости ролика создаются колебания, способные отрывать ролик от поверхности измеряемого объекта.

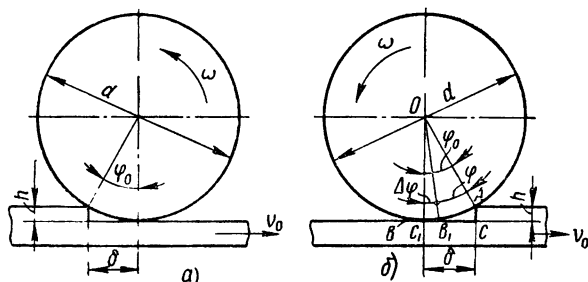


Рис. 39. К определению влияния неровностей поверхности измеряемого объекта

Условия, при которых ролик не будет отрываться от измеряемого объекта, рассмотрены ниже при анализе влияния вибраций на точность измерения.

В случае измерения перемещений элементов машин или станков с малыми линейными скоростями (суппорт, стол станка и пр.) указанные динамические воздействия на ролик будут незначительными и на результатах измерения практически не скажутся.

Волнистость поверхности является причиной увеличения пути ролика при его перекатывании по измеряемому объекту, что приводит к погрешности измерения длин. Влияние волнистости аналогично влиянию некруглости при измерении диаметров методом обкатывания. Последнее подробно рассмотрено ниже.

При измерении перемещений, если ролик перекачивается по специальной проточке станины, состыкованной из нескольких частей или собранной из нескольких частей линейки, наряду с упомянутыми выше неровностями в местах стыков могут возникнуть «ступеньки».

Аналогичные неровности имеются на поверхности горячекатаных стальных листов (остатки окалины). Статистические исследования НИИПТМАШа показали, что средняя высота таких неровностей составляет  $h=0,3$  мм, а их среднее число на 1 пог. м  $m=5$ .

Для оценки погрешности, вызванной наличием «ступенек», рассмотрим процесс перекачивания ролика через выступ высотой  $h$  (рис. 39).

При подъеме на выступ (рис. 39,а) время в течение которого ролик повернется на угол  $\varphi_0$ ,

$$t_1 = \frac{\delta}{v} = \frac{d \sin \varphi_0}{2v},$$

где  $v$  — скорость движения измеряемого объекта.

При отсутствии препятствия ролик, вращающийся с угловой скоростью  $\omega = \frac{v}{r}$  за время  $t_1$ , повернулся бы на угол

$$\varphi = \omega t_1 = \frac{vd \sin \varphi_0}{r^2 v} = \sin \varphi_0.$$

Разность между углами  $\varphi_0$  и  $\varphi$  определяет дополнительный поворот ролика при подъеме на выступ, т. е.

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi = \varphi_0 - \sin \varphi_0. \quad (16)$$

Для вычисления угла  $\Delta\varphi$  выразим синус угла  $\varphi_0$  через высоту  $h$  и радиус  $r$ :

$$\sin \varphi_0 = \frac{1}{2} \sqrt{dh - h^2}.$$

Пренебрегая, ввиду малости, величиной  $h^2$ , найдем

$$\sin \varphi_0 = \frac{1}{2} \sqrt{dh}.$$

Из полученного соотношения следует, что с увеличением диаметра измерительного ролика влияние неровностей на точность измерения уменьшается.

При скатывании с выступа (рис. 39,б) угол дополнительного поворота ролика определяется тем же соотношением (16). Действительно, при отсутствии выступа точка  $C_1$  на листе пришла бы в соприкосновение с точкой ролика  $B_1$ , положение которой определяется условием  $\sphericalangle AB_1 = CC_1 = \delta$ .

Следовательно, угол  $\Delta\varphi = \frac{\sphericalangle 2BB_1}{d}$ , или

$$\Delta\varphi = \frac{2(\sphericalangle AB - \delta)}{d} = \frac{d\varphi_0 - d \sin \varphi_0}{d},$$

откуда

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \sin \varphi_0.$$

Погрешность измерения

$$\Delta_4 = \Delta\varphi dL.$$

Например, при диаметре измерительного ролика  $d=300$  мм;  $h=0,3$  мм;  $n=5$ ;  $L=10$  м и  $\Delta\varphi=0,000042$  рад,  $\Delta_4=0,63$  мм.

Такой погрешностью при измерении длины горячекатаных полос и плит можно пренебречь. Однако при создании устройств для более точных измерений (например, длин и перемещений на металло-режущих станках) должны приниматься меры для уменьшения  $h$  и  $m$ .

**Температурные деформации измеряемого объекта и ролика.** Как и в предыдущих случаях, эта погрешность определяется разностью между фактической и приближенной (номинальной) длиной объек-

та измерения. Например, длина листа, измеренная роликом, имеющим температуру  $t_p$  и коэффициент линейного расширения  $\alpha_p$ ,

$$L = L_n [1 + \alpha_p (t_p - 20^\circ)], \quad (17)$$

где  $L_n$  — номинальная длина объекта измерения без учета температурной погрешности. Измеренная роликом длина  $L$ , выраженная через фактическую длину объекта  $h_n$ , после его охлаждения от температуры  $t_n$  в момент измерения до нормальной ( $20^\circ\text{C}$ ),

$$L = L_{cp} [1 + \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})]. \quad (18)$$

Приравнявая правые части уравнений (18) и (17), получим

$$L\phi [1 + \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})] = L_n [1 + \alpha_p (t_p - 20^\circ\text{C})],$$

откуда фактическая длина объекта измерения

$$L\phi = L_n \frac{1 + \alpha_p (t_p - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})}.$$

Температурная погрешность измерения

$$\Delta_5 = L\phi - L_n = L_n \frac{\alpha_p (t_p - 20^\circ\text{C}) - \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})}.$$

Пренебрегая, ввиду малости по сравнению с единицей, членом  $\alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})$ , найдем окончательно

$$\Delta_5 = L_n [\alpha_p (t_p - 20^\circ\text{C}) - \alpha_n (t_n - 20^\circ\text{C})], \quad (19)$$

и, в частном случае при  $\alpha_p = \alpha_n = \alpha$ ,

$$\Delta_5 = L_n \alpha (t_p - t_n). \quad (20)$$

При выравнивании температур ролика и листа, когда  $t_p = t_n$ , погрешность  $\Delta_5 = 0$ .

Температурная погрешность при измерении алюминиевого листа длиной  $L_n = 5000$  мм, имеющего в момент измерения температуру  $t_n = 80^\circ\text{C}$ , измерительным роликом, изготовленным из алюминиевого сплава ( $\alpha = 24 \cdot 10^{-6}$  1/град) и имеющего в момент измерения температуру  $t_p = 40^\circ\text{C}$ , составляет  $\Delta_5 = 4,8$  мм.

Температурная погрешность в случае измерения алюминиевых листов может быть значительно уменьшена, если ролик изготовить из материала с большим коэффициентом линейного расширения, например из пластмассы АСТ-Т, для которой  $\alpha = 80 \cdot 10^{-6}$  1/град.

В этом случае величина погрешности при исходных данных предыдущего примера будет  $\Delta_5 = 0,8$  мм.

Опыт эксплуатации измерительного устройства на агрегате поперечной резки алюминиевой полосы показал, что температура ролика и полосы связана ориентировочной зависимостью

$$t_p = 20^\circ\text{C} + \lambda (t_n - 20^\circ\text{C}), \quad (21)$$

где коэффициент  $\lambda$  находится в пределах 0,25—0,3.

Если измерительный ролик изготовить из материала, для которого соблюдается условие

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_p} = \lambda, \quad (22)$$

то температурная погрешность может быть уменьшена до нуля.

Действительно, подставляя выражение (21) с учетом условия (22) в уравнение (19) или (20), получим  $\Delta_5 = 0$ .

Для пластмассы АСТ-Т и алюминиевой полосы условие (22) соблюдается, поскольку отношение  $\frac{\alpha_1}{\alpha_p} = 0,3$ .

Целесообразность применения этого способа уменьшения температурной погрешности подтверждена опытом работы измерительного устройства с роликом, покрытым снаружи слоем пластмассы АСТ-Т, толщиной 12—15 мм. Центральная часть (ступица) ролика изготовлена из алюминиевого сплава и имеет форму, показанную на рис. 38. Благодаря большой поверхности соприкосновения с нагретым от полосы воздухом и хорошей теплопроводности алюминиевой ступицы, ролик обладает малой тепловой инерцией, что в этом случае имеет большое значение.

**Неточность установки ролика.** Непараллельность между осью вращения ролика и поверхностью измеряемого объекта может быть источником возникновения погрешности из-за деформаций ролика усилиями прижатия.

Этот случай рассмотрен на рис. 40,а. Однако при рассматриваемой неточности установки может возникнуть погрешность, обусловленная изменением обкатного диаметра ролика при наличии скругления его боковых кромок радиусом  $r_k$ .

Уменьшение обкатного диаметра определится в этом случае по формуле

$$\Delta d = -2r_k(1 - \cos \alpha).$$

• Тогда, на основании уравнения (8), погрешность измерения

$$\Delta'_6 = -L \frac{2r_k(1 - \cos \alpha)}{d} = -L \frac{2r_k}{d} (1 - \cos \alpha),$$

где  $\alpha$  — угол перекоса ролика.

Например, для случая измерения длины  $L = 5000$  мм роликом с  $d = 250$  мм, при радиусе скругления кромок  $r_k = 10$  мм и угле перекоса  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\Delta'_6 = -0,24$  мм.

Эта погрешность может несколько увеличиться из-за упругой деформации поверхностей соприкосновения ролика и объекта измерения, поскольку ввиду уменьшения площади контакта при неизменном усилии прижатия ролика удельные давления значительно возрастают. Однако величина деформации при усилиях прижатия, необходимых для перекачивания ролика без скольжения, как показали расчеты, крайне незначительна. Значительно большее влияние на точность измерения может оказать непараллельность между плоскостью вращения ролика и направлением его относительного перемещения, измеряемая углом  $\beta$  (рис. 40,б). В этом случае боковое скольжение измерительного ролика относительно измеряемого объекта появляется при самых малых значениях угла перекоса  $\beta$ . Устранить появляющееся проскальзывание ролика без применения специальных устройств практически невозможно, поскольку нельзя обеспечить абсолютную параллельность между плоскостью вращения ролика и направлением его относительного перемещения.

Наличие бокового скольжения вызывает неизбежное появление проскальзывания ролика в плоскости его вращения. Это следует из известного положения, что сила трения между двумя телами направлена в сторону, противоположную их относительному скольжению.

Поскольку имеется составляющая  $T$  суммарной силы трения  $\mu P$ , то неизбежно появится составляющая скорости  $v'_T$  (вследствие проскальзывания ролика в плоскости его вращения) суммарной скорости скольжения ролика  $v_S$ , направленной в сторону, противоположную вектору силы трения  $\mu P$  (рис. 40 в).

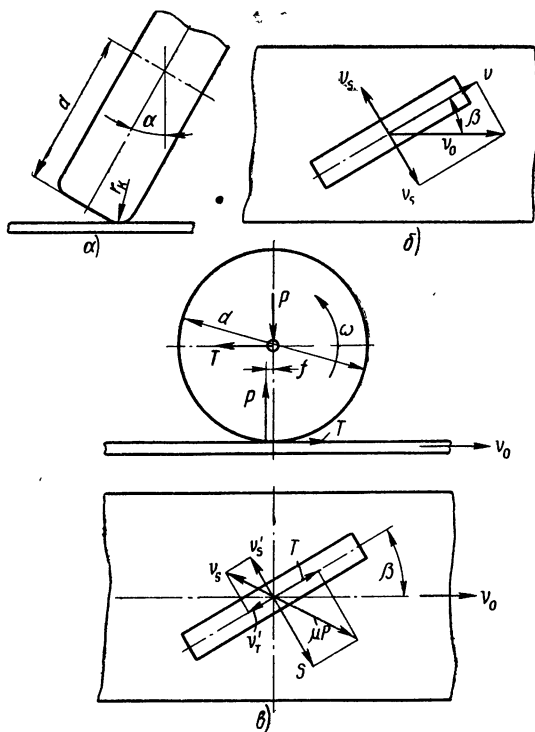


Рис. 40. Положения ролика при неточной установке относительно измеряемого объекта

Скорости бокового  $v'_S$  и окружного  $v'_T$  скольжения связаны соотношением

$$\frac{v'_T}{v'_S} = \frac{T}{S}, \quad (23)$$

где  $T$  — окружное усилие на ролике;  $S$  — боковое усилие на ролике. Эти силы связаны зависимостью

$$T^2 + S^2 = (\mu P)^2, \quad (24)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения между полосой и роликом;  $P$  — сила прижатия ролика в полосу.



С учетом зависимости (24) соотношение (23) принимает вид

$$\frac{v_T}{v_S} = \frac{T}{V(\mu P)^2 - T^2}.$$

Учитывая, что скорость бокового скольжения  $v_S' = v_0 \sin \beta$ , из соотношения (23) имеем

$$v_T' = v_0 \frac{T}{S} \sin \beta.$$

Окружная скорость измерительного ролика

$$v_p = v_0 \cos \beta \mp v_0 \frac{T}{S} \sin \beta.$$

В полученном уравнении знак минус перед слагаемым  $v_0 \sin \beta \frac{T}{S}$  соответствует периоду разгона и установившегося движения измеряемого объекта, а знак плюс — периоду торможения. График  $v_p$  в функции угла перекоса  $\beta$  показан на рис. 41, а.

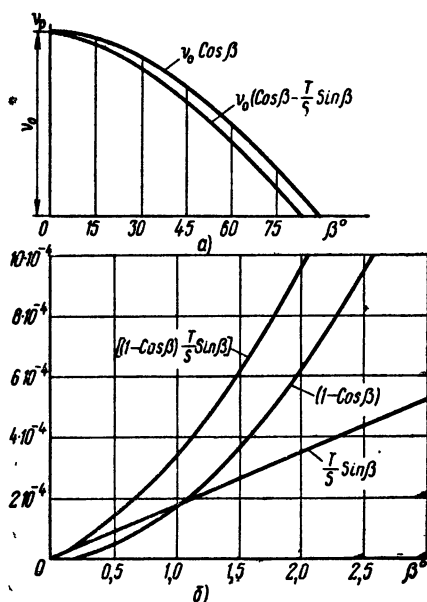


Рис. 41. График изменения скорости ролика  $v_p$  от угла перекоса  $\beta$  (а) и изменения функции  $\frac{T}{S} \sin \beta$ ;  $(1 - \cos \beta)$  и  $[(1 - \cos \beta) \frac{T}{S} \sin \beta]$  в зависимости от угла перекоса (б)

Окружная скорость измерительного ролика меньше скорости измеряемого объекта на величину

$$\Delta v = v_0 - v_p = v_0 (1 - \cos \beta) \pm v_0 \frac{T}{S} \sin \beta. \quad (25)$$

В этом уравнении слагаемое  $v_0(1-\cos\beta)$  определяет величину уменьшения скорости ролика, обусловленную геометрическим соотношением скоростей, а слагаемое  $v_0 \frac{T}{S} \sin\beta$  определяет величину окружного проскальзывания ролика, вызванного наличием сил сопротивления его вращению. В уравнении (25) знак плюс соответствует периоду разгона и установившегося движения измеряемого объекта. Умножая обе части уравнения (25) на приращение времени  $dt$  и учитывая, что  $\Delta v_0 dt$  есть приращение погрешности измерения  $d(\Delta)$  после интегрирования по времени, получим выражение для определения погрешности измерения

$$\Delta_6'' = \Sigma L_i \left[ (1 - \cos \beta) \pm \frac{T_i}{S_i} \sin \beta \right], \quad (26)$$

где  $L_i$  — путь измеряемого объекта за период разгона, установившегося движения и торможения;  $S_i$  и  $T_i$  — значения бокового и окружного усилий на ролике в период разгона, установившегося движения и торможения измеряемого объекта.

При вычислении величины окружного усилия на ролике могут быть использованы следующие выражения.

Для периода разгона

$$T_1 = P \left( \mu_1 \frac{d_u}{d} + \frac{2f}{d} \right) + J \frac{4w_0}{d^2},$$

где  $\mu_1$  — коэффициент трения в опорных подшипниках измерительного ролика;  $f$  — коэффициент трения качения ролика;  $J$  — момент инерции ролика и вращающихся с ним деталей, приведенный к оси вращения ролика;  $w_0$  — ускорение измеряемого объекта;  $d_u$  — диаметр подшипников измерительного ролика.

Для периода установившегося движения

$$T_2 = P \left( \mu_1 \frac{d_u}{d} + \frac{2f}{d} \right).$$

Для периода торможения

$$T_3 = P \left( \mu_1 \frac{d_u}{d} + \frac{2f}{d} \right) - J \frac{W_0}{r^2},$$

где  $W_0$  — ускорение в замедленном движении.

При определении соответствующих значений бокового усилия на ролике используется зависимость (24).

При следующих условиях измерения листа в системе безупорной точной порезки [43]:  $L_0 = 10\,000$  мм — измеряемая длина;  $\omega_1 = 3$  м/сек<sup>2</sup> — ускорение в период разгона полосы;  $W_2 = 2$  м/сек<sup>2</sup> — ускорение в период торможения;  $v_0 = 2$  м/сек — наибольшая скорость полосы в установившемся режиме;  $\beta = 2^\circ$ ;  $J = 0,016$  кгс·сек<sup>2</sup>·м;  $d = 0,25$  м;  $P = 100$  кгс;  $d_u = 40$  мм:  $\mu = 0,1$ ;  $f = 0,005$ ;  $\mu_1 = 0,005$ , величина погрешности, вызванная перекосом,

$$\Delta_6'' = (\Delta'')_p + (\Delta_6'')_y + (\Delta_6'')_r = 10,44 \text{ мм.}$$

Очевидно, что появление такой большой погрешности при сравнительно небольшом угле перекоса недопустимо. Поэтому в конструкциях измерительных устройств НИИПТМАШа [4, 13] преду-

смотрен механизм самоориентации измерительного ролика по направлению перемещения относительно измеряемого объекта.

На рис. 41,б показаны графики изменения функций  $\frac{T}{S} \sin \beta$ ;  $(1 - \cos \beta)$  и суммы этих функций  $\left[ (1 - \cos \beta) + \frac{T}{S} \sin \beta \right]$  (для  $S = 0,01$ ) в зависимости от угла перекоса  $\beta$ . Значения этих функций входят в уравнение (26) для определения погрешности измерения.

Графики показывают, что составляющая погрешность  $\Delta_6''$ , обусловленная окружным проскальзыванием измерительного ролика, весьма значительна и для углов перекоса  $\beta < 1^\circ$ . Эта составляющая по величине больше той части погрешности  $\Delta_6''$ , которая определяется косинусом угла  $\beta$ ; для углов  $\beta \leq 20'$  погрешность  $\Delta_6''$  вызывается в основном окружным проскальзыванием измерительного ролика. Для уменьшения окружного проскальзывания ролика необходимо создавать такие условия обкатывания, при которых отношение  $\frac{T}{S}$  было бы возможно малым — измерительный ролик должен вращаться на подшипниках качения, коэффициент трения между полосой и роликом должен быть возможно большим. Эти требования касаются не только измерительных устройств, не имеющих механизма самоориентации, но и устройств, снабженных механизмом самоориентации ролика, поскольку соблюдение их создает предпосылки снижения усилия прижатия ролика к полосе, что важно при измерении длины тонких листов, особенно из мягких цветных сплавов — алюминия, меди и т. п.

Особенно велика погрешность измерения, вызванная окружным проскальзыванием ролика в периоды неустановившегося движения полосы, когда отношение  $\frac{T}{S}$  сильно возрастает из-за появления

на ролике динамических нагрузок. Для периода разгона и торможения полосы эти погрешности имеют разные знаки, а поэтому за полный цикл движения частично компенсируются.

**Дискретность отсчета импульсов.** Погрешность измерения, вызванная дискретностью отсчета измерительных импульсов, зависит от схемы измерительного устройства.

Если счет измерительных импульсов производится в промежуток времени, между двумя командными импульсами, как это имеет место в системах с двумя фотоимпульсаторами, то погрешность измерения будет зависеть от несовпадения командных и измерительных импульсов как в начале, так и в конце их счета.

Поскольку схемы с двумя командными импульсами при измерении длин применяются редко и характерны для измерителей диаметров, погрешности от несовпадения командных импульсов начала и конца счета измерительных импульсов будут рассмотрены ниже.

При измерении длин чаще применяются схемы с одним командным датчиком (в системах точного раскроя прокатываемых листов) или без датчиков командных импульсов (в системах регистрации перемещений органов металлорежущих станков). Как в первой, так и во второй схеме погрешность, вызванная дискретностью отсчета импульсов, является следствием неопределенности положения

импульсообразующих элементов датчика в начале цикла измерения.

На рис. 42 изображены три случая относительного положения диска 1 (фотоэлектрического) датчика угла поворота измерительного ролика и луча света, падающего от осветителя 4 на фоточувствительный элемент 3 в начале цикла измерения. В первом случае (рис.

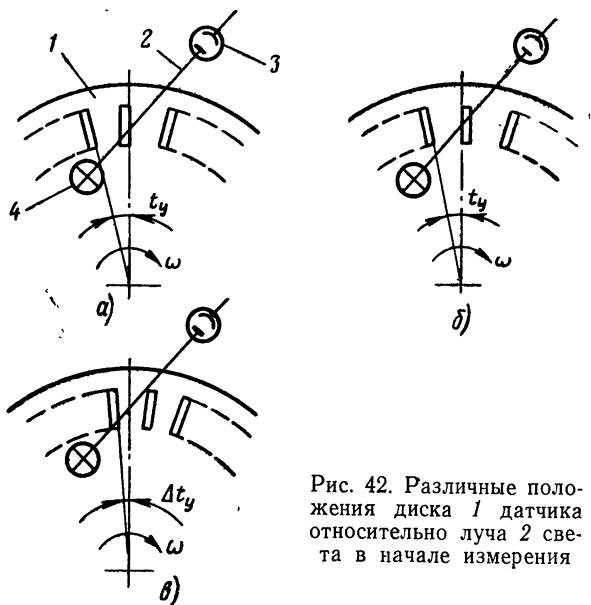


Рис. 42. Различные положения диска 1 датчика относительно луча 2 света в начале измерения

42,а) правая кромка отверстия диска совпадает с осью луча 2, а поэтому при вращении диска в направлении, указанном стрелкой, будет выдан регистрирующему устройству первый импульс, хотя ролик не успеет пройти по измеряемому объекту путь, равный цене этого импульса и определяемый углом  $t_y$ . Поэтому величина погрешности измерения будет практически равна  $\Delta_7 = -C$ .

Величина  $C$  определяется уравнением (6) и должна быть учтена при разработке конструкции измерительной головки.

Если в начале цикла измерения диск относительно луча занимает положение, показанное на рис. 42,б, то для получения регистрирующим устройством первого импульса диску необходимо повернуться, по крайней мере, на угол  $t_y$ . Этот угол соответствует цене измерительного импульса, а поэтому  $\Delta_7 = 0$ .

В случае, показанном на рис. 42,в до подачи первого сигнала в регистрирующее устройство диск уже повернут на угол  $\Delta t_y$ , который соответствует  $\frac{\Delta t_y}{t_y}$  долям цены импульса, а следовательно,

$$\Delta_7 = -C \frac{\Delta t_y}{t_y}.$$

В некоторых автоматических системах контроля привод перемещения контролируемого объекта получает команду на остановку, причем командным импульсом является один из импульсов, выдаваемых датчиком измерительного ролика (работа устройства по заданной программе).

Тогда последний импульс цикла контроля перемещения является последним измерительным импульсом. Очевидно, что ввиду инерционности системы остановки и контролируемого объекта, последний не может мгновенно остановиться после подачи команды. Следовательно, несмотря на прекращение счета импульсов, контролируемый объект пройдет еще некоторый путь, который определит дополнительную ошибку измерения.

Необходимо отметить, что эта ошибка обусловлена не дискретностью отсчета импульсов, а параметрами системы привода, торможения, величиной сил инерции контролируемого объекта и т. п.

**Неточность изготовления элементов зубчатой передачи,** связывающей измерительный ролик с круговым датчиком, приводит к появлению ошибки положения ротора датчика, ввиду чего измерительные импульсы смещаются во времени по отношению к положениям, которые они занимали бы при отсутствии ошибок передачи. Величина ошибки положения ротора зависит от точности изготовления элементов зубчатой передачи и ее передаточного отношения. Ошибку положения ротора можно определить на основании известных методом расчета погрешности зубчатых передач [5, 26, 3]. При измерении длин прокатываемых листов указанной ошибкой можно пренебречь, если зубья передачи нарезаны с точностью не ниже 7-й степени, а все остальные элементы зубчатых колес и их опор выполнены не ниже, чем по 2-му классу точности. Однако при конструировании устройств для контроля линейных перемещений узлов станков, эта ошибка должна быть учтена.

На результат измерения может повлиять также неточность изготовления импульсообразующего диска (ротора) кругового датчика. Если датчик изготовлен в виде обычного диска с отверстиями, фотодиода и осветителя, то ошибка положения отверстия  $\Delta\varphi_d$  преобразуется в ошибку измерения длины:

$$\Delta_s = \frac{d\Delta\varphi_d}{2i},$$

где  $i$  — передаточное отношение кинематической цепи «ролик—диск»;  $\Delta\varphi_d$  — угловая ошибка положения отверстия диска.

В устройствах для высокоточных измерений обычно применяют прецизионные датчики с круговым усреднением ошибки [17]. Точность преобразования угла такими датчиками высока, а поэтому на общую ошибку измерения практически не влияет.

**Проскальзывание между роликом и измеряемым объектом.** Очевидно, что в процессе измерения длины методом обкатывания не должно быть проскальзывания между измеряемым объектом и роликом как в режиме установившегося движения, так и при разгонах и торможениях, а также при наличии вибраций измеряемого объекта или ролика.

На рис. 43, а показаны силы, действующие на измерительный ролик при условии, что вибрации отсутствуют, а плоскость вращения ролика строго параллельна направлению его относительного перемещения. Ролик прижимается усилием  $P$  к измеряемому объек-

ту, а со стороны последнего к ролику приложены усилие трения  $\mu P$  и реакция  $P$ , смещенная по отношению к вертикальной оси ролика на величину коэффициента трения качения  $f$ . Помимо этого, на ролик действует момент  $M'_c$  сил сопротивления (в подшипни-

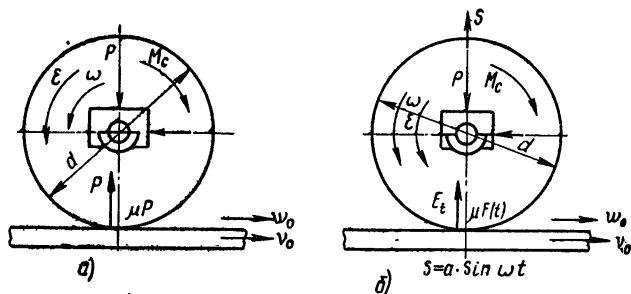


Рис. 43. К анализу влияния неустановившегося движения и вибраций на точность измерений

ках, кинематическом редукторе и т. д.), приведенных к оси вращения ролика.

Уравнение Лагранжа для системы с голономными связями имеет вид [2]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial v}{\partial q} = Q, \quad (27)$$

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $v$  — потенциальная энергия системы;  $t$  — время;  $q$  — обобщенная координата системы;  $Q$  — обобщенная сила.

В нашем случае за обобщенную координату принимаем угол поворота измерительного ролика  $\varphi$ .

Кинетическая энергия ролика

$$T = \frac{J d^2 \varphi}{2 dt^2},$$

где  $J$  — момент инерции измерительного ролика и вращающихся с ним деталей (зубчатые колеса кинематического редуктора, ротор датчика и т. д.), приведенный к оси вращения ролика. Потенциальная энергия ролика  $v=0$ . Обобщенная сила

$$Q = \mu P \frac{d}{2} - M_c,$$

где  $M_c$  — момент сил сопротивления вращению ролика.

Подставляя это выражение в исходное уравнение Лагранжа и учитывая, что  $\frac{\partial T}{\partial q} = 0$ , найдем

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \mu P \frac{d}{2} - M_c,$$

Для качения измерительного ролика по полосе без скольжения необходимо, чтобы обобщенная сила инерции

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \leq \mu P \frac{d}{2} - M_c. \quad (28)$$

где

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{2\omega_0}{d}.$$

Из соотношения (28) получим

$$GD^2 \leq \mu P d^2 \frac{g}{W_0} - 2M_c d \frac{g}{W_0}, \quad (29)$$

где  $g=9,81$  м/сек<sup>2</sup> — ускорение свободного падения (силы тяжести)

Если величина махового момента предопределена конструкцией измерительного устройства, то сила прижатия ролика из условия (29)

$$P \geq GD^2 \frac{W_0}{\mu d^2 g} + \frac{2M_c}{\mu d}. \quad (30)$$

Определим условия качения без скольжения измерительного ролика, когда измеряемый объект вибрирует в вертикальном направлении по синусоидальному закону  $S = a \sin \omega t$ , где  $a$  — амплитуда колебаний,  $\omega$  — частота колебаний (рис. 43,б).

В этом случае положение измерительного ролика определяется двумя обобщенными координатами: углом поворота  $\varphi$  и вертикальным перемещением  $S$  ролика.

Величина кинетической энергии ролика

$$T = \frac{1}{2} J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{1}{2} m \frac{d^2 S}{dt^2},$$

где  $m$  — масса измерительного ролика.

Потенциальная энергия

$$V = PS.$$

Обобщенная сила, соответствующая координате  $\varphi$ ,

$$Q_1 = \frac{1}{2} \mu F(t) d - M_c.$$

Обобщенная сила, соответствующая координате  $S$ ,

$$Q_2 = F(t).$$

Используя уравнение (27), найдем

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \leq \frac{1}{2} \mu F(t) d - M_c; \quad (31)$$

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} + P = F(t). \quad (32)$$

Уравнение (31) идентично уравнению (28), поэтому, решая его совместно с уравнением (32) и принимая во внимание, что в соот-

ветствии с заданным законом вибраций полосы наибольшее значение вертикального ускорения ролика равно  $a\omega^2$ , получим условие, при котором обеспечивается качение без скольжения измерительного ролика по вибрирующей полосе

$$P > GD^2 \frac{W_0}{\mu d^2 g} + \frac{2M_c}{\mu d} + ma\omega^2. \quad (33)$$

Например, при измерении полосы металла, транспортируемого по рольгангу в реальных производственных условиях, когда  $GD^2 = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $W_0 = 3 \text{ м/сек}^2$ ;  $\mu = 0,12$ ;  $d = 0,025 \text{ м}$ ;  $M_c = 0,1 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ;  $m = 3 \text{ кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$ ;  $a = 0,0003 \text{ м}$ ;  $\omega = 150 \frac{1}{\text{сек}}$ , на основании условия (33) получим  $P \geq 53 \text{ кгс}$ .

При правильном выборе силы прижатия проскальзывание измерительного ролика относительно измеряемого объекта можно полностью исключить.

Принятые в рассмотренном примере значения амплитуды и частоты колебаний полосы были найдены экспериментально. Опыты проводились на участке поперечной резки толстых листов стана 2800 при контроле листов толщиной от 8 до 24 мм, шириной от 1500 до 2500 мм, длиной 6—16 м, транспортируемых рольгангом со скоростью до 1 м/сек. Анализ полученных данных показал, что на участках, которые при транспортировке располагаются над роликами рольганга (место установки ролика измерительного устройства), полоса колеблется с частотой  $\omega = 80 \div 150 \frac{1}{\text{сек}}$  и амплитудой 1—0,3 мм.

Большие значения частоты и меньшие значения амплитуды имеют место при колебаниях полосы большей толщины (15—24 мм).

При расчете по формулам (30) и (33) необходимого усилия прижатия измерительного ролика к полосе большое значение имеет правильный выбор величины коэффициента сцепления  $\mu$ .

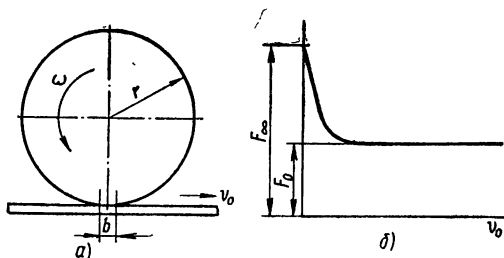


Рис. 44. К определению влияния скорости объекта измерения на величины сил трения в зоне контакта с роликом

Назначая величину коэффициента сцепления  $\mu$ , необходимо принимать во внимание не только материал ролика и измеряемого объекта, состояние контактирующих поверхностей, наличие смазки, эмульсии и т. п., но и относительную скорость перемещения ролика.

Известно, что величина силы трения покоя зависит от продолжительности контакта соприкасающихся тел [21].



Действительно, согласно формуле И. В. Крагельского, сила трения покоя

$$F_t = F_\infty - (F_\infty - F_0) e^{-\beta t}, \quad (34)$$

где  $F_\infty$  — величина силы трения при бесконечно длительном контакте;  $F_0$  — величина силы трения при нулевой продолжительности контакта;  $\beta$  — коэффициент, характеризующий скорость упрочнения контакта;  $t$  — продолжительность неподвижного контакта (время контакта).

Для случая, показанного на рис. 44,а, время неподвижного контакта может быть определено по формуле

$$t = \frac{b}{v_0}, \quad (35)$$

где  $b$  — ширина контактной полосы.

Согласно формуле Герца, ширина полосы контакта для цилиндрической поверхности и плоскости

$$b = 3,04 \sqrt{\frac{P}{2E}} d,$$

где  $P$  — нагрузка на единицу длины контактной полосы.

Например, продолжительность неподвижного контакта между стальным роликом и стальной полосой при  $v_0 = 150$  см/сек, нагрузке  $P = 10$  кгс/см,  $d = 30$  см,  $E = 2 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup> равна  $t = 0,00017$  сек.

Ввиду незначительной продолжительности времени неподвижного контакта, силу трения  $F_t$  между роликом и движущейся полосой можно принимать, согласно уравнению (34), равной силе трения  $F_0$  при нулевой продолжительности контакта ( $F_t \approx F_0$ ), которая, в свою очередь, равна силе трения скольжения между роликом и полосой.

Подставляя выражение (35) в уравнение (34), получим зависимость силы сцепления от скорости перемещения полосы

$$F_v = F_\infty - (F_0 - F_\infty) e^{-\beta \frac{b}{v_0}}$$

Сила трения  $F_v$  уже при малых значениях скорости (рис. 44,б) резко уменьшается до значения  $F_0$ . Дальнейшее увеличение скорости полосы почти не влияет на значение силы  $F_v$ .

На основании изложенного можно принимать при расчетах необходимой силы прижатия по формулам (30) и (33) величину коэффициента сцепления  $\mu$  равной коэффициенту трения скольжения.

**Выводы.** Приведенный выше анализ влияния различных факторов на точность измерения длин и линейных перемещений позволяет сделать следующие выводы.

Наибольшее влияние на точность измерения может оказать неточность обработки и аттестации измерительного ролика по диаметру, температурные деформации ролика и измеряемого объекта, неточность установки измерительного ролика относительно контролируемого объекта. Эти факторы должны учитываться при разработке устройств независимо от их назначения и требуемой точности измерений.

Меньшее влияние могут оказать упругие деформации ролика, неровности на поверхности измеряемого объекта, кинематическая погрешность зубчатой передачи, связывающей ролик с ротором кругового датчика импульсов, дискретность счета импульсов и биение ролика. Однако при разработке устройств для более точных, чем при резке листов, измерений влияние этих погрешностей должно быть учтено расчетным путем на основании приведенных выше формул и зависимостей.

Суммарная погрешность измерения, учитывающая отдельные составляющие погрешности, может быть определена по формуле

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_5 + (\Delta'_6 + \Delta''_6) \pm \sqrt{\Delta_2^2 + \Delta_4^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2}. \quad (36)$$

В этом выражении погрешности первой группы  $\Delta_1$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta_5$ ,  $\Delta'_6$ ,  $\Delta''_6$  можно считать систематическими. Например, погрешность  $\Delta_1$  зависит от неточности изготовления измерительного ролика; погрешность  $\Delta_3$  зависит от выбранной силы прижатия ролика к полосе;  $\Delta_5$  определяется температурным режимом измерения; погрешности  $\Delta'_6$  и  $\Delta''_6$  зависят от неточности начальной установки измерительного ролика. Все эти факторы в процессе измерения остаются неизменными в течение длительного времени.

Погрешности второй группы, входящие в формуле (36) под знак радикала, определяются воздействием случайных факторов.

При определении суммарной погрешности измерения в зависимости от назначения устройства ряд составляющих погрешностей в формуле (36) можно не учитывать ввиду их малости по сравнению с другими составляющими.

Например, при измерении длин прокатываемых листов погрешность  $\Delta_3$  по сравнению с  $\Delta_1$  очень мала ввиду незначительности упругих деформаций ролика для тех величин сил прижатия, которые при соблюдении условия (33) обеспечивают чистое качение ролика по полосе; погрешности  $\Delta'_6$  и  $\Delta''_6$  устраняются при применении для измерений устройств, имеющих механизм самоориентации ролика как по направлению перемещения полосы, так и по ее ширине. Погрешность  $\Delta_5$  при соблюдении надлежащего температурного режима измерений можно уменьшить до нуля. Погрешностями  $\Delta_2$  и  $\Delta_4$  ввиду незначительности по сравнению с погрешностью  $\Delta_7$  также можно пренебречь. Погрешностью  $\Delta_8$  при надлежащей точности изготовления кинематического редуктора и импульсообразующего диска можно пренебречь. Погрешность  $\Delta_9$  при выборе силы прижатия согласно условию (33) также близка к нулю.

Следовательно, при расчете суммарной погрешности измерения листов следует учитывать только составляющие  $\Delta_1$  и  $\Delta_7$ .

Подставляя значения  $\Delta_1 = \frac{\Delta d}{d} L$  и  $\Delta_7 = -C$  в формулу (36), получим

$$\Delta_{\text{сум}} = \frac{\Delta d}{d} L - C. \quad (37)$$

Например, для измерительного устройства, работающего в агрегате поперечной резки алюминиевой полосы, в котором измерительный ролик диаметром  $d=254,65$  мм изготовлен с точностью

$\Delta d = +0,02$  мм, а цена одного импульса равна  $C = 1$  мм, наибольшая величина суммарной погрешности при измерении листов длиной  $L = 3000$  мм  $\Delta_{\text{сум}} = -0,7$  мм.

В уравнении (37) перед вторым членом сохранен только знак минус, что обусловлено условиями работы измерительного устройства в системе точного раскроя полос на листы.

Длина отрезаемых листов с учетом нестабильности выбега полосы после подачи команды на окончательное торможение (величина выбега колеблется в пределах 1—4 мм) может для данного конкретного случая находиться в пределах  $l_{\text{наим}} = 3000,25$  мм и  $l_{\text{наиб}} = 3003,25$  мм.

Полученный расчетным путем результат хорошо подтверждается данными эксплуатации системы точного раскроя полос на листы.

Относительную погрешность измерения длины, выраженную в процентах, можно определить на основании формулы (37) как

$$\delta_L = \frac{\Delta_{\text{сум}}}{L} 100\% = \left( \frac{\Delta d}{d} - \frac{C}{L} \right) 100\%.$$

При исходных данных предыдущего примера для  $L = 3000$  мм  $\delta_4 = -0,025\%$ .

На основании приведенного анализа можно сделать следующие рекомендации.

1. В устройствах, где это позволяют условия установки измерительной головки, для уменьшения влияния неточности установки ролика необходимо применять механизмы для самоориентации измерительного ролика относительно объекта. Это одновременно значительно уменьшит износ ролика ввиду отсутствия при правильной его ориентации бокового и окружного скольжения. Стабильность измерений повышается.

2. Применение многоступенчатых промежуточных зубчатых передач, связывающих измерительный ролик с ротором датчика, не рекомендуется. В устройствах, предназначенных для более точных измерений, датчик угла поворота необходимо связывать непосредственно с осью измерительного ролика.

3. Для уменьшения влияния температурных деформаций желательно (там, где это допустимо по условиям эксплуатации и другим соображениям), чтобы материал ролика и измеряемого объекта имел одинаковый коэффициент линейного расширения.

4. При выборе усилия прижатия ролика к измеряемому объекту необходимо учитывать не только повышение надежности контакта ролика с поверхностью объекта, но и тенденцию изменения ошибки измерения, обусловленную упругими деформациями.

5. В измерительных устройствах для высокоточных измерений биение измерительного ролика должно быть минимальным, а опоры выполнены на базе прецизионных подшипников.

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРОВ

При работе устройств для измерения диаметров возникают погрешности, источники которых аналогичны указанным в п. 1 настоящей главы.

Несколько специфически проявляются температурная деформация ролика и измеряемого объекта, а также дискретность отсчета импульсов. Отсутствует погрешность от неустановившегося движе-

ния ролика относительно объекта измерения, так как обычно измерение производится при равномерном вращении детали и ролика. До выдачи команды старт-стопным датчиком на начало счета измерительных импульсов ролик успевает приобрести установившуюся скорость, а неравномерность вращения станком измеряемой детали настолько незначительна, что практически не влияет на точность измерения.

**Неточность изготовления и износ рабочей поверхности ролика.** Одними из главных причин, ограничивающих точность измерения больших диаметров, так же как и точность измерения длин, являются неточность изготовления ролика и его износ.

Приблизленно величину ошибки измерения диаметра  $D$  можно найти на основании формулы (2), если пренебречь для упрощения неточностью измерения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ :

$$\Delta D = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \Delta d.$$

Поскольку при измерении больших диаметров  $D \gg d$  (из конструктивных соображений затруднительно применять ролик диаметром более 200—300 мм), то и  $\Delta D \gg \Delta d$ .

Таким образом, абсолютная погрешность измерения диаметра оказывается в  $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$  раз больше, чем величина погрешности определения диаметра измерительного ролика.

Величина погрешности, обусловленной износом рабочего диаметра ролика, может быть определена на основании уравнения (5) после его дифференцирования по  $d$ :

$$\Delta_1 D = \frac{\Delta d}{iz_{\partial}} \cdot \frac{n}{\kappa}.$$

Но так как

$$\frac{n}{iz_{\partial} k} = \frac{D}{d},$$

то

$$\Delta_1 D = \frac{D}{d} \Delta d. \quad (38)$$

Формула (38) показывает, что при точных измерениях диаметр ролика должен быть изготовлен с весьма малыми отклонениями.

Например, чтобы измерить при помощи ролика с рабочим диаметром 100 мм диаметр 3500 мм с погрешностью, не превышающей  $\Delta_1 D = 0,035$  мм, отклонение диаметра ролика от номинального не должно превышать 0,001 мм.

Несоответствие диаметра ролика расчетному появляется также в результате длительной эксплуатации измерительного устройства из-за износа, наклепа и осадки поверхностных слоев, вследствие воздействия нагрузки, которой является усилие прижатия ролика к детали. Исследования показали, что у роликов из стали 55Х, твердостью HRC55, при усилии прижатия 8 кгс и отсутствии самоориентации, в начальный период обкатывания наблюдается наклеп и износ поверхности [40]. Этот период соответствует 50 000

оборотам ролика, причем диаметр ролика уменьшается на 5 мкм. При последующем обкатывании диаметр уменьшался приблизительно на 2 мкм за каждые 50 000 оборотов.

Уменьшение диаметра ролика в крайних сечениях в первую очередь из-за неточности его установки происходит значительно интенсивнее, чем в среднем, как в начальный период, так и при установившемся режиме.

**Биение наружной поверхности ролика.** Влияние биения наружной поверхности измерительного ролика на точность контроля диаметров аналогично влиянию, рассмотренному в п. 1 настоящей главы.

Как было указано выше, величина измеряемого диаметра определяется по количеству импульсов, выданных датчиком за целое число оборотов детали или за время поворота ролика на угол  $\alpha_p$ .

При наличии биения, как это следует из зависимостей (10) и (11), измерительный ролик будет поворачиваться на дополнительный угол

$$\Delta\alpha_p = \pm \frac{2e}{d_p} \sin \varphi.$$

Тогда, на основании формулы (2), прибор зарегистрирует размер

$$D_1 = \frac{\alpha_p \pm \Delta\alpha_p}{\alpha_\partial} d_p.$$

В то время как при отсутствии биения он зарегистрировал бы размер

$$D = \frac{\alpha_p}{\alpha_\partial} d_p.$$

Таким образом, погрешность измерения

$$\Delta_2 D = D_1 - D = \pm \frac{\Delta\alpha_p}{\alpha_\partial} = \pm \frac{2e}{\alpha_\partial} \sin \varphi,$$

или, с учетом формулы (3),

$$\Delta_2 D = \pm \frac{e}{\pi k} \sin \varphi.$$

Очевидно,

$$\Delta_2 D_{\max} = \pm \frac{e}{\pi k}.$$

Следовательно, погрешность, вызываемая биением ролика, будет проявляться в меньшей степени при увеличении числа оборотов измеряемой детали за один цикл измерения.

Например, при биении ролика  $e=0,01$  мм и измерении за один оборот детали погрешность  $\Delta_2 D \approx 0,003$  мм, а при измерении за два оборота  $\Delta_2 D = 0,0015$  мм. Такой погрешностью при измерении больших диаметров (свыше 1—2 м) можно пренебречь.

**Упругие деформации измерительного ролика и детали.** При измерении диаметров ролик может контактировать с цилиндрической

наружной и внутренней поверхностями. В этом случае ошибка измерения определяется величиной сближения осей вращения контролируемой детали и измерительного ролика, т. е. изменением их рабочих диаметров.

Величину и характер сближения можно определить (для стального ролика и стальной детали) по следующей формуле [35]:

$$\delta = \frac{2q(1-\mu^2)}{\pi E} \ln \frac{\pi E(D \pm d) \rho_1 \rho_2}{(1-\mu^2) q D d}, \quad (39)$$

где  $q = \frac{P}{b}$  — нагрузка на единицу длины контакта в кгс/мм;  $E = E_1 = E_2$  — модуль нормальной упругости материала детали ( $E_1$ ) и ролика ( $E_2$ );  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — расстояния от площадки контакта по нормали до точек, между которыми вычисляется сближение.

Для расчетов может быть принято [35]  $\rho_1 = \rho_2$  и

$$\rho_0 = \sigma_{z \max} = \frac{2q}{\pi b_n}, \quad (40)$$

где  $\rho_0$  — максимальное давление в центре площадки контакта, совпадающее с максимальным нормальным напряжением  $\sigma_{z \max}$  на площадке

$$b_n = 0,01 \left( \frac{q}{\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (41)$$

представляющей собой половину ширины контактной площадки в мм (знак «—» для контакта выпуклой и охватывающей цилиндрических поверхностей).

Расчеты показывают, что при используемых на практике диаметрах измерительного ролика величины сближений осей вращения ролика и детали в диапазоне измеряемых диаметров  $D = 400 \div 10\,000$  мм очень мало изменяются, а поэтому для оценки погрешности метода обкатывания роликом можно с достаточной достоверностью пользоваться формулами (12) и (15), с помощью которых определяется упругое уменьшение диаметра ролика, вызванное усилием прижатия.

Величина погрешности измерения в этом случае может быть определена на основании формул (38), (12) и (15):

$$\Delta_3 D = \left( 4 \frac{1-\mu^2}{\pi E} + \frac{\pi}{2E} \right) \frac{qD}{d}.$$

При измерении с помощью стального ролика стальной детали

$$\Delta_3 D = 1,37 \cdot 10^{-4} \frac{qD}{d} \text{ мм.}$$

Например, для прибора с шириной ролика  $b = 10$  мм, диаметром 100 мм при усилии прижатия  $P = 30$  кгс и при измерении детали диаметром  $D = 2000$  мм  $\Delta_3 D \approx 8,2 \cdot 10^{-4}$  мм.

Приведенный пример показывает, что при точных измерениях

диаметров крупногабаритных деталей погрешностью  $\Delta_3 D$  пренебрегать нельзя.

Кроме деформаций в зоне контакта ролика и детали, при работе измерительного устройства возникают деформации в опорах ролика, а также и упругие деформации самого ролика. Если он выполнен составным из обода-кольца и ступицы, упругие деформации могут оказать еще более существенное влияние на точность измерения, а путем расчета их определить затруднительно. Как будет показано ниже, эти деформации можно учесть при аттестации измерительного устройства.

**Неровности на поверхности деталей.** Ранее указывалось, что микронеровности, соответствующие  $\nabla 5$  и выше, значительного влияния на точность измерения не оказывают.

Это объясняется прежде всего тем, что при классах чистоты  $\nabla 5$ — $\nabla 14$  упругие и остаточные деформации при качении измерительного ролика по поверхности детали невелики. Однако при более грубой обработке, как показали исследования НИИПТМАШа, ЦНИИТМАШа [31] и Львовского политехнического института [24], происходят смятие гребешков поверхности детали и заметные упругие деформации поверхностного слоя, в результате чего снижается точность измерения и увеличивается поле рассеивания показаний прибора.

Макронеровности поверхности детали, как показали исследования, проявляются в виде некруглости поперечного сечения [12].

Одной из основных причин возникновения погрешности измерения диаметров методом обкатывания роликом является его нечувствительность к некруглости контролируемых деталей. Существует мнение, что это является основным препятствием на пути к использованию метода обкатывания в цеховых условиях.

Если положить, что форма поперечного сечения измеряемой детали близка к эллипсу, то нетрудно подсчитать ошибку измерения методом обкатывания роликом [10].

Фактически поперечное сечение детали после механической обработки имеет более сложную форму, чем эллипс, а поэтому НИИПТМАШем проведено большое количество измерений некруглости реальных крупногабаритных деталей в цеховых условиях и на основании записанных профилограмм оценены величины биения и некруглости деталей.

При определении величины некруглости из записанной профилограммы цилиндрической поверхности детали выделяли эксцентриситет проверяемого сечения относительно оси вращения и некруглость сечения [33].

Для записи профилограмм крупногабаритных деталей в цеховых условиях было использовано измерительное устройство, выполненное на базе щупового индуктивного дифференциального датчика.

Всего записано и обработано 64 профилограммы 33 деталей, обрабатывающихся на токарных станках (диаметры планшайб 1810—2800 мм) и карусельных станках (диаметры планшайб 2100—4500 мм) как отечественного, так и зарубежного (США, ГДР, Чехословакия) производств 1939—1961 г.

Наиболее типичные профилограммы показаны на рис. 45, а и б, где вверху изображены эскизы контролируемых деталей с указанием принятых в машиностроении условных обозначений устано-





вочных базовых поверхностей и мест приложения усилий зажима при креплении на станке.

В номенклатуру обследованных деталей входили валы, диски, венцы, барабаны, цапфы, изготовленные из литых, кованных и сварных стальных и чугунных заготовок. Диапазон диаметров обследуемых деталей на токарных станках составлял 590—2210 мм, на карусельных — 1172—3730 мм; обработка детали производилась по 2—7-му классам точности; класс чистоты поверхности соответствовал  $\nabla 3$ — $\nabla 5$ .

Профилограммы записывались как после окончательной, так и после предварительной обработки.

В результате обработки и анализа профилограмм выявлено, что характер и величина некруглости деталей большого диаметра определяются в основном видом заготовки, жесткостью и формой детали. Поэтому дана общая оценка параметров некруглости независимо от того, как обрабатывалась поверхность: предварительно или окончательно. При измерении деталей, обрабатываемых без нарушения технологии, ее параметры имели следующие величины:

- 1) максимальное перемещение щупа в процессе записи профилограмм  $H \leq 1,75 \cdot 10^{-4}$  мм;
- 2) максимальная величина некруглости  $\Delta R_{\max} = 1,3 \cdot 10^{-4} D$  мм;
- 3) биение деталей  $2e \leq 1,3 \cdot 10^{-4} D$  мм;
- 4) величина некруглости, вызванной овальностью,  $\delta_1 \leq 0,75 \cdot 10^{-4} D$  мм;
- 5) величина некруглости, вызванной огранкой,  $\delta_2 \leq 0,75 \cdot 10^{-4} D$  мм;
- 6) число граней  $M=6$ .

Как показали исследования, профилограммы поверхности реальной детали в прямоугольной системе координат представляют собой изображение периодической функции, весьма близкой к синусоидальной.

Принимая длину продольной оси профилограммы за длину идеальной средней окружности, а длину профилограммы — за периметр реальной детали и используя интегральное выражение длины  $L$  плоской кривой [2], получим

$$L = \int \sqrt{1 + A^2 \omega^2 \cos^2 \omega x} dx,$$

(где  $\omega$  — частота синусоиды;  $A$  — амплитуда;  $x$  — аргумент), или, заменив

$$\cos^2 \omega x = 1 - \sin^2 \omega x,$$

получим

$$L = \int \sqrt{1 + A^2 \omega^2 - A^2 \omega^2 \sin^2 \omega x} dx.$$

Вводя обозначения

$$\frac{A^2 \omega^2}{1 + A^2 \omega^2} = \frac{A^2 \omega^2}{B^2} = K_A^2 \quad (42)$$

и заменив аргумент, будем иметь

$$L = \frac{B}{\omega} \int \sqrt{1 - K_A^2 \sin^2 \psi} d\psi. \quad (43)$$

Подынтегральное выражение в уравнении (43) представляет собой табличный эллиптический интеграл второго рода, обозначаемый  $E_n$ .

Для пределов от 0 до  $\pi/2$  интеграл  $E_n$  при  $K_A = \sin \alpha$  и при  $\alpha = 0$  имеет величину  $E_n = 1,5708$  и при  $\alpha = 1^\circ$   $E_n = 1,5707$ .

Обозначив  $A$  — амплитуду профилограммы поверхности детали;

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi D}{M}$  — период синусоидальных колебаний на профилограмме, можно записать

$$\omega = \frac{2M}{D}, \quad (44)$$

где  $D$  — диаметр идеальной средней окружности.

После подстановки выражения (44) в выражение (42) получим

$$K_A = \frac{2AM}{\sqrt{4A^2 M^2 + D^2}}.$$

Если подставить в последнее выражение величины  $A$ ,  $M$ ,  $D$ , взятые при самых худших условиях экспериментов ( $A = 0,2$  мм;  $M = 6$ ;  $D = 600$  мм), то получим  $K_A = \sin \alpha = 0,004$ ;  $\alpha = 14$ . Поэтому принимаем значение подынтегрального выражения  $E_n = 1,5708$ .

Используя обозначения (42) и выражение (44), будем иметь

$$\frac{B}{\omega} = \frac{\sqrt{D^2 + 4A^2 M^2}}{2M}.$$

Так как интегрирование производилось в пределах от 0 до  $\pi/2$ , то для получения полной длины периметра детали необходимо  $E_n$  умножить на  $4M$ .

Тогда

$$L = 2E_n \sqrt{D^2 + 4A_n^2 M^2} = 3,1416 \sqrt{D^2 + 4A_n^2 M^2}.$$

Но так как  $2A_n = \Delta R = \delta$  (величина некруглости), то

$$L = \pi \sqrt{D^2 + \delta^2 M^2}. \quad (45)$$

Очевидно, что вычисленная по формуле (45) длина эллипса ( $M = 2$ ) может приниматься за исходную при определении периметра детали, обладающей и огранкой ( $M > 2$ ). В этом случае, учитывая, что  $M = 2$ , формулу (45) можно записать в следующем виде:

$$L = \pi \sqrt{D^2 + 4\delta_1^2 + M^2 \delta_2^2}$$

или

$$D_n = \sqrt{D_{cp}^2 + 4\delta_1^2 + M^2 \delta_2^2}, \quad (46)$$

где  $D_n$  — диаметр по показаниям обкатного измерительного устройства;  $D_{cp}$  — средний диаметр детали.

Подставляя в формулу (46) предельные величины, полученные при анализе профилограмм (для  $\varnothing 1400$  мм), получим  $D_n = 1400,002$  мм.

Данный пример показывает, что при реальных предельных значениях величины некруглости отклонения показаний измерительного устройства могут составить не более  $1/5$  цены импульса (при цене импульса 0,01 мм).

Таким образом, при допустимых нормах точности искажения формы поперечного сечения деталей, обрабатываемых на тяжелых токарных и карусельных станках, измерительные устройства выдают показания, весьма близкие к среднему диаметру детали.

**Температурные деформации детали и ролика.** Температура в процессе измерений детали и ролика может отличаться от нормальной ( $20^\circ\text{C}$ ), при которой осуществляется аттестация диаметра ролика. Кроме того, температура детали и ролика может быть различной. Все это приводит к появлению погрешности измерения. Величина погрешности складывается из двух составляющих, первая из которых определяется температурной деформацией ролика, а вторая — температурной деформацией детали.

Если измеряемая деталь и ролик имеют равномерное распределение температуры по всей массе, то суммарное значение температурной погрешности измерения можно определить из следующей зависимости:

$$\Delta_b D = D [\alpha_d (t_d - 20^\circ\text{C}) - \alpha_r (t_r - 20^\circ\text{C})], \quad (47)$$

где  $\alpha_d$  и  $\alpha_r$  — коэффициент линейного расширения детали и ролика;  $t_d$  и  $t_r$  — температура детали и ролика.

Величины температурных погрешностей приведены в работе [31].

Однако в реальных условиях обработки крупногабаритной детали происходит интенсивное нагревание ее в зоне резания. Остальная масса детали из-за больших размеров не успевает нагреться равномерно. Распределение температуры по сечению детали к моменту процесса измерения зависит от многих факторов, в том числе от 1) массы и формы детали; 2) режимов резания, при которых производилась обработка; 3) условий обработки (окружающая среда, охлаждение детали в зоне резания и т. п.); 4) длительности промежутка времени между процессом резания и измерением; 5) качества материала заготовки детали.

Температура ролика тоже влияет на точность измерения и зависит от: 1) конструкции измерительной головки и типа датчика импульсов (индуктивный, фотоэлектрический и т. п.); 2) числа оборотов ролика в процессе измерения; 3) правильности ориентации ролика относительно детали и ряда других факторов.

В связи с изложенным определить расчетным путем величину погрешности практически невозможно.

Определение величины погрешности измерения, вызванной температурными деформациями детали и ролика, является одной из самых сложных задач проблемы измерения диаметров крупногабаритных деталей.

Эта задача может быть решена, очевидно, только после изучения распределения температуры в различных точках деталей основных типов (валы, барабаны, колеса различной формы и размеров), причем для такого изучения потребуется проанализировать большое количество статистических данных.

**Неточность установки ролика.** Неточность установки измерительного ролика относительно оси вращения контролируемой детали может проявляться в виде пересечения или в виде скрещивания осей ролика и детали.

Непараллельность осей ролика и детали приводит к погрешностям, возникающим в результате деформаций ролика и детали от усилий прижатия. Если при измерении длин деформации измеряемого объекта практически не влияют на точность измерения, то при измерении диаметров ими пренебрегать нельзя. Величины деформаций, а следовательно, и погрешности измерения, могут быть определены на основании зависимостей, приведенных при рассмотрении погрешностей от упругих деформаций. Однако, кроме упругих, при такой неточности установки возникают остаточные деформации на поверхности детали (ролик практически не имеет остаточных деформаций). В результате этого появляется заметный невооруженным глазом накатанный пояс, глубина которого зависит от материала детали, формы фаски ролика, усилия прижатия ролика к детали и погрешности установки ролика. Опыты показывают, что даже при измерении стальных деталей за два оборота детали глубина накатанного пояска может достигать нескольких сотых долей миллиметра.

При наличии скруглений боковых кромок ролика радиусом  $r$  (см. рис. 40, а) погрешность измерения, зависящая от уменьшения рабочего диаметра ролика, будет определяться по формуле

$$\Delta'_5 D = \frac{2r_\kappa (1 - \cos \alpha)}{d} D.$$

При реальных величинах  $r_\kappa = 1$  мм,  $D = 2000$  мм;  $d = 100$  мм и  $\alpha = 2^\circ$  погрешность измерения составит  $\Delta'_5 D = -0,06$  мм.

Более существенной может явиться погрешность, обусловленная скрещиванием осей вращения измерительного ролика и контролируемой детали.

В ряде работ [11, 24, 38] погрешность измерения, вызванную скрещиванием осей, определяют исходя из предположения, что окружные скорости ролика  $v_p$  и измеряемой детали  $v_d$  связаны между собой зависимостью

$$v_p = v_d \cos \beta,$$

где  $\beta$  — угол между осями вращения измеряемой детали и ролика.

За время измерения  $t$  измеряемая деталь повернется на угол

$$\alpha_d = \frac{2v_d t}{D},$$

а ролик — на угол

$$\alpha_p = \frac{2v_p t}{d} = \frac{2v_d t \cos \beta}{d}.$$

При отсутствии проскальзывания  $v_p = v_d$  и

$$\alpha_{p_0} = \frac{2v_d t}{d},$$

а при наличии последнего угол поворота ролика уменьшится на величину

$$|\Delta \alpha_p| = \alpha_{p_0} - \alpha_p = \frac{2v_d t}{d} (1 - \cos \beta).$$

Тогда погрешность измерения

$$\Delta_5'' D = -\frac{\Delta \alpha_p}{\Delta \alpha_\theta} d = D (1 - \cos \beta)$$

вызывает занижение показаний регистрирующего прибора измерительного устройства.

Указанные зависимости недостаточно точно отражают характер изменения величины погрешности при увеличении угла  $\beta$  и могут использоваться для ориентировочной оценки погрешности измерений. Однако результаты экспериментальных исследований, проведенных рядом авторов [22, 11, 24], дают хорошую сходимость с вычислениями, выполненными по формуле, учитывающей сопротивление ролика качению:

$$\Delta_5'' D = -D (1 - \cos \beta + B \sin \beta),$$

где

$$B = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\mu_1 d_{ц}}{d} + \frac{f}{2} \right).$$

**Несовпадение командных и измерительных импульсов.** Как известно, счет импульсов, поступающих от кругового датчика угла поворота измерительного ролика, осуществляется в промежутке времени между командными импульсами датчика числа оборотов детали, или, как иногда принято его называть, старт-стопного датчика.

Несовпадение командных и измерительных импульсов является причиной ошибок, вносимых счетчиком в результат счета импульсов, поступающих за время измерения от датчика измерительного устройства.

Величина погрешности может быть найдена [7] на основании анализа временных диаграмм (рис. 46).

Очевидно, что если время измерения  $t_u = t_{k_2} - t_{k_1}$  кратно  $\tau_u$  и нет совпадения во времени командных и измерительных импульсов (рис. 46, а), то погрешность в счете импульсов  $\Delta n = 0$ .

В случае совпадения во времени командных и измерительных импульсов в начале и конце счета импульсов ошибка  $\Delta n = -1$ .

Объясняется это особенностью работы электронной ключевой схемы.

На диаграммах (рис. 46, б) показаны более общие случаи, когда время измерения  $t_u$  некратно периоду следования измерительных импульсов  $\tau_u$ . Если промежутки времени между моментом выдачи очередного измерительного импульса и моментом поступления командного импульса  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  малы по сравнению с  $\tau_u$ , то ошибка в счете импульсов будет равна  $\Delta n \neq 1$ .

Это значение и будем принимать за величину наибольшей погрешности от несовпадения командных и измерительных импульсов, т. е.  $\Delta_6 D = +C$ , где  $C$ , согласно выражению (6), есть цена одного импульса в единицах диаметра.

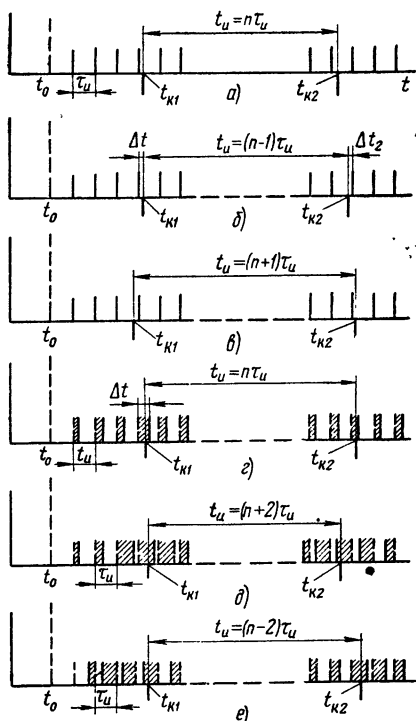
Для уменьшения погрешности  $\Delta_6 D$  при измерении необходимо применять устройства с датчиками импульсов высокой дискретности (малой ценой импульса).

**Неточность изготовления элементов зубчатой передачи.** Неточность изготовления зубчатой передачи, связывающей измерительный

ролик и диск датчика угла поворота, как уже отмечалось, приводит к тому, что измерительные импульсы смещаются во времени по отношению к тем положениям, которые они занимали бы при отсутствии погрешностей (рис. 46, г, д, е).

Рис. 46. Временные диаграммы измерительных и командных импульсов:

$t_0$  — момент времени, соответствующий началу работы датчика измерительного устройства;  $t_{K1}$  — момент подачи командного импульса начала счета;  $t_{K2}$  — момент подачи командного импульса окончания счета;  $\tau_u$  — промежуток времени между двумя смежными импульсами (период следования импульсов)



Величина смещения  $\Delta t$  каждого импульса определяется мгновенным значением ошибки передачи угла поворота измерительного ролика.

На величину  $\Delta t$  будет оказывать влияние и неточность изготовления самого импульсообразующего диска датчика.

Если величина наибольшего смещения  $\Delta t < \frac{\tau_u}{2}$ , то предельная ошибка счета импульсов  $\Delta n = \pm 1$ .

Если наибольшее смещение импульсов находится в пределах  $\frac{1}{2}\tau_u \leq \Delta t \leq \tau_u$ , то погрешность в счете импульсов может достигать значения  $\Delta n = \pm 2$  (рис. 46, д, е).

При достаточно точном изготовлении редуктора и импульсообразующего диска датчика, когда соблюдается условие  $\Delta t < \frac{\tau_u}{2}$ ,

дополнительная погрешность в счете импульсов по сравнению со случаями, показанными на рис. 46, а, б, в, не появляется, т. е. можно принимать, что  $\Delta_8=0$ .

**Скольжение между роликом и деталью.** При анализе погрешностей измерения длин рассматривалось только проскальзывание, которое может возникнуть из-за недостаточного усилия прижатия ролика к измеряемому объекту. Упругое скольжение не рассматривалось ввиду относительно малого его влияния на точность измерения. Однако при измерении диаметров влияние упругого скольжения может оказаться более заметным. Упругое скольжение обуславливается упругими деформациями ролика и детали в тангенциальном направлении [36]. Поскольку в измерительных устройствах окружное усилие зависит только от сил сопротивления вращению ролика и датчика импульсов и весьма мало, то относительное скольжение, например, у стального ролика в контакте со стальной деталью, как показывают опыты НИИПТМАШа, составляет примерно 0,01%.

Несмотря на то, что такое относительное скольжение на порядок меньше, чем в фрикционных передачах, при точных измерениях диаметров им пренебрегать нельзя. Неравномерность вращения планшайбы или стола из-за погрешностей кинематических цепей станка, биений и дисбалансов элементов станка и прочих причин настолько незначительна, что обнаружить ее влияние на точность измерений не удастся. Измерительный ролик обычно имеет небольшую массу и при соприкосновении с деталью весьма быстро разгоняется до установившегося движения.

В связи с изложенным погрешностью измерения от неравномерности движения контролируемой детали и ролика можно пренебречь. Проскальзывание ролика относительно детали может происходить при вибрациях системы станок — измеряемая деталь — измерительное устройство (ролик). Условия, при которых обеспечивается качение измерительного ролика без скольжения при наличии вибраций, аналогичны выраженным уравнением (33).

**Конусность детали и ролика.** При наличии конусности измеряемой детали и ролика возникает геометрическое скольжение вследствие изменения скорости поверхностей детали и ролика по длине линии их контакта.

Чистое качение имеет место только в полюсе качения, в остальных точках — качение со скольжением [36].

Поскольку для определения цены импульса измерительных устройств при аттестации диаметра ролика определяется величина его среднего диаметра, то можно предположить, что эта величина будет соответствовать диаметру в сечении ролика, равноотстоящего от его торцовых поверхностей. То же можно сказать и о положении сечения измеряемой детали, диаметр которого будет зарегистрирован на табло измерительного устройства.

В действительности измерение будет осуществляться в плоскости, проходящей через полюс качения.

Расчеты показывают, что для реальной величины конусности крупногабаритных деталей, получаемой в результате износа резцов (0,5/1000), и реальной величины конусности измерительного ролика (0,1/1000) при обычных измерениях деталей, изготовленных не точнее, чем по 2-му классу, погрешностью измерения можно пренебречь.

**Выводы.** Сделанные ранее выводы по результатам анализа по-

погрешностей измерения длины полностью подтверждаются анализом погрешностей измерения диаметров.

Однако специфика работы измерителей диаметров накладывает некоторые дополнительные условия на их эксплуатацию.

Точные измерения не следует рекомендовать в процессе резания, так как, обеспечивая условия качения без скольжения ролика, мы вынуждены создавать такие усилия на ролик, при которых будут появляться значительные упругие деформации ролика, его опор и измеряемой детали. Таким образом, уменьшая погрешность измерения, вызванную вибрациями, мы будем увеличивать погрешность, вызываемую деформациями.

Если проанализировать величины погрешностей от всех перечисленных факторов и сделать их расчет для реальных измерительных устройств, то нетрудно прийти к заключению о нецелесообразности использования метода обкатки для измерения диаметров менее 1000 мм как с точки зрения метрологических требований к точности измерений, так и технико-экономических показателей.

При современном состоянии техники измерений диаметров методом обкатывания роликом следует рекомендовать его использование в цеховых условиях для контроля наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, обработанных не точнее, чем по 2а или 3-му классу.

Точные измерения следует производить при шероховатости поверхности контролируемой детали не ниже  $\nabla 5$ — $\nabla 6$  и отсутствии смазки или охлаждающей жидкости.



САМООРИЕНТАЦИЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РОЛИКА

Как показал анализ, большое влияние на результат измерения оказывает точность установки ролика относительно объекта измерения. Это подтверждается также исследованиями, проведенными в Красноярском сельскохозяйственном институте [39], Краматорском НИИПТМАШе [11], ЦНИИПТМАШе [31] и Львовском политехническом институте [24].

Имеются два пути уменьшения погрешности, обусловленной неточностью установки измерительного ролика. Первый путь предусматривает предварительную тщательную юстировку положения ролика в пространстве с помощью уровней, оптических приборов, отпечатков на бумаге площадки контакта между роликом и объектом измерения и т. п., второй — автоматизацию процесса ориентации в процессе измерения.

Точная предварительная установка измерительного ролика эффективна лишь в тех случаях, когда в процессе измерения относительное положение контролируемого объекта и измерительной головки не меняется или меняется настолько незначительно, что погрешность измерения, вызванная этим, не окажет существенного влияния на результат измерения или не повлечет за собой недопустимого рассеивания показаний регистрирующего прибора.

Например, при использовании метода обкатывания роликом для контроля линейных перемещений элементов металлорежущих станков в ряде случаев измерительный ролик устанавливается на подвижную часть станка и перекатывается по линейке, закрепленной на станке. Такое размещение измерительного устройства не требует автоматической ориентации ролика, если направляющие выполнены достаточно точно и хорошо отрегулированы.

В приборах переносного типа, которые устанавливаются перед измерением, а после их окончания или в конце смены снимаются со станка, точная предварительная ориентация ролика относительно измеряемого объекта в большинстве случаев оказывается неэффективной. Применяемые для этой цели методы проверки положения ролика с помощью уровня, щупа или отпечатка площадки контакта ролика на бумаге не дают гарантии правильной оценки ориентации в процессе измерения, а тем более при переустановке измерительной головки в новое положение относительно детали. Во-первых, такая оценка положения ролика носит субъективный характер, во-вторых, в процессе работы подвижные элементы станка ввиду наличия зазоров в стыках направляющих меняют свою относительную угловую ориентацию, и, в-третьих, сам процесс предваритель-

ной ориентации с помощью уровней и других средств, как показал опыт эксплуатации измерителей диаметров, занимает много больше времени, чем непосредственно процесс измерения детали, и требует достаточного навыка.

Что касается контроля длин листов в линиях резки гильотинными ножницами [4], то проведенные Краматорским НИИПТМАШем опыты и эксплуатация измерительных устройств показали, что без автоматической самоориентации измерительного ролика использовать в этом случае метод обкатывания для точных измерений невозможно.

Изложенные выше причины привели ряд исследователей к разработке схем и конструкций устройств для автоматической ориентации измерительного ролика относительно измеряемого объекта, которые мы для краткости будем называть устройствами для самоориентации ролика.

### СХЕМЫ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ САМООРИЕНТАЦИИ РОЛИКА

Самоориентация измерительного ролика впервые<sup>1</sup> была применена Краматорским НИИПТМАШем в приборах ИД-3 для измерения наружных диаметров на тяжелых токарных и карусельных станках.

Механизм самоориентации измерительного ролика (рис. 47) представляет собой рамку 8, внутри которой в одной плоскости закреплены измерительный ролик 12 со встроенным датчиком и тождественный ему по размерам и форме опорный ролик 1.

В этой же плоскости между роликами находится шаровой шар-

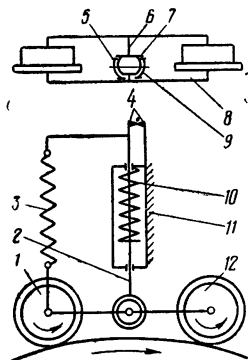


Рис. 47. Схема двухроlikового устройства для самоориентации измерительного ролика

нир 9, связывающий рамку с неподвижной частью 11 установочного устройства. Установочное устройство крепится на суппорте или в резцедержателе подобно резцу.

<sup>1</sup> Мельничук В. А., Иванов Б. Н. Устройство для измерения больших диаметров методом обкатки. Авторское свидетельство № 183964, кл 42в, 24. «Бюллетень изобретений, промышленных образцов и товарных знаков», № 14, 1966

В качестве шарового шарнира использован сферический самоустанавливающийся шарикоподшипник, внутреннее кольцо которого напрессовано на ось 6, закрепленную в рамке параллельно осям измерительного и опорного роликов, а наружное впрессовано в расточку головки штока 2, скользящего во втулках неподвижной части устройства и нагруженного пружиной 10, которая создает ос-

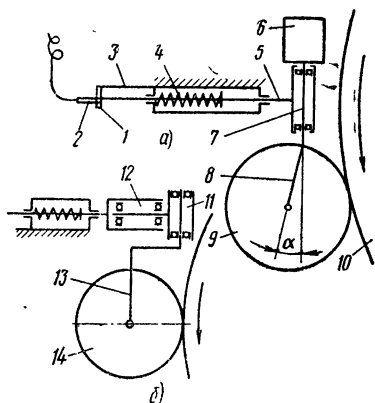


Рис. 48. Схема однороликовых механизмов самоориентации в измерителях диаметров

новое усилие прижатия датчика к детали. Пружина растяжения 3 в ненагруженном состоянии стремится повернуть рамку по часовой стрелке, в связи с чем при подводе устройства к измеряемой детали первым в контакт с деталью вступает измерительный ролик и, увлекаемый вращающейся деталью, устанавливается в положение, при котором его ось вращения параллельна оси вращения детали.

Подвод измерительной головки продолжается до вступления в контакт с деталью опорного ролика и достижения заданного усилия прижатия измерительного ролика. О достижении заданного усилия судят по относительному положению подвижного и неподвижного индексов 4. Опыт показал, что надежная самоориентация достигается в том случае, если непараллельность осей ролика и детали не превышает  $1,5^\circ$ . Поэтому в конструкцию шаровидного шарнира введен кольцевой упор-ограничитель перекоса 7, являющийся одновременно контактом сигнальной лампочки.

Если перекос головки относительно измеряемой детали превышает допустимую величину и самоориентация не происходит, замыкается контакт между кольцом 5, закрепленным на наружной обойме подшипника-шарнира, и упором, и на панели электронно-счетного прибора загорается запрещающий сигнал.

Дальнейшее усовершенствование механизма самоориентации с целью использования его при измерении как наружных, так и внутренних диаметров привело к однороликовой конструкции измерительной головки<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Мельничук В. А., Иванов Б. Н. и Дмитриев Н. М., Устройство для автоматического измерения больших диаметров методом обкатки. Авторское свидетельство № 199431, кл. 42в, 22/03. «Бюллетень изобретений, промышленных образцов и товарных знаков», № 15, 1967.

Головка (рис. 48, а) состоит из неподвижной части 3 и вилки 8 с измерительным роликом 9, в который встроен датчик угла поворота. Вилка может свободно поворачиваться вокруг двух пересекающихся осей 7 и 5. Поворот головки ограничивается в необходимых пределах двумя шпонками, установленными на осях 7 и 5 и несущими на себе контакты сигнализатора предельных перекосов. Ось качания, направленная нормально к поверхности измеряемой детали 10, нагружена цилиндрической пружиной 4, создающей усилие прижатия ролика к детали. С помощью специального кольца и фиксатора ось 5 может поворачиваться на  $180^\circ$  и фиксироваться в одном из положений. Это необходимо при изменении направления вращения детали и при измерении диаметров внутренних цилиндрических поверхностей. На конце оси 5 размещены: указатель с сигнальным контактом заданного усилия прижатия ролика 1 и измеряемой детали и кабельный разъем 2. Качающиеся части головки сбалансированы противовесом 6.

Измерительная головка с представленным на рис. 48, а механизмом самоориентации ролика очень удобна при эксплуатации на карусельных и токарных станках.

Однако наиболее благоприятные условия для самоориентации измерительного ролика создаются в том случае, когда последний имеет возможность поворачиваться вокруг оси, касательной к рабочей поверхности измеряемой детали.

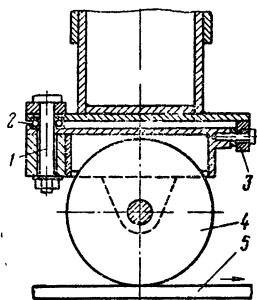


Рис. 49. Схема механизма самоориентации в устройстве для измерения длин

Поэтому при создании оснастки к приборам для измерения только наружных диаметров на токарных станках следует рекомендовать механизм самоориентации, используемый на Ижорском машиностроительном заводе (рис. 48, б)\*. Самоориентация осуществляется за счет того, что ролик 14 имеет возможность поворачиваться вокруг осей 11 и 12. Отличием этого механизма от представленного на рис. 48, а является то, что ось качания вилки 13 проходит через точку касания ролика с измеряемой деталью. Такое положение оси создает наиболее благоприятные условия для самоориентации измерительного ролика.

В устройствах для контроля длины листов 8 используется несколько отличающаяся от вышеприведенных схема механизма самоориентации (рис. 49). Шкворень 1 дает возможность измерительно-

\* Быстров Ю. А. Устройство для измерения больших диаметров методом обкатки. Авторское свидетельство № 228967, кл. 42в. «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», № 32, 1968.

му ролику 4 под действием силы сцепления с полосой 5 занять положение, при котором плоскость его вращения строго параллельна направлению скорости листа. Вертикальная составляющая реакции листа на измерительный ролик воспринимается шарикоподшипником 2 и опорным роликом 3.

## ПРОДОЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ РОЛИКА

Продольной мы будем называть ориентацию измерительного ролика в направлении линейной скорости поверхности контролируемого объекта.

Если рассмотреть механизмы, представленные на рис. 47—49, то очевидно, что продольная ориентация обеспечивается за счет поворота ролика вокруг оси, перпендикулярной плоскости движения контролируемого объекта.

Условия процесса самоориентации зависят от формы и размеров объекта измерения, размеров ролика и параметров устройства для самоориентации.

Полагая, что устройство для самоориентации обеспечивает положение ролика, при котором точка его касания с объектом измерения находится на равном расстоянии от кромок ролика, условие самоориентации при контроле диаметров может быть определено на основании зависимостей (23), (24) и (26). Однако это условие справедливо практически при небольшом радиусе кривизны объекта измерения в точке касания с поверхностью ролика.

В реальных условиях в момент подвода ролика к измеряемому объекту угол между осями их вращения не превышает  $2-3^\circ$ . В этом случае образующая цилиндрической поверхности ролика соприкасается с эллиптическим сечением объекта в точке, близкой к пересечению эллипса с его малой полуосью.

Ниже приведены величины радиусов кривизны  $R_\beta$  в указанной точке, соответственно при  $\beta=1,5^\circ$  и  $\beta=3^\circ$ , для некоторых значений  $D$ .

$D$ в м	0,1	0,25;	0,5;	1,0;	2,0;	10	
$R_\beta$ в м	36,5;	230;	911;	3650;	14700;	365000	( $\beta=1,5^\circ$ )
$R_\beta$ в м	0,92;	5,54;	22,15;	92;	355,5;	9200	( $\beta=3^\circ$ )

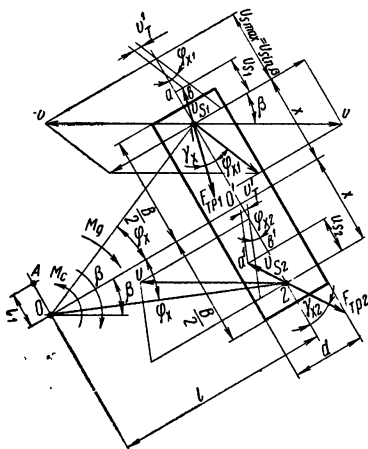
Таким образом, для значения  $\beta=1,5^\circ$ , близкого к реальному, в условиях эксплуатации устройств [13] радиусы кривизны эллипса превышают 3500 м даже при  $D=1,0$  м. При таких радиусах кривизны стрелка дуги, ограниченной хордой, равной ширине ролика (10—20 мм), не превысит 5 мкм, что соизмеримо с высотой микронеровностей при чистовой обработке поверхности и с величинами упругих деформаций ролика и измеряемого объекта в зоне их контакта.

Следовательно, при  $\frac{D}{d} \gg 10$  и  $\beta \leq 3^\circ$  для упрощения решения задачи анализ процесса самоориентации целесообразно производить, допуская, что  $R_\beta = \infty$ , т. е. рассматривать взаимодействие ролика с плоскостью.

Рассмотрим соотношение сил, действующих на ролик диаметром  $d$  и шириной  $B$  в плоскости перемещения контролируемого объекта со скоростью  $v$  (рис. 50).

Допустим, что до начала измерения положение ролика определяется углом  $\beta$ . Со стороны объекта измерения, находящегося в плоскости чертежа, к ролику приложена реакция  $P$  и сила трения  $\mu P$ , которая раскладывается на две составляющие: окружное  $T$  и боковое  $S$  усилия (см. рис. 40).

Рис. 50. Усилия, действующие на ролик при его неправильной ориентации относительно измеряемого объекта



Очевидно, чтобы удержать ролик в заданном углом  $\beta$  положении, к нему необходимо приложить внешнее усилие, стремящееся повернуть ролик в направлении момента  $M_d$  (рис. 50).

Если действие усилия прекращается, начинается процесс самоориентации ролика под действием приложенных к нему со стороны движущегося объекта измерения сил трения. В этом случае (рис. 50) направление элементарных сил трения, приложенных к ролику в точках 1 и 2, расположенных на одинаковых расстояниях от точки  $O'$ , определяется положением этих точек по ширине ролика (координатой и величинами осевого и окружного проскальзываний ролика). Сила трения  $F_{тр}$  всегда направлена в сторону, противоположную вектору суммарного скольжения.

Наибольшее значение скорости осевого проскальзывания в любой точке контакта ролика с измеряемым объектом  $v'_{s \max} = v \sin \beta$  и имеет место только в случае, когда угловая скорость ролика относительно точки  $O$   $\beta' = 0$ .

Наибольшая величина скорости тангенциального проскальзывания в какой-либо точке  $v'_{t \max} = v \sin \beta \operatorname{tg} \varphi$ . Скорость тангенциального проскальзывания достигает максимума в случае, когда  $v'_s = 0$ .

Преодоление момента сил сопротивления  $M_c$  в шарнире  $O$  и сил сопротивления вращению ролика неизбежно связано с появлением скоростей осевого  $v'_s$  и окружного  $v'_t$  скольжений ролика.

Действительно, если предположить, что  $v'_s = 0$ , то вектор скорости суммарного скольжения  $v_s$  принимает для точек 1 и 2 направление, параллельное оси  $OO$ , в связи с чем проекции элемен-

тарных сил трения на ось ролика обращаются в нуль, преодоление момента  $M_c$  становится невозможным.

Если предположить, что скорость окружного проскальзывания  $v_T = 0$  (скорость осевого скольжения  $v_S$ ), то векторы скоростей суммарного скольжения  $v_{S1}$  и  $v_{S2}$  принимают для точек 1 и 2 соответственно направления  $1a$  и  $2a$ . Поскольку точки 1 и 2 расположены по ширине ролика симметрично, то составляющие элементарных сил трения, расположенные в плоскости вращения ролика, будут равны по величине, но противоположны по направлению, в связи с чем преодоление окружного усилия  $T$  на ролике становится невозможным.

При наличии осевого и окружного проскальзываний направление элементарных сил трения (рис. 50) обеспечивает преодоление как момента  $M_c$  в процессе самоориентации, так и окружного усилия  $T$  на измерительном ролике. Очевидно, что при увеличении  $M_c$  и  $T$  скорости  $v_S$  и  $v_T$  также возрастают; это, в свою очередь, обуславливает изменение направления элементарных сил трения, приложенных к ролику в точках касания его с объектом измерения.

Величина угловой скорости  $\beta'$  измерительного ролика при его повороте в процессе самоориентации вокруг оси  $O$  зависит не только от текущего значения угла  $\beta$  и момента сил сопротивления  $M_c$  в шарнире  $O$ , но и от конструктивных параметров устройства — плеча  $l$  и ширины измерительного ролика  $B$ .

Влияние перечисленных факторов может быть выявлено из условия равновесия приложенных к ролику сил относительно шарнира  $O$ .

Составляющая элементарной силы трения, приложенная к ролику в точке 1 (координата точки  $x$ ) и расположенная в плоскости вращения ролика,

$$dT_1 = F_{mp} \sin \gamma_{x_1} = \frac{\mu P}{B} \sin \gamma_{x_1} dx. \quad (48)$$

Составляющая элементарной силы трения, направленная вдоль оси ролика,

$$dS_1 = F_{tp} \cos \gamma_{x_1} = -\frac{\mu P}{B} \cos \gamma_{x_1} dx. \quad (49)$$

Из  $\Delta ab1$

$$\operatorname{tg} \gamma_{x_1} = \frac{ab}{al} = \frac{\beta' l \operatorname{tg} \varphi_x - v_T'}{v_S'}.$$

$$\text{Учитывая, что } \operatorname{tg} \varphi_x = \frac{x}{l} \text{ и } v = v_S' \sin \beta - \beta' l,$$

получим

$$\operatorname{tg} \gamma_{x_1} = \frac{\beta' x - v_T'}{v \sin \beta - \beta' l} = \frac{x - \frac{v_T'}{\beta'}}{A} = \frac{x_1}{A}, \quad (50)$$

где

$$A = \frac{v \sin \beta - \beta' l}{\beta'}; \quad x_1 = x - \frac{v_T'}{\beta'}.$$

Выражая  $\sin \gamma_{x_1}$  и  $\cos \gamma_{x_1}$  через  $\operatorname{tg} \gamma_{x_1}$ , с учетом выражения (50) получим

$$\sin \gamma_{x_1} = \frac{\operatorname{tg} \gamma_{x_1}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_{x_1}}} = \frac{x_1}{\sqrt{A^2 + x_1^2}};$$

$$\cos \gamma_x = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_{x_1}}} = \frac{A}{\sqrt{A^2 + x_1^2}}.$$

Подставляя эти значения в уравнения (48) и (49), получим

$$dT_1 = \frac{\mu P}{B} \frac{x_1 dx_1}{\sqrt{A^2 + x_1^2}}; \quad (51)$$

$$dS_1 = -\frac{\mu P}{B} \frac{A dx_1}{\sqrt{A^2 + x_1^2}}. \quad (52)$$

Момент силы  $dT_1$  относительно оси  $O$

$$dM_{T_1} = dT_1 x = \frac{\mu P}{B} \frac{x_1 \left( x_1 + \frac{v_T'}{\beta'} \right) dx_1}{\sqrt{A^2 + x_1^2}} \quad (53)$$

и направлен против часовой стрелки.

Момент силы  $dS_1$  относительно оси  $O$

$$dM_{S_1} = dS_1 l = -\frac{\mu P l A}{B} \cdot \frac{dx_1}{\sqrt{A^2 + x_1^2}} \quad (54)$$

и направлен по часовой стрелке.

Для точки 2 контакта ролика с измеряемым объектом, расположенной по ширине ролика симметрично точке 1, аналогично получаем

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma_{x_2} &= \frac{a' b'}{b' 2} = \frac{\beta' l \operatorname{tg} \varphi_x + v_T'}{v_S'} = \frac{\beta' x + v_T'}{v \sin \beta - \beta' l} = \\ &= \frac{x + \frac{v_T'}{\beta'}}{A} = \frac{x_2}{A}, \end{aligned}$$

где

$$x_2 = x + \frac{v_T'}{\beta'};$$



$$dT_2 = \frac{\mu P}{B} \frac{x_2 dx_2}{\sqrt{A^2 + x_2^2}}; \quad dS_2 = \frac{\mu P}{B} \frac{A dx_2}{\sqrt{A^2 + x_2^2}}. \quad (55)$$

Момент силы  $dT_2$  относительно оси  $O$

$$dM_{T_2} = dT_2 x = \frac{\mu P}{B} \frac{x_2 \left( x_2 - \frac{v'_T}{\beta'} \right) dx_2}{\sqrt{A^2 + x_2^2}}$$

и направлен против часовой стрелки.

Момент силы  $dS_2$  относительно оси  $O$

$$dM_{S_2} = dS_2 l = \frac{\mu P l A}{B} \frac{dx_2}{\sqrt{A^2 + x_2^2}}$$

и направлен по часовой стрелке.

Интегрируя и преобразуя уравнения (51) и (55), получим

$$T_1 = -\frac{\mu P}{2C} \left[ \sqrt{1 + \left( C - \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} \right]; \quad (56)$$

$$T_2 = \frac{\mu P}{2C} \left[ \sqrt{1 + \left( C + \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} \right],$$

где на основании уравнения (50)  $C = \frac{B}{2A}$ ,  $\beta' A = v'_S$ .

Окружное усилие на ролике

$$T = T_2 - T_1 = -\frac{\mu P}{2C} \left[ \sqrt{1 + \left( C + \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( C - \frac{v'_T}{v'_S} \right)^2} \right]. \quad (57)$$

Как показывают вычисления, для небольших значений  $\frac{B}{A}$  величина  $C$  много больше единицы. Пренебрегая единицей под знаком радикала в уравнении (57), получим

$$T = \frac{\mu P}{C} \cdot \frac{v'_T}{v'_S},$$

откуда

$$\frac{v'_T}{v'_S} = \frac{T}{\mu P} C. \quad (58)$$

В результате интегрирования уравнений (53) и (52) получим, учетом условия (58),

$$\begin{aligned}
 M_{T_1} = & \frac{\mu PB}{8C^2} \left[ C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) \sqrt{1 + C^2 \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right)^2} - \right. \\
 & - \frac{T}{\mu P} C \sqrt{1 + C^2 \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2} + \\
 & \left. - \frac{T}{\mu P} C + \sqrt{1 + C^2 \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2} \right] + \ln \frac{C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) + \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2}}{C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) + \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2}} \Bigg]; \\
 M_{T_2} = & \frac{\mu PB}{8C^2} \left[ C \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right) \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2} + \right. \\
 & + \frac{T}{\mu P} C \sqrt{1 + C^2 \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2} + \\
 & \left. + \ln \frac{\frac{T}{\mu P} C + \sqrt{1 + C^2 \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2}}{C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) + \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2}} \right].
 \end{aligned}$$

Сумма найденных моментов

$$\begin{aligned}
 M_{T_1} + M_{T_2} = & \frac{\mu PB}{8C^2} \left\{ C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) \sqrt{1 + C^2 \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right)^2} + \right. \\
 & + C \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right) \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2} - \ln \left\{ \left[ C \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{1 + C^2 \left( 1 - \frac{T}{\mu P} \right)^2} \right] \left[ C \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{1 + C^2 \left( 1 + \frac{T}{\mu P} \right)^2} \right] \right\} \Bigg\}. \quad (59)
 \end{aligned}$$

При проектировании измерительных устройств, основанных на методе обкатывания, обеспечиваются условия, при которых отношение  $\frac{T}{\mu P} \ll 1$ , поэтому уравнение (59) принимает вид

$$M_{T_1} + M_{T_2} = \frac{\mu PB}{4C^2} [C \sqrt{1 + C^2} + \ln (C + \sqrt{1 + C^2})]. \quad (60)$$

После интегрирования уравнений (54) и (49) получим

$$M_{S_1} = -\frac{\mu Pl}{2C} \ln \frac{C \left(1 - \frac{T}{\mu P}\right) + \sqrt{1 + C^2 \left(1 - \frac{T}{\mu P}\right)^2}}{-\frac{T}{\mu P} C + \sqrt{1 + C^2 \left(\frac{T}{\mu P}\right)^2}};$$

$$M_{S_2} = -\frac{\mu Pl}{2C} \ln \frac{C \left(1 + \frac{T}{\mu P}\right) + \sqrt{1 + C^2 \left(1 + \frac{T}{\mu P}\right)^2}}{\frac{T}{\mu P} C + \sqrt{1 + C^2 \left(\frac{T}{\mu P}\right)^2}}.$$

Сумма найденных моментов

$$M_{S_1} + M_{S_2} = -\frac{\mu Pl}{2C} \ln \left\{ \left[ C \left(1 - \frac{T}{\mu P}\right) + \sqrt{1 + C^2 \left(1 - \frac{T}{\mu P}\right)^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ C \left(1 + \frac{T}{\mu P}\right) + \sqrt{1 + C^2 \left(1 + \frac{T}{\mu P}\right)^2} \right] \right\}. \quad (61)$$

Учитывая, как и в предыдущем случае, что  $\frac{T}{\mu P} \ll 1$ , уравнение (61) может быть записано следующим образом:

$$M_{S_1} + M_{S_2} = -\frac{\mu Pl}{C} \ln (C + \sqrt{1 + C^2}). \quad (62)$$

Условие равновесия ролика при его вращении относительно шарнира  $O$  (рис. 49) определяется уравнением

$$(M_C - M_\partial) + M_{T_1} + M_{T_2} - (M_{S_1} + M_{S_2}) = 0.$$

В этом уравнении  $M_\partial$  — момент динамических усилий на длине ролика.

Подставляя в полученное условие равновесия найденные ранее значения моментов сил  $T$  и  $S$ , с учетом уравнения (62) и (60) получим

$$M_C - M_\partial + \frac{\mu PB}{4C^2} \left[ C \sqrt{1 + C^2} + \ln (C + \sqrt{1 + C^2}) \right] - \\ - \frac{\mu Pl}{C} \ln (C + \sqrt{1 + C^2}) = 0.$$

После преобразований и потенцирования имеем

$$e^{\frac{4C^2 (M_C - M_\partial) + \mu PB C \sqrt{1 + C^2}}{\mu P (4Cl + B)}} = C + \sqrt{1 + C^2}. \quad (63)$$

Например, для измерительного устройства, у которого  $B = 15$  см,  $l = 15,5$  см при  $\mu = 0,1$ ;  $P = 100$  кгс;  $M_C = 10$  кгс·см и  $M_\partial = 45$  кгс·см, величина  $C$ , найденная из уравнения (63), равна 420.

По найденному значению  $C$ , согласно уравнению (56), может быть определена величина  $A$ , равная для данного случая  $0,02 \text{ см}$ . Поскольку, согласно уравнению (50),  $\frac{v \sin \beta - \beta' l}{\beta'} = A$ , то угловая скорость  $\beta'$  в процессе самоустановки может быть найдена по формуле

$$\beta' = \frac{v}{A + l} \sin \beta. \quad (64)$$

Анализ уравнения (63) показывает, что при увеличении отношения  $\frac{l}{B}$  величина  $A$  уменьшается, т. е. уменьшается значение осевого скольжения ролика  $v'_S$  в процессе самоориентации.

Из соотношения (58) следует, что при  $B=0$  величина  $A=0$ , т. е. в этом случае скорость осевого проскальзывания ролика  $v'_S$  в процессе самоориентации равна нулю.

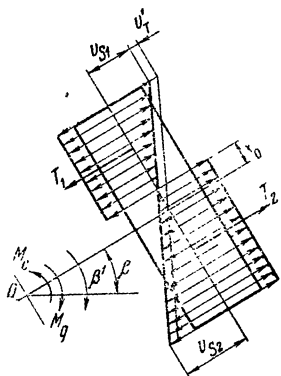


Рис. 51. К анализу усилий в процессе самоориентации ролика

Уравнение (63) справедливо в случае, когда

$$v'_S = v \sin \beta - \beta' l > 0.$$

Если  $v'_S = 0$ , угол  $\gamma_x = 90^\circ$ , уравнения (48) и (55) принимают вид

$$dT_1 = -dT_2 = -\frac{\mu P}{B} dx. \quad (65)$$

Ввиду наличия окружного проскальзывания со скоростью  $v'_T$  диаграмма скольжений (рис. 51) не симметрична по ширине ролика и полюс качения смещен на величину

$$x_0 = \frac{v'_T}{\beta'} = \frac{v'_T l}{v \sin \beta}.$$

Поэтому на основании уравнения (65)

$$T_1 = \int_{x_0}^{\frac{B}{2}} \frac{\mu P}{B} dx = \frac{\mu P}{2} - \frac{\mu P}{B} \cdot \frac{v'_T l}{v \sin \beta};$$

$$T_2 = \int_{-x_0}^{\frac{B}{2}} \frac{\mu P}{B} dx = \frac{\mu P}{2} + \frac{\mu P}{B} \frac{v'_T l}{v \sin \beta}.$$

Величина окружного усилия на ролике

$$T = T_2 - T_1 = \frac{2\mu P}{B} \cdot \frac{v'_T l}{v \sin \beta},$$

откуда скорость окружного проскальзывания

$$v'_T = \frac{T}{\mu P} \cdot \frac{B}{2l} v \sin \beta. \quad (66)$$

Момент силы  $T_1$  относительно оси  $O$

$$M_{T_1} = \int_{x_0}^{\frac{B}{2}} dT_1 x = \int_{x_0}^{\frac{B}{2}} \frac{\mu P}{B} x dx = \frac{\mu P B}{8} - \frac{\mu P B}{8} \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2,$$

где  $x_0$  с учетом уравнения (66) равен

$$x_0 = \frac{T}{\mu P} \cdot \frac{B}{2}.$$

Аналогично,

$$M_{T_2} = \int_{-x_0}^{\frac{B}{2}} dT_2 x = \frac{\mu P B}{8} + \frac{\mu P B}{8} \left( \frac{T}{\mu P} \right)^2.$$

Условие равновесия измерительного ролика имеет вид

$$M_c - M_\partial + M_{F_1} + M_{T_2} = 0,$$

откуда

$$M_c - M_\partial + \frac{\mu P B}{4} = 0.$$

Если допустим, что скорость осевого скольжения  $v'_S = v \sin \beta - \beta' l < 0$ , уравнение (50) принимает вид

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \frac{y}{\beta' l - v \sin \beta} = \frac{\beta' x}{\beta' l - v \sin \beta} = \frac{x}{A_1},$$

где

$$A = \frac{\beta' l - v \sin \beta}{\beta'}.$$

После вычислений, аналогичных предыдущим, находим условие равновесия измерительного ролика для случая  $v \dot{S} < 0$

$$\frac{4C_1^2 (M_\partial - M_c) - \mu P B C_1 \sqrt{1 + C_1^2}}{\mu P (4C_1 l - B)} = C_1 + \sqrt{1 + C_1^2}, \quad (67)$$

где

$$C_1 = -\frac{B}{2A_1}.$$

Анализ уравнений (63) и (67) позволяет заключить, что при небольших значениях моментов сопротивления  $M_c$  и достаточной силе трения  $\mu P$  между объектом измерения и роликом осевое проскальзывание ролика в процессе самоориентации незначительно, в связи с чем величиной  $A$ , ввиду малости по сравнению с  $l$ , в уравнении (64) можно пренебречь.

Угловая скорость  $\beta'$  может в этом случае определяться по формуле

$$\beta' = \frac{v}{l} \sin \beta. \quad (68)$$

Наибольшее значение восстанавливающего момента равно сумме моментов сил, приложенных к ролику, относительно вертикальной оси при  $\beta' = 0$ :

$$M_\partial = Sl - M_c,$$

или на основании уравнения (24)

$$M_\partial = l \sqrt{(\mu P)^2 - T^2} - M_c. \quad (69)$$

Очевидно, что для увеличения восстанавливающего момента необходимо увеличить плечо  $l$ , коэффициент сцепления  $\mu$  ролика с объектом измерения и силу прижатия  $P$ . При уменьшении окружного усилия  $T$  и момента сил сопротивления  $M_c$  восстанавливающий момент возрастает.

Поскольку наибольшее значение усилия  $S$  не зависит от угла  $\beta$ , то и величина восстанавливающего момента также не зависит от угла перекоса измерительного ролика. При угле перекоса  $\beta = 0$  боковое усилие обращается в нуль, если отсутствуют внешние силы, которые стремились бы вывести измерительный ролик из этого состояния.

Если  $\beta = 0$ , то величина и направление силы  $S$  между роликом и измеряемым объектом определяются исключительно величиной и направлением силы  $F$ , которая должна была бы вызвать проскальзывание.

Составляющая силы трения  $S$  все время равна по величине и противоположна по направлению этой внешней силе, однако ее наибольшее значение не может превосходить значения, определяемого

уравнением (24), т. е. сила трения между роликом и полосой в этом случае обладает всеми свойствами силы трения покоя.

Если ось шкворня смещена от плоскости симметрии измерительного ролика на плечо  $l_1$  (расстояние между точками  $A$  и  $O$  на рис. 57), то ролик будет самоустанавливаться при соблюдении соотношения

$$M_c + l_1 T < l S'$$

или

$$l_1 < l \sqrt{\left(\frac{\mu P}{T}\right)^2 - 1} - \frac{M_c}{T}.$$

При использовании этой зависимости следует учитывать, что величина окружного усилия находится в границах  $0 < T \leq \mu P \cos \beta$ .

Продолжительность процесса самоориентации ролика при наличии начального перекоса, измеряемого углом  $\beta_0$ , может быть найдена из следующих соотношений. Поворот рамы ролика на угол  $d\beta$  происходит за время

$$dt = - \frac{d\beta}{|\beta'|} = - \frac{d\beta}{\frac{v}{l \sin \beta}} = - \frac{l}{v} \cdot \frac{d\beta}{\sin \beta}, \quad (70)$$

где  $|\beta'| = \frac{v}{l} \sin \beta$  — абсолютное значение угловой скорости ролика относительно точки  $O$  (рис. 50), соответствующее текущему значению угла перекоса  $\beta$  (68).

Поскольку приращение  $d\beta$  имеет отрицательный знак, то для получения положительного значения  $dt$  перед выражением (70) поставлен знак минус.

Полагая, что скорость  $v$  в процессе самоориентации остается постоянной, после интегрирования уравнения (70) получим выражение для определения времени поворота измерительного ролика относительно точки  $O$ :

$$t = - \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{l}{v} \frac{d\beta}{\sin \beta} = - \frac{l}{v} \ln \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \Big|_{\beta_0}^{\beta} = \frac{l}{v} \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta_0}{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta}. \quad (71)$$

На основании уравнения (71) угол перекоса  $\beta$  в процессе самоориентации изменяется во времени согласно уравнению

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta_0 e^{-\frac{v}{l} t} \right).$$

Угловая скорость

$$\beta' = \frac{d\beta}{dt} = - \frac{v}{l} \sin \left[ 2 \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta_0 e^{-\frac{v}{l} t} \right) \right].$$

Угловое ускорение

$$\beta'' = \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -\frac{v^2}{2l^2} \sin \left[ 4 \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta_0 e^{-\frac{v}{l} t} \right) \right].$$

Величина пути, проходимого объектом измерения за время самоориентации ролика, определяется из уравнения (71):

$$L = tv = l \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta_0}{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta}.$$

Погрешность измерения линейного перемещения измеряемого объекта роликом малой ширины за время самоориентации (скорость окружного проскальзывания  $v_T=0$ ) можно определить исходя из следующих соображений.

Элементарное перемещение объекта измерения за время поворота рамы измерительного устройства на угол  $d\beta$  согласно уравнению (71) равно

$$dL = -l \frac{d\beta}{\sin \beta}, \quad (72)$$

где  $\beta$  — текущее значение угла перекоса.

Величина элементарного перемещения, зарегистрированная измерительным устройством,

$$dL_p = dL \cos \beta = -l \operatorname{ctg} \beta d\beta.$$

Погрешность измерения перемещения

$$d(\Delta_{10}) = dL - dL_p = l \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{1}{\sin \beta} \right) d\beta.$$

Погрешность измерения за время самоориентации ролика при уменьшении угла от начального значения  $\beta_0$  до значения  $\beta$

$$\Delta_{10} = l \int_{\beta_0}^{\beta} \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{1}{\sin \beta} \right) d\beta = l \left( \ln \sin \beta - \ln \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) \Big|_{\beta_0}^{\beta}. \quad (73)$$

После преобразования выражения (73) окончательно получим

$$\Delta_{10} = 2l \ln \frac{\cos \frac{1}{2} \beta}{\cos \frac{1}{2} \beta_0}. \quad (74)$$

При определении погрешности измерения за время самоустановки ролика, находящегося с объектом измерения в контакте по ширине  $B$ , необходимо учитывать окружное проскальзывание ролика.



В этом случае величина элементарного перемещения полосы, зарегистрированная измерительным устройством,

$$dL_p = dL \cos \beta - v_T' dt.$$

С учетом выражений (66), (72) и (73)

$$dL_p = dL \cos \beta + v_T' \frac{l}{v} \cdot \frac{d\beta}{\sin \beta} = -l \operatorname{ctg} \beta d\beta + \frac{T}{\mu P} \frac{\beta}{2} d\beta.$$

Погрешность измерения перемещения  $dL_n$

$$d(\Delta_{10}) = dL - dL_p = l \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{1}{\sin \beta} \right) d\beta - \frac{T}{\mu P} \cdot \frac{\beta}{2} d\beta.$$

Погрешность измерения за время самоориентации ролика

$$\Delta_{10} = \int_{\beta_0}^{\beta=0} d(\Delta_{10}) = 2l \ln \frac{1}{\cos \frac{1}{2} \beta_0} + \frac{T}{\mu P} \cdot \frac{\beta}{2} \beta_0. \quad (75)$$

При качении измерительного ролика по цилиндрической поверхности объекта измерения (например, при измерении диаметра) в процессе самоориентации имеет место точечный контакт между роликом и измеряемым объектом.

В этом случае второй член в уравнении (75) обращается в нуль.

Из выражения (74) следует, что погрешность  $\Delta_{10}$  определяется в основном двумя факторами: величиной угла  $\beta_0$  и параметром  $l$  измерительного устройства.

Погрешность  $\Delta_{10}$  проявляется только в начале цикла измерения и только в случае наличия начального перекоса  $\beta_0$  измерительного ролика.

## ПОПЕРЕЧНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ РОЛИКА

Поперечной мы будем называть ориентацию измерительного ролика в плоскости, перпендикулярной направлению линейной скорости поверхности измеряемого объекта в точке касания с измерительным роликом.

От качества поперечной ориентации зависят условия контакта ролика по длине образующей его цилиндрической поверхности с измеряемым объектом (контакт по ширине  $B$ ).

Допустим, что положение ролика в момент его соприкосновения с поверхностью измеряемого объекта определяется углом  $\alpha$  (рис. 52, а).

Самоориентация ролика с объектом измерения по всей длине образующей в процессе прижатия ролика к объекту измерения возможна, если момент силы трения  $\mu P$  относительно оси  $O$  меньше момента силы прижатия  $P$  относительно той же оси, т. е.

$$\mu P H_1 < P h. \quad (76)$$

Но так как

$$H_1 = \frac{B}{2} \sin \alpha + H \cos \alpha;$$

$$h = \frac{B}{2} \cos \alpha + H \sin \alpha,$$

то выражение (76) принимает вид

$$\mu \left( \frac{B}{2} \sin \alpha + H \cos \alpha \right) < \frac{B}{2} \cos \alpha - H \sin \alpha,$$

откуда ширина ролика  $B$ , при которой обеспечивается самоориентация в процессе прижатия, должна удовлетворять условию

$$B > 2H \frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}. \quad (77)$$

Для малых углов перекоса, когда  $\alpha < 5^\circ$ , можно принять

$$\sin \alpha = \alpha; \quad \cos \alpha = 1$$

и условие (77) принимает вид

$$B > 2H \frac{\mu + \alpha}{1 - \mu \alpha}. \quad (78)$$

При  $\alpha = 0$  из выражения (77) получаем условие, при соблюдении которого обеспечивается контакт ролика с объектом измерения по всей ширине  $B$  (исключается его поворот относительно оси  $O$ )

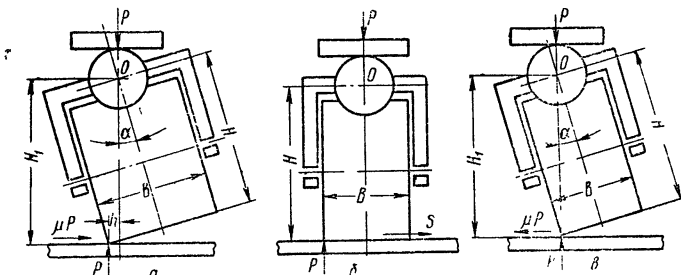


Рис. 52. Различные положения ролика в процессе прижатия к измеряемому объекту

под действием бокового усилия  $S \approx \mu P$ ) в процессе самоориентации ролика по направлению перемещения объекта измерения (рис. 52, б):

$$B > 2\mu H. \quad (79)$$

Например, для измерительного устройства, у которого  $H = 258$  мм, при  $\mu = 0,2$  согласно условию (79) должно быть  $B > 103$  мм.

В случае, показанном на рис. 52, в, когда плечо  $h = 0$ , а плоскость вращения ролика строго параллельна вектору  $v$ , самоориентация ролика по ширине в процессе прижатия и при его качении по объекту измерения невозможна.

Однако в процессе самоориентации по направлению перемещения измеряемого объекта ролик под действием бокового усилия  $S \approx \mu P$  легко самоустанавливается и по ширине, если направление момента силы относительно оси  $O$  совпадает с направлением уменьшения угла перекоса  $\alpha$ .

Например, при контакте ролика с измеряемым объектом в точке 2 (рис. 53, а) в процессе самоориентации по направлению перемещения объекта измерения ролик под действием усилия устанавливается также и по ширине.

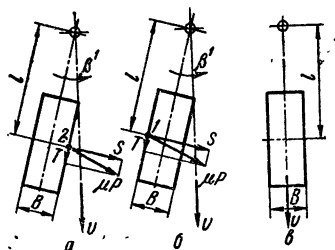


Рис. 53. Усилия, действующие на ролик при самоориентации по ширине

При контакте ролика с полосой в точке 1 под действием силы  $S$  осуществляется самоориентация только по направлению перемещения полосы, самоориентация ролика по ширине в этом случае также невозможна (рис. 53, б).

Для обеспечения условий самоориентаций, показанных на рис. 53, в, при проектировании измерительных устройств с малой шириной ролика  $B$  необходимо предусматривать ряд конструктивных мер.

Если ширина ролика  $B$  ограничена конструктивными условиями или условиями технологии измерений (например, в устройствах для измерения диаметров), то для обеспечения самоориентации ролика по ширине необходимо уменьшить плечо  $H$  и ограничить соответствующими конструктивными элементами наибольшую допустимую величину угла перекося  $\alpha$ , которая согласно уравнению (78) не должна превышать

$$\alpha_{\max} < \frac{B - 2\mu H}{\mu B + 2H}.$$

При этом согласно уравнению (79) должно соблюдаться условие

$$H < \frac{B}{2\mu}.$$

#### ВЛИЯНИЕ КОНУСНОСТИ РОЛИКА НА САМООРИЕНТАЦИЮ

При наличии конусности рабочей поверхности измерительного ролика (рис. 54, а), измеряемой углом  $\alpha$ , в точках контакта ролика с объектом измерения неизбежно возникает окружное проскальзывание, скорость которого в какой-либо точке, отстоящей на расстоянии  $x$  от полюса  $O_1$  качения, определяется уравнением

$$v_x = \frac{x\alpha}{2R_{O_1}} v, \quad (80)$$

где  $R_{O_1}$  — радиус наружной поверхности ролика в точке  $O_1$  (полюс, в котором скорость окружного проскальзывания равна нулю).

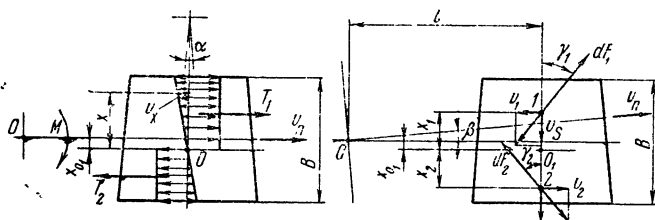


Рис. 54. Схема для определения влияния конусности рабочей поверхности ролика на самоориентацию

Уравнение (80) может быть получено из следующих соотношений.

Окружная скорость ролика в точке  $x$   $v_{окр\ x} = \omega_p R_x$ , где  $\omega_p = \frac{v}{R_{O_1}}$  — угловая скорость ролика;  $R_x$  — радиус ролика на расстоянии  $x$  от полюса  $O_1$  качения.

Следовательно,

$$v_{окр\ x} = \frac{v}{R_{O_1}} R_x,$$

а скорость скольжения

$$v_x = v - \frac{v}{R_{O_1}} R_x = v \left( \frac{R_{O_1} - R_x}{R_{O_1}} \right). \quad (81)$$

Поскольку  $R_{O_1} - R_x = \frac{x\alpha}{2}$ , то с учетом уравнения (81) получаем уравнение (80).

Величина смещения  $x_{O_1}$  полюса по отношению к плоскости симметрии ролика зависит от величины окружного усилия на ролике и может быть найдена из условия

$$T_{кр} = T_1 - T_2 = \frac{\mu P}{B} \left( \frac{B}{2} + x_{O_1} \right) - \frac{\mu P}{B} \left( \frac{B}{2} - x_{O_1} \right),$$

откуда

$$x_{O_1} = \frac{T_{кр}}{\mu P} \cdot \frac{B}{2}.$$

Усилия  $T_1$  и  $T_2$  создают относительно шарнира  $O$  момент  $M$ , стремящийся повернуть вокруг точки  $O$  ролик на угол  $\beta$  (рис. 54, б).

При повороте на угол  $\beta$ , в точках контакта ролика с объектом измерения, помимо окружного проскальзывания, возникает осевое скольжение, скорость которого для всех точек одинакова и равна  $v_s = v \sin \beta$ .

Направление элементарных сил трения  $dF_1$  и  $dF_2$  в произвольных точках 1 и 2 с координатами  $x_1$  и  $x_2$  определяется углами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , величины которых могут быть найдены из уравнений

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{v_1}{v_S} = \frac{x_1 \alpha}{2R_{O_1} \sin \beta}; \quad \operatorname{tg} \gamma_2 = \frac{v_2}{v_S} = \frac{x_2 \alpha}{2R_{O_1} \sin \beta},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — окружные скорости проскальзывания в точках 1, 2, определяемые уравнением (80).

Величина угла перекоса  $\beta$ , очевидно, может быть найдена из условия равновесия сил трения, приложенных к ролику по линии его контакта с объектом измерения, относительно шарнира O.

Проекция элементарной силы трения  $dF_1$  на линию контакта

$$\begin{aligned} dS_1 = dF_1 \cos \gamma_1 &= \frac{\mu P}{B} dx_1 \cos \gamma_1 = \frac{\mu P}{B} \frac{dx_1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_1}} = \\ &= \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \frac{dx_1}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_1^2}}. \end{aligned} \quad (82)$$

Интегрируя выражение (82), найдем

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_0^{\frac{B}{2} + x_0} dS_1 = \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \int_0^{\frac{B}{2} + x_0} \frac{dx_1}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_1^2}} = \\ &= \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \ln \left[ \left( \frac{B}{2} + x_{O_1} \right) + \sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + \left( \frac{B}{2} + x_{O_1} \right)^2} \right] - \\ &\quad - \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \ln \frac{2R_{O_1} \sin \beta}{\alpha}. \end{aligned}$$

Аналогично, интегрируя выражение проекции элементарной силы трения  $dF_2$  (пределы интегрирования 0 и  $\frac{B}{2} - x_0$ ) и проводя соответствующие преобразования, получим

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \ln \left[ \left( \frac{B}{2} - x_{O_1} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + \left( \frac{B}{2} - x_{O_1} \right)^2} \right] - \\ &\quad - \frac{2\mu PR_{O_1} \sin \beta}{B\alpha} \ln \frac{2R_{O_1} \sin \beta}{\alpha}. \end{aligned}$$

Момент сил  $S_1$  и  $S_2$  относительно шарнира  $O$

$$M_{(S_1+S_2)} = (S_1 + S_2) l.$$

Этот момент направлен против часовой стрелки.

Проекции элементарных сил трения на плоскость вращения ролика

$$dT_1 = dF_1 \sin \gamma = \frac{\mu P}{B} dx_1 \sin \gamma_1 = \frac{\mu P}{B} \frac{dx_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_1}} = \frac{\mu P}{B} \times \\ \times \frac{x_1 dx_1}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_1^2}};$$

$$dT_2 = dF_2 \sin \gamma_2 = \frac{\mu P}{B} dx_2 \sin \gamma_2 = \frac{\mu P}{B} \cdot \frac{x_2 dx_2}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_2^2}}.$$

Моменты элементарных сил  $dT_1$  и  $dT_2$  относительно оси  $O$

$$dM_{T_1} = dT_1 (x_1 - x_0) = \frac{\mu P}{B} \frac{x_1^2 dx_1}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_1^2}} - \frac{\mu P x_0}{B} \times \\ \times \frac{x_1 dx_1}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_1^2}}; \quad (83)$$

$$dM_{T_2} = dT_2 (x_2 + x_0) = \frac{\mu P}{B} \frac{x_2^2 dx_2}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_2^2}} + \\ + \frac{\mu P x_0}{B} \frac{x_2 dx_2}{\sqrt{\frac{4R_{O_1}^2 \sin^2 \beta}{\alpha^2} + x_2^2}}. \quad (84)$$

Интегрируя уравнения (83) и (84), найдем

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ

Измерительное устройство, основанное на методе обкатывания роликом, состоит из:

- 1) измерительной головки (измерительного ролика с устройством ориентации относительно измеряемого объекта);
- 2) кинематической передачи между роликом и датчиком угла поворота;
- 3) датчика угла поворота ролика;
- 4) электронного умножителя импульсов;
- 5) регистрирующего устройства.

В ряде устройств отсутствуют кинематическая передача и электронный умножитель импульсов.

Приведенный состав элементов predetermined structure погрешности измерения этими устройствами, а также и порядок проверки их точности. Используя результаты проведенных исследований при создании приборов и устройств, работающих по методу обкатывания роликом, уже в процессе конструирования можно с некоторым приближением рассчитать ожидаемую точность измерения. Однако ввиду большого многообразия условий сборки, отладки и эксплуатации полностью полагаться на аналитическую оценку точности измерения данного экземпляра прибора нельзя. Кроме того, процесс наладки и доводки узлов (датчика, измерительной головки и др.) требует поэлементной экспериментальной проверки перед окончательным выпуском прибора или устройства в эксплуатацию. Такая проверка, как показал опыт, бывает необходима даже в цеховых условиях.

В связи с этим в практике создания и эксплуатации приборов и устройств рассматриваемых типов применяют как поэлементную, так и комплексную проверку прибора.

Поэлементная проверка обычно включает:

- 1) определение погрешности изготовления измерительного ролика по диаметру или отклонения от номинальной величины диаметра в результате износа в процессе эксплуатации;
- 2) оценку погрешности преобразования угла поворота измерительного ролика (включая погрешность преобразования угла непосредственно датчиком измерительного ролика и кинематическую погрешность передачи, связывающей измерительный ролик и датчик);
- 3) оценку работы регистрирующего устройства при различных температурных условиях и воздействии промышленных электрических помех;
- 4) оценку погрешности от несовпадения командных и измери-

тельных импульсов и нестабильности работы регистрирующего устройства.

Погрешность изготовления измерительного ролика определяют обычными методами, применяемыми при точных измерениях наружных диаметров цилиндрических поверхностей [3].

Учитывая большое влияние правильности оценки отклонения диаметра ролика от номинального на величину погрешности измерения методом обкатывания, рекомендуется измерение ролика производить не менее чем в шести диаметрально расположенных торцовых сечениях (по 3—5 замеров в каждом сечении), выполнив их не менее чем в трех перпендикулярных оси вращения ролика сечениях: в среднем и в двух отстоящих от кромки примерно на 0,17 его ширины.

На основании полученных результатов измерений следует вычислить среднее значение диаметра ролика и желательно оценить конусность и бочкообразность поверхности.

Оценку работы регистрирующего устройства при различных температурных условиях производят также известными способами с помощью камеры тепла и холода, стандартного генератора сигналов и образцового счетчика импульсов.

Измерение кинематической погрешности передачи, связывающей измерительный ролик с датчиком, может осуществляться с помощью приборов, используемых при контроле зубофрезерных станков [9].

Существенное значение имеет правильная ориентация ролика относительно поверхности измеряемой детали, при которой их образующие параллельны.

Рекомендуется аттестацию ролика, при отсутствии самоориентации и усилий прижатия ролика к детали до 8 кгс, осуществлять через каждые 6 месяцев интенсивной эксплуатации. Опыты НИИПТМАШа показывают, что при использовании в устройствах механизма самоориентации ролика и усилий прижатия 20—30 кгс аттестацию следует производить также через каждые 6 месяцев.

Комплексную проверку точности производят как в лабораторных условиях на специальных стендах, так и непосредственно в условиях эксплуатации с использованием универсальных средств измерения контролируемого объекта. В последнем случае проверку сводят к промышленным испытаниям.

**Оценка погрешности от несовпадения командных и измерительных импульсов.** Такая оценка может осуществляться как в лабораторных условиях на стенде, так и непосредственно в цеховых условиях и заключается в фиксировании числа импульсов, поступающих в регистрирующее устройство за целое число оборотов ролика.

Некоторые приборы, в основном с фотоэлектрическими датчиками, приспособлены к таким проверкам и не требуют использования стендов<sup>1</sup>.

Однако в ряде случаев, например в индуктивных приборах НИИПТМАШа типа ИД-6 с самоориентацией ролика, нецелесообразно усложнять конструкцию встраиванием в измерительную головку датчика командных импульсов. В таких случаях для про-

<sup>1</sup> Иванов Б. Н., Бузунова И. Ф., Мельничук В. А. Устройство для измерения изделий больших диаметров методом обкатки. Авторское свидетельство № 339773, кл. 42, в «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 17, 1972.



верки используют простейший стенд, изготовление которого доступно любому предприятию.

Схема стенда показана на рис. 55. Измерительный ролик 1 вместе с датчиком импульсов укрепляют на столе стенда таким образом, чтобы двигателем 5 его можно было бы приводить во вращательное движение. Число оборотов вала двигателя может

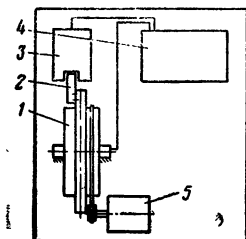


Рис. 55. Схема стенда для оценки погрешности от несовпадения измерительных и командных импульсов

регулироваться в соответствии с числом оборотов измерительного ролика, которое он может иметь в процессе эксплуатации.

На ролике укреплен флажок 2, который в процессе вращения ролика периодически проходит между полюсами старт-стопного датчика 3. Датчик измерительного ролика и старт-стопный датчик электрически связаны, как и при обычных измерениях регистрирующим прибором 4.

Например, если датчик измерительного ролика за один собственный оборот выдает  $z=630$  импульсов, редуктор, связывающий его с роликом, имеет передаточное отношение  $i=4$ , а электронная схема обеспечивает измерение за  $n=2$  оборота с коэффициентом электронного умножения импульсов  $k=2$ , то на табло регистрирующего прибора при вращении ролика должно появляться показание, соответствующее  $A=zikn=10\,080$  импульсам, где величина  $A$  численно равна диаметру измерительного ролика.

Если передаточное отношение редуктора составляет целое число, все командные импульсы индуктируются в моменты, соответствующие определенному взаимному расположению элементов датчиков и ролика.

Отсюда можно сделать вывод, что выявленная в ходе эксперимента вариация величины  $A$  является итогом нестабильности работы элементов электронной схемы устройства, так как кинематическая погрешность датчика практически не должна сказываться на ее величине.

**Определение погрешности преобразования угла поворота измерительного ролика.** В устройствах, основанных на методике обкатывания измерительным роликом, погрешность преобразования угла поворота ролика зависит от кинематической погрешности цепи ролик — круговой датчик импульсов и ошибки преобразования угла непосредственно самим датчиком.

Определение погрешности преобразования угла поворота измерительного ролика можно производить одним из следующих способов:

1) с помощью образцового кругового датчика и двух электронных счетчиков импульсов;

2) с помощью образцового кругового датчика и самопишущего фазометра.

В первом случае (рис. 56) образцовый датчик 2 устанавливают соосно с измерительным роликом 1 таким образом, чтобы ротор датчика при вращении имел угловую скорость ролика. Статор дат-

Рис. 56. Схема стенда с цифровыми счетчиками для определения погрешности преобразования угла поворота измерительного ролика

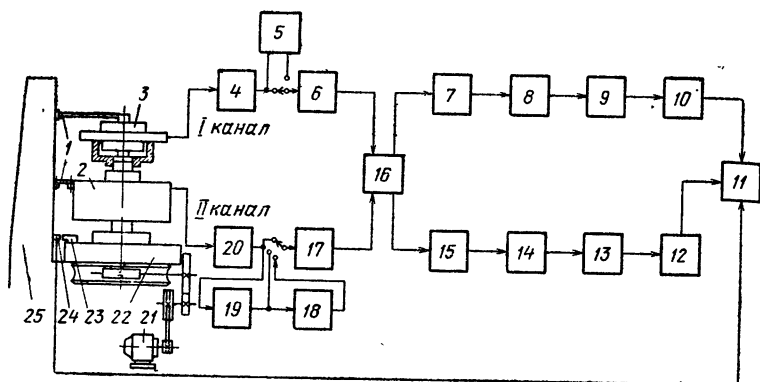


Рис. 57. Схема стэнда для определения фазовым методом погрешности преобразования угла поворота измерительного ролика

мерительного ролика и при цене измерительного импульса  $C \geq 0,1 \div 0,2$  мм.

При более высоких требованиях к точности преобразования угла следует рекомендовать второй способ, который можно реализовать на стенде, показанном на рис. 57. На столе 22 установлен образцовый датчик 2, ротор которого жестко связан с осью вращения ролика проверяемой измерительной головки. Статоры образцового датчика и датчика проверяемой измерительной головки удерживаются от проворота в процессе испытаний с помощью двух параллелограммных фиксирующих механизмов 1, связывающих статоры со стойкой стэнда 25 [9].

В процессе испытаний стол 22 стэнда приводится в медленное вращательное движение электродвигателем 21 через систему передач.

Образцовый датчик выполнен в виде фотоэлектрического датчика с усреднением ошибок преобразования угла (рис. 58, а). В корпусе датчика 2 установлена несущая плита-стакан 5 с четырьмя отверстиями по окружности, в которых размещены считывающие

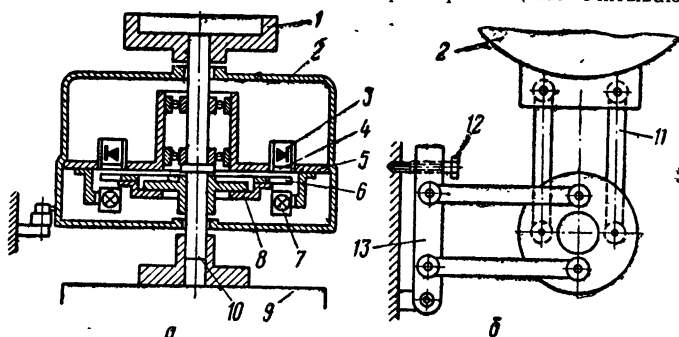


Рис. 58. Образцовый датчик (а) и фиксирующее устройство (б)

головки 3. Считывающие головки состоят из корпуса, стеклянной решетки с радиальными непрозрачными штрихами и фотодиода ФД-1.

С противоположной стороны плиты 5 укреплены четыре осветителя 7 таким образом, что лучи света их лампочек, проходя через линзы параллельными лучками, направляются на соответствующие фотодиоды считывающих головок 3.

На шпинделе 10 установлен фланец 8 со стеклянным диском 6, имеющим радиальные непрозрачные штрихи в виде круговой решетки. Круговая решетка расположена между осветителем и считывающими головками.

Статор датчика вместе с обоймой, как было указано, фиксируется относительно неподвижной части станка с помощью двухпараллелограммного устройства 11 (рис. 58, б). Это исключает влияние биения неподвижной части датчика относительно подвижной на результат измерения<sup>1</sup>.

Для фазирования сигнала образцового датчика относительно сигнала датчика проверяемой измерительной головки двухпараллелограммное устройство имеет каретку 13, перемещаемую в процессе фазирования с помощью винта 12, имеющего две резьбы с различным шагом. При вращении винта изменяется угловое положение элементов параллелограммного устройства и, как следствие этого, начальное положение статора датчика.

К верхней выступающей части шпинделя датчика прикреплено приспособление 1 (рис. 58, а) для установки измерительной головки, подлежащей проверке.

Образцовый датчик с помощью прихватов или винтов прикрепляется к столу 9 станда.

При установке датчика на стол станда его положение относительно оси вращения стола выверяют с помощью индикатора часового типа, так чтобы радиальное и осевое биения корпуса при вращении стола станка не превышали 0,01 мм.

В процессе измерения диск 6 вращается вместе со шпинделем 10 с угловой скоростью стола 9; свет от электролампочек осветителей модулируется диском 6 и попадает в фотодиод, на который через электрический фильтр подается напряжение +10 в. Каждый фотодиод соединен последовательно с нагрузочным сопротивлением, величина которого зависит от средней освещенности фотодиода. В результате изменения освещенности при вращении диска на выходе фотодиодов возникает переменное напряжение 0,5—1 в. Оно подается на сумматор, служащий для сложения напряжений, усреднения сдвига фаз и усиления. С выхода сумматора сигнал попадает на вход фазометра.

Стенд (см. рис. 57) снабжен отметчиком оборотов, который состоит из металлического флажка 23, прикрепленного с помощью малогабаритного магнитного прихвата на столе станда, и кронштейна с гибким латунным контактом 24. Кронштейн прикрепляется к неподвижной части станда так, чтобы при повороте стола на каждые 360° цепь отметчика мгновенно замыкалась и размыкалась. Контакты отметчика с помощью проводника связаны со специально предназначенной для отметчика стрелкой самопишущего прибо-

<sup>1</sup> Ионак В. Ф. и Иванов Б. Н. Устройство для фиксации неподвижной части датчика угла поворота. Авторское свидетельство № 179010, кл. 42в, 26<sup>03</sup> «Бюллетень изобретений, промышленных образцов и товарных знаков», № 4, 1966.

ра 11. Наличие отметчика облегчает обработку результатов измерения погрешности проверяемого датчика.

Проверка точности измерительной головки 3 основана на оценке величины и характера кинематической погрешности цепи измерительный ролик — датчик измерительного ролика.

Для записи кинематической погрешности стол 22 приводится во вращение двигателем 21. Датчик 2 и измерительная головка 3 преобразуют углы поворота роторов в соответствующие переменные напряжения одинаковой частоты. Обработка полученных от датчиков электрических сигналов производится в фазометре [9].

В связи с наличием кинематической погрешности в цепи образцовый датчик — аттестуемый датчик между выходными напряжениями этих датчиков возникают фазовые сдвиги.

Выходные напряжения датчиков поступают в усилители-ограничители (4 — первого канала и 20 — второго канала) фазометра, где они преобразуются в колебания прямоугольной формы. Далее напряжения попадают в синхронизированные мультивибраторы 6 и 17, с помощью которых увеличивается крутизна фронтов напряжений и обеспечивается равенство их амплитуд, независимо от амплитуды поступающих сигналов.

В канале датчика проверяемой измерительной головки имеется электронный умножитель 5, а в канале образцового датчика электронные делители 19 и 18. Умножитель 5 и делители предназначены для обеспечения условия (86), однако использование умножителя следует рекомендовать в крайних случаях, так как он снижает точность измерений.

На рис. 57 показаны два делителя, каждый из которых имеет кратность деления 1:2. Могут быть применены делители с другой кратностью деления.

При необходимости деления числа импульсов образцового датчика на 2 переключателем вводится делитель 19, а при необходимости деления на 4 — делители 19 и 18 последовательно.

Из мультивибраторов 6 и 17 напряжения подаются в фазоизмерительные триггеры 7 и 15, откуда — в катодные повторители 8 и 14, а затем в блоки 9 и 13 усиления постоянного тока.

Далее для получения сигнала достаточной мощности напряжения поступают в выходные усилители 10 и 12 и оттуда — в самопишущий регистрирующий прибор 11.

В основу фазоизмерительного блока 16 положена схема серийного выпускаемого фазометра, а в качестве самописца использован серийный прибор типа Н-320.

При проведении испытаний угловая скорость стола станда выбирается в зависимости от числа штрихов диска образцового датчика и характеристики фазометра. Поскольку в стенде, показанном на рис. 57, использовались датчик и электронная аппаратура кинематомера для контроля кинематической погрешности зубофрезерных станков [9], то число оборотов стола выбиралось в пределах чисел оборотов столов обычных зубофрезерных станков. Для проведения опытов использовался стол зубофрезерного станка.

Записанная самописцем диаграмма представляет собой суммарную диаграмму погрешности преобразования угла измерительной головкой проверяемого прибора, если пренебречь погрешностью преобразования угла в образцовом датчике, составляющей, например, для кинематомера КН-6 конструкции НИИПТМАШа не более  $\pm 1,5$  угловых секунд.

По этой схеме была измерена кинематическая погрешность трех датчиков приборов ИД-6.

Величина кинематической погрешности трех датчиков за один оборот ролика составила приблизительно 220, 280 и 295" (рис. 59).

Так как угловая цена импульса обкатного датчика составляет 257", то в линейном выражении с учетом электронного удвоения импульсов и линейной цены импульса при однооборотном измерении, равной

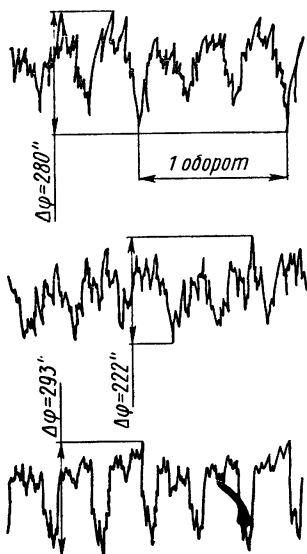


Рис. 59. Диаграмма кинематической погрешности измерительной головки ИД-6

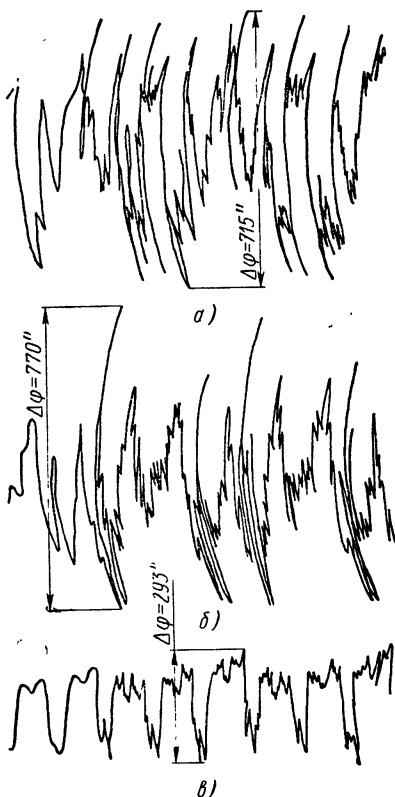


Рис. 60. Диаграммы кинематической измерительной головки ИД-6

0,02 мм, получим кинематическую погрешность датчиков, соответственно  $\Delta'_k = 17$  мкм,  $\Delta''_k = 22$  мкм,  $\Delta'''_k = 23$  мкм.

Полученное значение погрешности обуславливает предельную нестабильность показаний измерительного устройства независимо от условий проведения измерений и является конструктивной постоянной.

Влияние этой погрешности может быть уменьшено проведением многократных измерений, с последующим усреднением их результатов. Однако для цеховых измерений, где определенное значение имеет производительность измерительного устройства, целесообразно ограничиваться трехкратными измерениями.

Для оценки степени усреднения кинематической погрешности благодаря наличию нескольких промежуточных зубчатых колес планетарной передачи датчика ИД-6 при сохранении всех условий предыдущего опыта были записаны диаграммы кинематической погрешности датчика при работе с тремя (рис. 60, в), двумя (рис. 60, б) и одной (рис. 60, а) промежуточными зубчатыми колесами.

Как следует из сопоставления диаграмм, благодаря применению в датчиках передачи с тремя равномерно расположенными по окружности зубчатыми колесами можно уменьшить величину погрешности передачи примерно в два-три раза.

**Проверка устройств для измерения длин и линейных перемещений.** Проверка устройств для измерения длин и перемещений затруднена в связи с тем, что она связана с оценкой точности контроля крупногабаритных образцов (зачастую имеющих длину более 5—6 м).

Кроме того, устройства для измерения длин в некоторых системах (например, в системе безупорной резки металлов) работают в условиях неустановившегося движения. При оценке точности измерений эти условия необходимо воспроизводить.

Стремление преодолеть указанные трудности привело к разработке схемы стенда, в котором в качестве измеряемого образца применено кольцо из листового материала, вращающееся с помощью роликов.

Таким образом, фактически производится измерение периметра цилиндрической детали, подобно тому как это осуществляется при измерении диаметров на карусельных и тяжелых токарных станках.

Однако использование для этих целей станка сопряжено с трудностями обеспечения необходимого ускорения в процессе разгона и торможения измеряемого объекта, закрепленного на планшайбе станка. Кроме того использование крупногабаритного станка в качестве стенда для постоянного проведения опытов нецелесообразно, так как он занимает большую производственную площадь и потребляет большую мощность.

В НИИПТМАШе экспериментальные исследования точности измерения длины выполнялись на лабораторном стенде [16, 46]. Ролик измерительного устройства 2 (рис. 61) прижимается к кольцу 17 механизмом 1. С помощью кольца имитируется перемещение полосы, длину которой надлежит измерить. Перемещение сообщается двумя приводными цилиндрическими роликами 6, к которым кольцо прижимается давлением силы тяжести и усилием, развиваемым пружиной механизма 1. Одна из опор приводного ролика 6 размещена в корпусе цилиндрического редуктора 4, а вторая — в расточке кронштейна 12.

Для исключения при вращении кольца его осевого перемещения имеются три боковых ограничительных ролика 10, укрепленных на концах упорных штанг 3 и 9.

Две штанги 9 размещены в цилиндрических расточках стальных планок 8, напрессованных на цапфы крышек 11. Направляющая опора штанги 3 укреплена на крышке редуктора 4.

Электродвигатель 15 привода связан с валом-шестерней редуктора 4 гибкой муфтой 5; тахогенератор 14 фиксирует скорость вращения электродвигателя.

Механизм прижатия 1 измерительного устройства выполнен в виде пневматического цилиндра и поршня и крепится на кронштей-

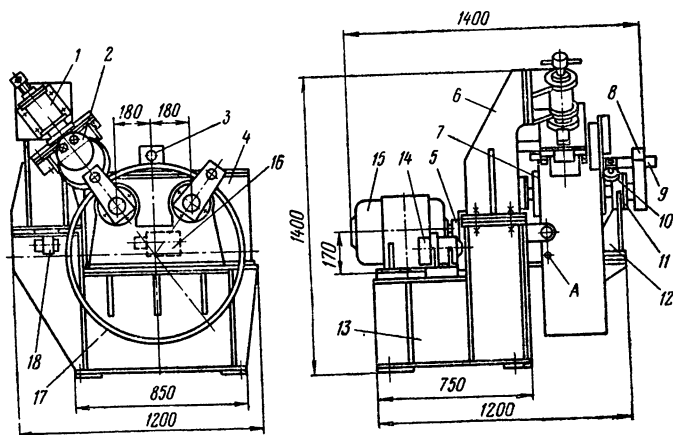


Рис. 61. Стенд для исследования точности измерения длины методом обкатывания роликом

не 7. Все узлы стенда размещены на сварной фундаментной плите 13. Для фиксации целого числа оборотов кольца 17 имеется фотоимпульсатор, состоящий из осветителя 18 и фотореле 16.

Фотореле срабатывает в момент освещения его лучом, проходящим через отверстие А кольца 17.

Блок-схема электронного устройства для экспериментальной проверки погрешности измерения показана на рис. 62. Импульсы от датчика 3 измерительного ролика 2 поступают через блок формирования 4 в счетчик 8 типа ПС-10000 или ПС-100.

Датчик командных импульсов (фотоимпульсатор) 1, расположенный у кольца 15, служит для подачи команды на начало и окончание счета измерительных импульсов, поступающих в счетчик 8 от датчика 3.

В исходном состоянии клапан счетчика закрыт, поэтому импульсы из блока формирования на вход счетчика не поступают. Для открытия клапана движок потенциометра 7 переводится в крайнее левое положение. При прохождении задней границы отверстия в кольце 15 мимо фотореле с помощью осветителя 16 и фотоимпульсатора 1 выдается импульс, открывающий клапан счетчика. Одновременно загорается сигнальная неоновая лампа 5 блока 6 формирования импульсов.

Для запираания клапана счетчика движок потенциометра переводится в крайнее правое положение, и при следующем обороте

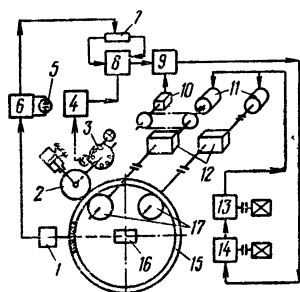


Рис. 62. Функциональная схема стенда для исследования измерителей длины и систем активного контроля положения листа



кольца блок формирования командных импульсов запирает клапан счетчика, прекращая счет измерительных импульсов, поступающих от датчика 3.

Вспышки неоновой лампы дают возможность отсчитать целое число оборотов кольца и определить момент, когда необходимо перевести движок потенциометра в крайнее правое положение.

О работе измерительной системы судят по показаниям счетчика.

Для проведения опытов по проверке работы устройств активного контроля стенд оснащен соответствующей системой управления.

В этом случае одновременно с регистрацией угла поворота ролика электронно-счетным устройством 8 измеряется по заданной программе скорость перемещения кольца с помощью тахогенератора 10. Получаемые электронным усилителем 9 с помощью электронно-счетного устройства команды подаются через электромагнитный усилитель 14 генератору 13, который питает электродвигатели 11. Последние через редукторы 12 приводят во вращение ролика 17. Тахогенератор, связанный, с одним из роликов посредством клиноременной передачи является датчиком скорости в системе обратной связи.

Для обеспечения остановки кольца в поле допуска, соответствующего заданной длине листа, системой управления предусмотрено торможение электродвигателя привода перемещения кольца в две ступени, а также контроль передней и задней границ поля допуска. Допускается также торможение в одну ступень.

Электронно-счетное устройство выдает команды в моменты времени, соответствующие началу предварительного торможения с основной скорости до пониженной, началу окончательного торможения, прохождению передней границы поля допуска, прохождению задней границы поля допуска при движении кольца по ходу транспортировки листа и прохождению задней границы поля допуска при возврате кольца в поле допуска (реверс). Электронная часть системы управления состоит из следующих блоков: формирования скорости, электронного усилителя, рассогласования, реле питания. Система электропривода является следящей по скорости.

Переключение системы на разгон или торможение, а также переход с одной ступени скорости на другую осуществляются с помощью управляющих реле. Выходное напряжение блока формирования скорости является задающим и сравнивается с напряжением тахогенератора, а разница между ними подается на вход двухкаскадного электронного дифференциального усилителя, нагрузкой которого являются две обмотки управления электромашиного усилителя. Релейная часть схемы управления приводом выполняет логические функции, необходимые для выработки нужной последовательности команд. Входными элементами релейной схемы служат контакты поляризованных реле, катушки которых получают питание поочередно в блоке селекции каналов в электронно-счетной части схемы.

При проверке точности и стабильности результатов измерения определяется длина пути, пройденного точками наружной поверхности кольца за один или десять оборотов последнего. Подача команды на начало или окончание счета импульсов, поступающих от датчика измерительного устройства в счетчик, осуществляется фотоимпульсатором 1 (рис. 62).

Точность измерения проверяют при разных значениях окружной скорости, а также в режиме неустановившегося движения кольца.

Таблица 1

I				II				III			
Номер совокупности											
Показания регистрирующего прибора											
Частота повторения											
Скорость кольца в м/сек											
Количество промежуточных остановок											
Усилие прижатия ролика к полюсе в кгс											
IV				V				VI			
Номер совокупности											
Показания регистрирующего прибора											
Частота повторения											
Скорость кольца в м/сек											
Количество промежуточных остановок											
Усилие прижатия ролика к полюсе в кгс											

Измерения выполняются при разных значениях силы прижатия измерительного ролика к кольцу.

Ниже приведены методики и результаты экспериментальной проверки работы устройств с автоматической отработкой заданной длины листа.

Опыты проводились при измерении длин 2657,5 мм и 26575 мм. Результаты измерений представлены в табл. 1, где совокупности I-III получены при измерении длины 2657,5 мм и совокупности IV-VI для длины 26575 мм. На основании этих опытов для каждой из указанных в табл. 1 совокупностей получены следующие средние значения длины  $l_0$  и соответствующие этим значениям средние квадратические отклонения:

№ совокупности	I	II
$l_0$	2657,5	2657,6
$\sigma$	0,88	0,74
№ совокупности	III	IV
$l_0$	2657,4	26575,1
$\sigma$	0,95	0,77
№ совокупности	V	VI
$l_0$	25574,7	2657,5
$\sigma$	0,96	0,88

После обработки результатов исследований получены следующие значения для совокупностей измерений I-III:  $l_0 = 2657,5$  мм;

$D_e = 0,74 \text{ мм}^2$ ;  $\sigma = 0,86 \text{ мм}$ , где  $D_e$  — дисперсия общей совокупности, полученной в результате объединения I, II и III совокупностей измерений.

Практически предельное отклонение  $\Delta_{\text{пред}} = \pm 3 \sigma = \pm 2,58 \text{ мм}$ .

Для общей совокупности, объединяющей IV, V и VI совокупности, среднее значение  $l_0 = 26574,9 \text{ мм}$ , а  $\sigma = 0,9 \text{ мм}$ .

Практически предельное значение отклонения  $\Delta_{\text{пред}} = \pm 3 \sigma = \pm 2,7 \text{ мм}$ .

По результатам опытов построены кривые распределения (рис. 63, а и б).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что:

а) величина среднего квадратического отклонения результатов измерений от среднего значения не превышает цены одного импульса измерительного устройства;

б) величина линейной скорости объекта измерения (равная окружной скорости измерительного ролика) в заданных пределах практически не влияет на точность измерений;

в) увеличение силы прижатия измерительного ролика к объекту измерения свыше значений, определяемых условиями (30) и (33), практически не влияет на точность измерений;

г) наличие переходных режимов движения объекта измерения при условии правильного выбора силы прижатия измерительного ролика практически не оказывает влияния на точность измерения длины;

д) при правильном выборе силы прижатия исключается также влияние вибраций измеряемого объекта на результаты измерений. Последнее подтверждается результатами измерений, выполненных в НИИИПТМАШе при наличии вибраций кольца.

Таблица 2

№ опыта	Переко- с ро- ли- ка в градусах	Измеряемый размер в мм	Величина тор- мозного мо- мента на ро- лике в кгс·м	Результат измерения в мм	№ опыта	Переко- с ро- ли- ка в градусах	Измеряемый размер в мм	Величина тор- мозного мо- мента на ро- лике в кгс·м	Результат измерения в мм
1	2,5	26575	—	26540	7	5	2657	—	2645
2	2,5	26575	—	26541	8	5	2657	—	2644
3	2,5	26575	—	26540	9	5	2657	—	2645
4	2,5	26575	0,5	26425	10	5	2657	1	2608
5	2,5	26575	0,5	26424	11	5	2657	1	2609
6	2,5	26575	0,5	26426	12	5	2657	1	2608

Результаты эксперимента (табл. 2) подтверждают справедливость уравнения (26), согласно которому величина скольжения измерительного ролика зависит не только от непараллельности плоскости вращения ролика направлению перемещения измеряемого объекта, но и от величины момента сопротивления его вращению.

Как показала проверка в лабораторных, а также в промышленных условиях, измерительные устройства при отсутствии механизма самоориентации ролика дают менее точные результаты [15, 45].

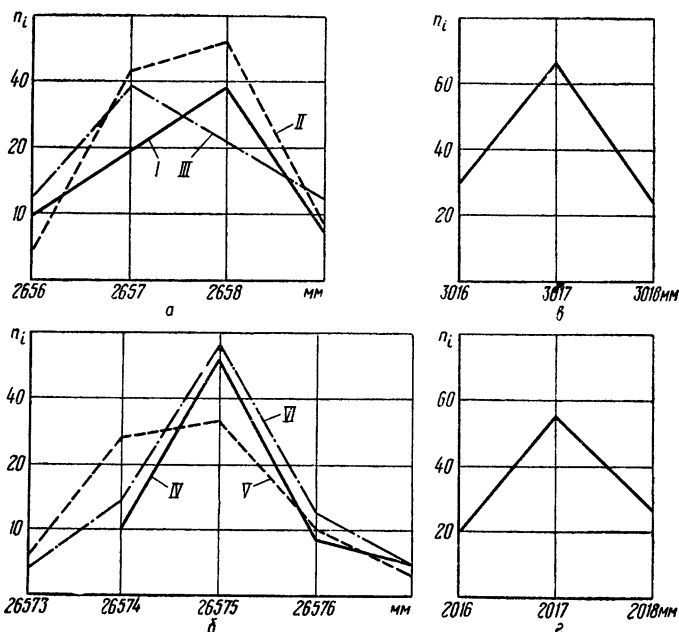


Рис. 63. Кривые распределения, построенные по результатам испытания устройств для контроля длин листов

Среднее значение полученных размеров и среднее квадратическое отклонение соответственно равны: а) для одной партии листов  $l=3016,9$  мм;  $\sigma=0,67$  мм; б) для другой партии листов  $l=2017,1$  мм;  $\sigma=0,67$  мм.

Среднее квадратическое отклонение для обеих партий  $\sigma=0,67$  мм.

Практически предельное значение отклонения  $\Delta_{\text{пред}}=\pm 3\sigma=2,0$  мм.

Кривые распределения размеров для двух рассмотренных партий листового металла показаны на рис 63, в и г.

Результаты, близкие к найденным, были получены при резке листов длиной от 1 до 6 мм, шириной от 1000 до 2000 мм, толщиной от 0,6 до 5 мм из алюминиевых сплавов разных марок. Скорость полосы находилась в пределах 1—2 м/сек. Ускорение полосы при разгонах составляло 3,5 м/сек<sup>2</sup>.

Изменение величины отклонения длины листов определяется в основном действием двух факторов: погрешностью измерения, величина которой, как отмечалось выше, определяется в основном составляющей  $\Delta_7$  и нестабильностью выбега полосы, величина которого колеблется в пределах 1—4 мм.

Ниже приведены значения выбега полосы шириной 1200 мм, толщиной 1,5 мм, измеряемого величиной пути, проходимого полосой после подачи команды на окончательное торможение привода подающих роликов. Указанная команда выдается при появлении нулей во всех разрядах счетчика длины листа.

Выбег в мм . . . . .	1	2	3	4
Частота повторения . . . . .	0	29	50	8

Приведенные значения выбега полосы были зарегистрированы с помощью счетчика ПС-100, подключенного к датчику импульсов измерительного устройства.

Выбег полосы большей толщины (2,5—5 мм) несколько меньше и колеблется в пределах 1—3 мм, в связи с чем отклонение длины листов этой толщины от значения размера, определенного набором программы, обычно не превышает +2 мм.

Опыт эксплуатации измерительных устройств показал, что наилучшие результаты измерения обеспечиваются устройством, конструкция которого изображена на рис. 32.

**Проверка приборов для измерения диаметров.** Проверка измерителей диаметров может производиться в лабораторных условиях на стендах при измерении образцовой детали, диаметр которой известен по результатам измерения высокоточными измерительными средствами, например, с помощью измерительной машины.

В этом случае погрешность измерения оценивается сравнением результатов измерения образцовой детали высокоточными измерительными средствами и проверяемым прибором.

Весьма важными факторами, обеспечивающими высокое качество аттестации, являются, с одной стороны приближение условий работы прибора во время его проверки к реальным условиям при цеховой эксплуатации, а с другой стороны, — проведение проверки в помещении, температура которого является стандартной, а именно +20°C.

В производственных условиях не всегда возможно обеспечение такой температуры, а поэтому в результаты измерения необходимо вводить поправки, компенсирующие температурные изменения образцовой детали и ролика.

Необходимым условием достижения высокого качества проверки является выравнивание температуры аттестуемого прибора с образцовой деталью при внесении его в лабораторию, так как неполное выравнивание температуры является причиной возникновения температурных погрешностей проверки [1].

Следует, однако, учесть, что при длительной работе измерительной головки проверяемого прибора недостаточно только одного выравнивания температуры ролика и образцовой детали, необходимо периодически измерять температуру образцовой детали и ролика, так как имеется тенденция к его самонагреву в результате сил трения как внешних (трение ролика об измеряемую деталь), так и внутренних (трение в опорах ролика, зубчатой передаче, нагревание обмотки в индуктивном или лампочки в фотоэлектрическом датчике).

Изменение температуры ролика и образцовой детали должно быть учтено при оценке результатов измерения проверяемым прибором.

Для уменьшения влияния температурных и упругих деформаций может быть применен прием проверки с помощью кольцевидной образцовой детали, подробнее о котором будет сказано ниже.

Как уже указывалось, в качестве стенда может использоваться токарный или карусельный станок, оборудованный специальными приспособлениями для проведения исследований точности измерения.

Стенд НИИПТМАШа выполнен на базе токарного станка, оборудованного датчиком начала и конца счета импульсов, приспособ-

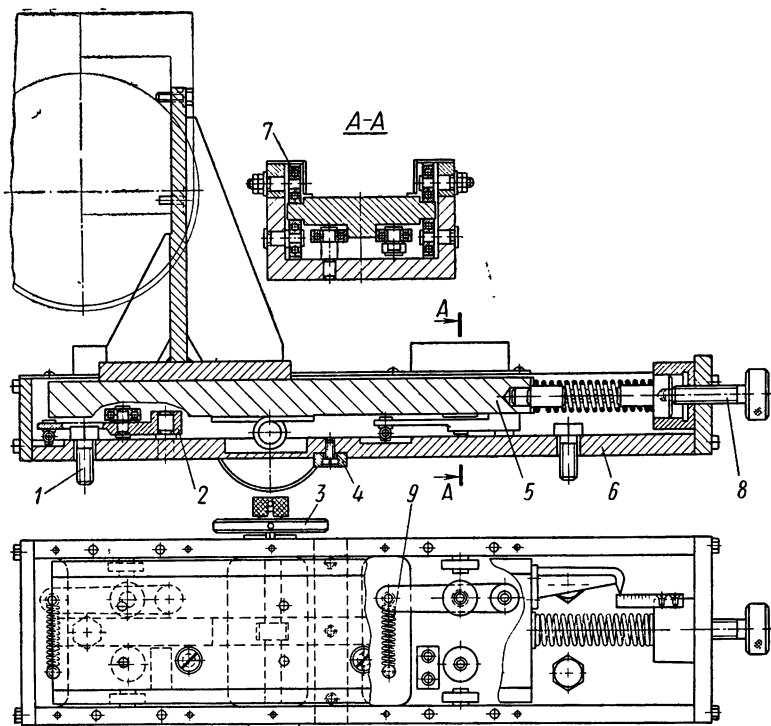


Рис. 64. Приспособление для установки измерительных головок

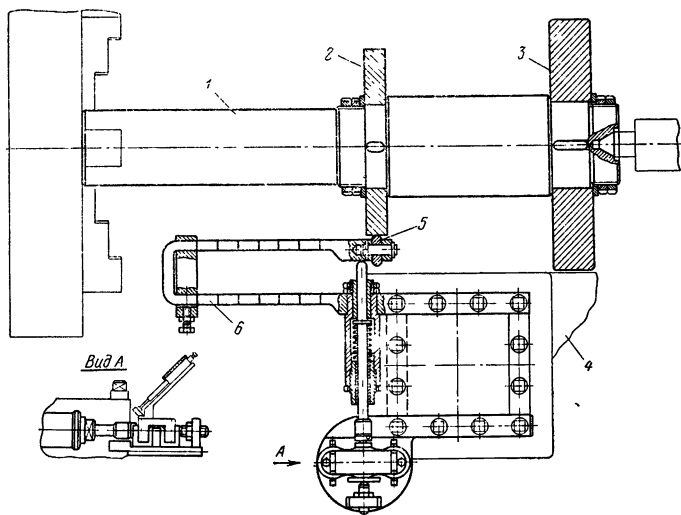


Рис. 65. Кулачковый вибратор

лением для установки измерительной головки или импульсного датчика с устройством для определения величины давления измерительного ролика на деталь и кулачковым вибратором.

Приспособление для установки измерительных головок на станке (рис. 64) представляет собой каретку, которая с помощью винтов 1 и шпонки 4 устанавливается на суппорте станка.

Каретка 5 размещена в корпусе 6 так, что ее опорные поверхности находятся между шарикоподшипниками 7, позволяющими каретке перемещаться только в направлении, перпендикулярном линии центров станка.

Для исключения колебания каретки в поперечном направлении два горизонтально расположенных направляющих подшипника установлены на рычагах 2, прижимаемых к направляющей каретке с помощью пружины 9.

Продольное перемещение каретки осуществляется с помощью вала-шестерни и рейки, нарезанной на выступе каретки. Перемещение производится вручную поворотом диска-маховика 3 с пружинным фиксатором. Каретка находится под воздействием цилиндрической винтовой пружины, первоначальное сжатие которой регулируется

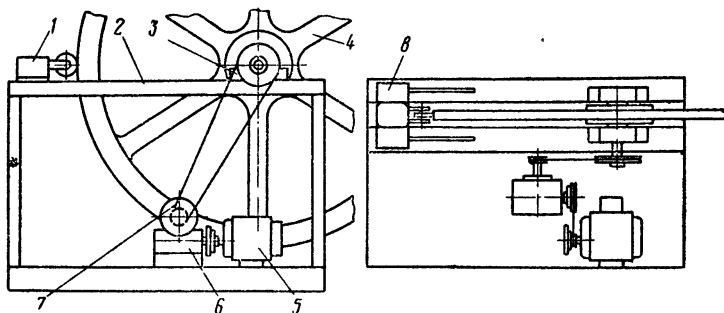


Рис. 66. Схема простейшего стенда для испытания измерителей диаметров

винтом 8. Для определения усилия прижатия ролика к измеряемой детали по величине сжатия тарированной пружины каретка снабжена указателем, а неподвижная стойка устройства — линейкой (длинами с ценой 1 кгс).

На каретке устанавливаются сменные кронштейны для крепления испытываемых измерительных головок или датчиков.

Воспроизведение вибраций, возникающих при обработке на токарных и карусельных станках, осуществляется кулачковым вибратором [11].

Вибрации создаются при вращении вала 1 (рис. 65) с кулачковым диском 2 и макетом измеряемой детали 3. Пульсирующая нагрузка на систему деталь—суппорт станка обеспечивается с помощью предварительно сжатой пружинящей скобы 6. Один конец скобы жестко связан с суппортом станка 4, второй с помощью ролика 5 катится по выступам кулачка. Число выступов кулачка выбрано в соответствии с заданной программой испытаний и обеспечивает вибрации в диапазоне 30—100 гц.

Простейший стенд, используемый на Новокраматорском машиностроительном заводе по рекомендации Львовского политехнического института, представляет собой сварную раму, установленную на независимом от фундамента здания бетонном основании (рис. 66).

На раме 2 при помощи подшипников 3 установлена образцовая деталь 4, выполненная в виде колеса со спицами и гладким ободом, наружная цилиндрическая поверхность которого имеет обработанные ступеньки с различной шероховатостью поверхности от  $\nabla 3$  до  $\nabla 6$ . На нижней плите основания установлены электродвигатель 5 с редуктором 6, обеспечивающий при помощи клиноременной передачи 7 вращение образцовой детали.

Измерительная головка 1 проверяемого прибора устанавливается на специальной площадке 8 сварной рамы станины.

Датчик числа оборотов образцовой детали может устанавливаться на верхней плите, а флажок датчика — на торцевой поверхности обода образцовой детали.

При проверке приборов на описанном выше стенде имитируется процесс измерения диаметров наружных цилиндрических поверхностей. Стенд Красноярского сельскохозяйственного института [40] имеет аналогичное устройство.

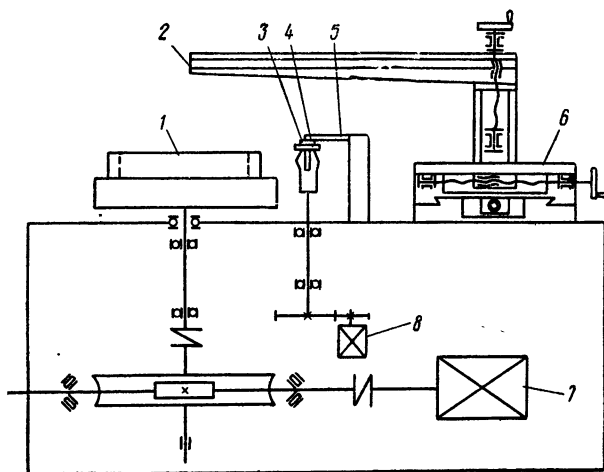


Рис. 67. Схема универсального стенда для испытаний измерителей диаметров

С целью приближения условий проверки приборов к условиям его эксплуатации на тяжелых карусельных станках, в НИИПТ-МАШе разработан, изготовлен и эксплуатируется специальный стенд, имитирующий измерение на карусельном станке.

На столе стенда (рис. 67) установлен макет 1 измеряемой детали с вертикальной осью вращения, выполненный в виде кольца. Такая форма макета детали позволяет проводить исследования приборов при измерении диаметров наружной и внутренней цилиндрической поверхности.



На станине станда установлен суппорт 6, на котором размещен консольный держатель 2 для крепления измерительной головки прибора. С помощью винтов консоль держателя 2 может перемещаться в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях по отношению к измеряемому макету детали, что дает возможность устанавливать головку прибора для измерения наружных и внутренних поверхностей, а тангенциальное перемещение позволяет проводить исследования влияния различного углового положения измерительной головки относительно макета детали.

Привод планшайбы станда имеет электродвигатель постоянного тока 7 с плавным регулированием числа оборотов и обеспечивает диапазон скоростей планшайбы, соответствующий диапазону линейных скоростей поверхности измеряемой детали, которые имеют место при цеховых измерениях.

Станд оборудован вспомогательным шпинделем с цанговым патроном 4, приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 8. Шпиндель предназначен для установки измерительного ролика 3 головки прибора при оценке погрешности измерения от несовпадения командных и измерительных импульсов. Неподвижная часть головки проверяемого прибора фиксируется двухпараллелограммным устройством 5 (см. рис. 58, б), практически обеспечивающим исключение погрешности проверки, вызванной радиальным биением цангового патрона.

Для повышения точности измерения во время экспериментов, а также для проведения проверки приборов стандарт оборудован накопителем импульсов датчика оборотов измеряемой детали. Накопи-

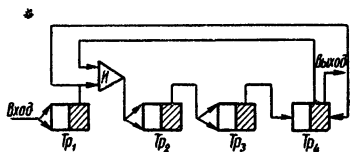


Рис. 68. Электронный накопитель импульсов

тель обеспечивает проведение измерений, например, двухоборотным прибором за 20 оборотов контролируемой детали. Это обеспечивает уменьшение цены импульса датчика с 0,01 до 0,001 мм.

Из-за недостаточно высокой дискретности датчиков приборов для измерения диаметров исследователи были вынуждены проводить проверку при большом количестве оборотов детали. Такая проверка значительно увеличивает время, необходимое для измерений. Однако для уменьшения цены импульса при проверке приборов с помощью макетов деталей небольшого диаметра для приближения условий этой проверки к условиям измерения крупногабаритных деталей стандарт снабжен накопителем.

Накопитель (рис. 68) представляет собой блок, состоящий из четырех двоичных ячеек  $Tr_1$ — $Tr_4$ , соединенных между собой таким образом, чтобы коэффициент пересчета был уменьшен до 10, аналогично пересчетным ячейкам счетчика прибора.

Накопитель включается в цепь датчика оборотов детали на период аттестационных измерений.

**Некоторые особенности проверки приборов для измерения диаметров.** Обычно проверка измерителей больших диаметров сводится к аттестации рабочего диаметра измерительного ролика с помощью высокоточных приборов, это основано на предположении, что между

роликом и измеряемой деталью ввиду незначительного момента сопротивления вращению ролика упругое скольжение практически отсутствует. Поэтому за основной фактор, определяющий величину систематической погрешности измерения методом обкатки, принимают отклонение фактического диаметра измерительного ролика от расчетного.

По результатам измерений вычисляют средний фактической диаметр ролика, являющийся исходной величиной для определения коэффициента поправки

$$k_n = \frac{\Delta d}{d},$$

где  $\Delta d$  — величина отклонения фактического диаметра ролика от расчетного в мм;  $d$  — расчетный диаметр ролика в мм.

Коэффициент поправки  $k_n$  имеет положительное значение, если диаметр ролика больше расчетного, и, наоборот, — отрицательное, если диаметр ролика меньше расчетного.

Величина и знак коэффициента поправки являются основным показателем систематической погрешности измерения, которая может компенсироваться вводом поправки

$$\Delta D = \pm k_n D_p,$$

где  $D_p$  — диаметр детали по показаниям регистрирующего устройства.

Таким образом, за фактический результат измерений принимают

$$D_{\text{ф}} = D_{\text{иср}} \pm \Delta D,$$

где  $D_{\text{иср}}$  — среднее значение результата измерения диаметра, полученного на табло регистрирующего устройства прибора.

Приведенная выше методика ввода поправок допустима при проверке устройств, в которых усилие прижатия ролика к измеряемой детали не превышает 2—4 кгс, а измерительная головка (ролик и его опоры качения) выполнена достаточно жесткой, и устройств, предназначенных для измерения диаметров с отклонениями, превышающими нормы 4—5-го классов точности.

Как мы увидим ниже, при более жестких требованиях к точности измерения и в применении к большинству рассматриваемых здесь приборов такая методика неприемлема.

Исследователи, изучающие относительное качение двух цилиндрических роликов, считают минимальные величины проскальзывания без нагрузки ведомого элемента фрикционной пары, равными 0,1% [2] и 0,144% [19], что противоречит утверждению авторов большинства работ по исследованию метрологических качеств метода обкатывания роликом [38, 31 и др.] о пренебрежимо малом проскальзывании ролика.

Это противоречие объясняется следующим. Исследователи, оценивающие точность измерения обкатными устройствами, начинают свои опыты с аттестации диаметра ролика на высокоточном приборе с измерительным усилием порядка 100—150 кгс, получая действительный размер диаметра ролика. Затем при помощи уровня ориентируют ролик в пространстве и измеряют диаметр детали при усилии прижатия ролика к детали от 10 до 80 кгс. При этом диаметр детали заранее определяется с наибольшей доступной точностью.

Если полученный отсчет на табло прибора соответствует геометрическому соотношению диаметров ролика и детали, делается вывод об отсутствии проскальзывания. Если же наблюдаются отклонения, то приходят к заключению, что ролик ориентирован недостаточно точно. Попытки правильно ориентировать ролик при помощи уровня повторяют до тех пор, пока не достигается желаемый результат.

На получаемый по такой методике результат влияют многие факторы, в том числе торцовое биение ролика; состояние направляющих, по которым осуществляется подвод ролика к детали после его ориентации; положение оси вращения измеряемой детали; жесткость установочного устройства, которое деформируется во время прижатия ролика; жесткость самого ролика, в который зачастую встраивается датчик; упругие деформации в зоне контакта ролика с деталью и т. д.

Таким образом, положение ролика в процессе измерения может оказаться отличающимся от зафиксированного при его ориентации, а действующий радиус ролика — меньше половины диаметра, полученного при аттестации. Так как при измерении значительное усилие прижатия ролика вызывает упругую деформацию в зоне его контакта с деталью, а также деформации в опорах ролика, то, очевидно, будет иметь место завышение показаний прибора.

Кроме того, существенное значение имеет перекося ролика, вызывающий пересечение оси его вращения с осью детали.

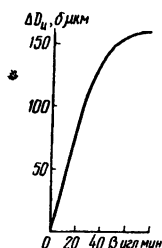


Рис. 69. Погрешность измерения  $\Delta D_{ц}$  диаметра при изменении угла перекрещивания осей ролика и образцовой детали

Экспериментальные исследования этого явления не дали однозначного результата. Незначительное занижение результатов измерений [11] и случайный их характер [39] могут быть объяснены неточностью установки ролика относительно измеряемой детали в направлении, перпендикулярном оси вращения ролика.

В НИИПТМАШе были проведены опыты с измерительной головкой прибора ИД-6, имеющей два взаимноперпендикулярных шарнира, которые обеспечивают самоориентацию ролика в двух плоскостях. Фиксируя положение элементов одного из шарниров, создавали условия работы измерительной головки, при которых можно воздействовать на ролик в одной плоскости, не нарушая его самоориентации в другой.

Результаты опытов показали (рис. 69), что имело место завышение показаний приборов на величину  $\Delta D_{ц}$  мкм по сравнению с диаметром макета детали и показаниями, полученными при нормальной работе механизма самоориентации. Интенсивность завышения падала с увеличением угла  $\beta$ , но все же достигала значительной величины (0,16 мм) при измерении диаметра 700 мм.

С другой стороны, известно, что любой перекося ролика и детали, приводит к занижению показаний [11, 24, 31, 38].

Так как при ручной ориентации измерительного ролика сочетания перекосов носят случайный характер, а изменением усилия прижатия ролика к детали можно изменять в довольно широких пределах деформацию ролика, возможно получение в некоторых случаях результатов измерения, соответствующих заданному геометрическому соотношению диаметров ролика и детали. Однако эти совпадения нельзя считать закономерными.

Упорядочение процесса ориентации ролика путем его самоустановки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, осуществленной в конструкциях измерительных головок НИИПТМАШа [13, 14], привело к тому, что при исследовании их на экспериментальном стенде выявлено систематическое занижение показаний, которое невозможно объяснить отклонением фактических размеров роликов от номинальных. Перепроверки и уточнения положения измерительных роликов в вилках установочных устройств заметных результатов не дают. Величина занижения для различных головок составляет 0,005—0,020%.

При увеличении в допустимых для измерительного устройства (ИД-6, ИД-7) пределах усилия прижатия ролика к детали наблюдаются некоторое завышение показаний.

Установлено, что после длительной работы приборов в результате износа и укатки рабочей поверхности ролика, а также благодаря аналогичным процессам, происходящим в подшипниках и редукторе измерительного ролика, занижение показаний проявляется в меньшей степени.

Это привело к выводу, что систематическую погрешность прибора нельзя оценивать исходя только из определения отклонения фактического диаметра ролика от номинального, так как эта погрешность является результатом сочетания многих, вполне определенных для каждого прибора факторов. Точно так же изменение величины систематической погрешности после длительной эксплуатации не является функцией только износа ролика, а отражает влияние многих медленно протекающих процессов (износ шарикоподшипников, обработка редуктора, усталостные явления в прижимной пружине и т. д.).

Поэтому проверка устройства должна сводиться не к периодическим измерениям диаметра ролика, а к выявлению действующей ошибки измерения на тщательно аттестованном макете детали с максимальным приближением условий проверки прибора к реальным условиям измерения проверяемым прибором.

Для оценки погрешности проверки по макету детали в НИИПТМАШе проводятся серии чередующихся измерений наружных и внутренних диаметров макетов детали из стали 45 и стали ЗИ481. Наружный диаметр макетов составляет 700 мм, внутренний — 600 мм. Шероховатость поверхности соответствует  $\nabla 5$ .

Для уменьшения влияния температурной погрешности и погрешности аттестации макетов оценку результатов производят путем сопоставления действительной толщины стенки макетов  $C_d$  измеряемой непосредственно, с полуразностью результатов измерения наружного  $D_n$  и внутреннего  $D_v$  диаметров. Эти измерения показали систематическое завышение значений полуразности диаметров по сравнению с действительной толщиной стенки на величину

$$\Delta C_{cp} = \frac{D_n - D_v}{2} - C_d = +9 \text{ мкм},$$

что объясняется различием в величинах контактных деформаций

при качении измерительного ролика по наружной и внутренней поверхностям макета с одинаковой шероховатостью.

При измерении обычными (например, шуповыми) приборами деформации измерительного наконечника и поверхности измеряемой детали практически в равной мере влияют на точность измерений.

Основной особенностью измерения методом обкатывания роликом является то, что влияние деформаций и шероховатости измерительного ролика на точность измерения возрастает прямо пропорционально увеличению диаметра измеряемой детали, а относительное влияние деформации детали уменьшается.

Параметры измерительного ролика практически остаются постоянными на протяжении всего допустимого срока службы устройства [40]. Величины деформаций и шероховатости поверхности измеряемой детали соизмеримы и не превышают нескольких *мкм*.

Рассматриваемые приборы рекомендуется использовать для измерения диаметров деталей свыше 1000 *мм*. Они имеют цену отсчета 0,01 *мм*.

В том случае, когда в процессе проверки цена отсчета (много-

оборотные измерения) равна 0,001 *мм*, а диаметр измеряемой детали меньше 1000 *мм*, влияние контактных деформаций и шероховатости поверхности детали возрастает.

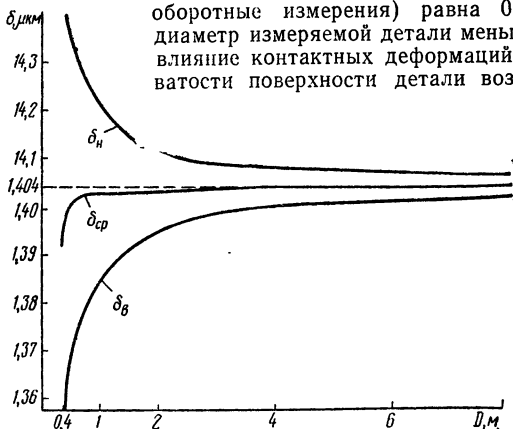


Рис. 70. Кривые сближения ролика и измеряемой детали

Однако, как мы увидим далее, использование предложенного здесь приема позволяет практически исключить это влияние, так как при измерениях диаметров внутренней и наружной цилиндрических поверхностей оно проявляется с противоположными знаками.

Бвиду этого значения систематической погрешности косвенного измерения толщины стенки можно определить как

$$\Delta C = \frac{D_n}{d} \Delta_n + \frac{D_v}{d} \Delta_v - \delta_{n_1} - \delta_{v_1}, \quad (87)$$

где  $d$  — диаметр измерительного ролика;  $\Delta_n$  — отклонение величины деформации ролика от среднего значения при контакте ролика с наружной поверхностью (качение по плоскости);  $\Delta_{v_1}$  — то же, при контакте ролика с внутренней поверхностью;  $\delta_{n_1}$  — контактная деформация наружной поверхности макета;  $\delta_{v_1}$  — контактная деформация внутренней поверхности макета.

Экстраполяция экспериментального значения на другие величины измеряемых диаметров может быть выполнена на основании формул (39) — (41).

Величины сближений контактирующих тел, вычисленные по формуле (39) — (41) применительно к нашему случаю ( $P=30$  кгс;  $l=10$  мм;  $\mu \approx 0,33$ ;  $R_1=50$  мм;  $E=2,15 \cdot 10^4$  кгс/мм<sup>2</sup>), составляют для контакта с наружной поверхностью  $\delta_{700}=1,426$  мкм ( $q=3$  кгс/мм;  $b=0,114$  мм;  $p_0=z_1=z_2=16,7$  мм) и для контакта с внутренней поверхностью  $\delta_{600}=1,374$  мкм ( $b=0,134$  мм;  $p_0=14,25$  мм).

Таким образом, для нашего случая разность величин сближений составляет 0,052 мм.

Очевидно, эта величина представляет собой сумму отклонений равного знака от номинального значения сближения.

На рис. 70 изображены построенные на основании формулы (39) кривые сближения ролика диаметром 100 мм с деталями диаметром от 400 до 10 000 мм при контакте ролика с наружной ( $\delta_n$ ) и внутренней ( $\delta_s$ ) поверхностями.

При  $D \geq 4$  м значение  $\delta_{cp}=1,404$  мкм практически не изменяется и совпадает с осью симметрии площади, заключенной между кривыми  $\delta_n$  и  $\delta_s$ , а при  $D=0,6 \div 0,7$  м наибольшее отклонение  $\delta_{cp}$  от 1,404 не превышает 0,5%.

Поэтому в формуле (87) с достаточной для практических расчетов точностью можно принять

$$\Delta_n = \delta_{n_2} - \frac{\delta_{n_2} + \delta_{s_2}}{2}; \quad \Delta_s = \frac{\delta_{n_2} - \delta_{s_2}}{2} - \delta_{s_2},$$

где  $\delta_{n_2}$  и  $\delta_{s_2}$  — контактные деформации измерительного ролика при измерении наружной и внутренней поверхностей.

Тогда

$$\Delta C = \frac{D_n}{d} \left( \delta_{n_2} - \frac{\delta_{n_2} + \delta_{s_2}}{2} \right) + \frac{D_s}{d} \left( \frac{\delta_{n_2} + \delta_{s_2}}{2} - \delta_{s_2} \right) - \delta_{n_1} - \delta_{s_1}. \quad (88)$$

Так как для диаметров 700 и 600 мм расчетная величина отношения  $\frac{\delta_n}{\delta_s}=1,038$ , то, зная экспериментальное значение  $\Delta C=9$  мкм и принимая для упрощения анализа  $\delta_{n_1}=\delta_{s_1}$  и  $\delta_{s_1}=\delta_{s_2}$  получаем из формулы (88)  $\delta_{s_2}=1,730$  мкм и  $\delta_{n_2}=1,787$  мкм.

Переходный коэффициент  $k$  от теоретических значений сближений к полученным величинам деформаций при измерении диаметров свыше 600 мм с шероховатостью поверхности  $\nabla 5$  (наиболее характерный случай при обработке крупногабаритных деталей) составит 1,26.

Таким образом, для практической оценки систематической погрешности измерения диаметров деталей, обусловленной различиями величин деформаций, можно пользоваться следующими формулами:

при измерении наружных диаметров

$$\Delta_{измн} = 2k \left[ \frac{D_n}{d} (\delta_{n_2} - \delta_{sp_2}) - \delta_{n_1} \right]; \quad (89)$$

при измерении внутренних диаметров

$$\Delta_{изм\delta} = 2k \left[ \frac{D_{\delta}}{d} (\delta_{ср_2} - \delta_{\delta_2}) + \delta_{\delta_1} \right]. \quad (90)$$

Как известно, погрешность проверки измерительных устройств по образцовой детали включает в себя погрешность аттестации образцовой детали и погрешность измерения образцовой детали аттестуемым устройством. Образцовая деталь, как правило имеет те же размеры, что и измеряемые детали и такую же шероховатость поверхности. Поэтому не возникает существенных различий в контактных деформациях и они не оказывают заметного влияния на точность измерений.

При проверке приборов диаметр образцовой детали, как правило, во много раз меньше диаметра измеряемой детали, а любая систематическая погрешность проверки является составляющей погрешности измерения и пропорциональна отношению диаметров измеряемой и образцовой деталей. Поэтому совершенно необходимо уменьшить влияние контактных деформаций, внося в результат проверки измерений поправку, вычисленную по формулам (39), (89) и (90).

В цеховых условиях следует отдать предпочтение методическому приему, заключающемуся в проверке прибора по результатам измерения наружного и внутреннего диаметров с выявлением средней поправки, отнесенной к среднему диаметру образцовой детали.

При достаточно большом диаметре образцовой детали и достаточно малой толщине ее стенки все отклонения величины деформации, при измерении внутренних и наружных диаметров, как показывают графики на рис. 17, имеют противоположные знаки и практически равны по абсолютному значению, а следовательно, их влияние взаимно компенсируется, так как деформации образцовой детали входят в формулу погрешности полностью, а не в виде отклонения от средней величины.

При проверке таким методом отпадает необходимость в создании образцов с шероховатостью поверхности, соответствующей шероховатости измеряемой детали. Целесообразно изготовление образцов с шероховатостью поверхности  $\nabla 10 - \nabla 12$ , что облегчит аттестацию их размеров.

Погрешности измерения, вычисленные, по формулам (39), (89) и (90), составляют: для наружных диаметров от 400 до 10 000 мм  $\Delta_n = (-3,266) \div (-3,039)$  мкм; для внутренних  $\Delta_{\delta} = (+3,893) \div (+4,037)$  мкм.

Погрешность проверки

$$\Delta_{пр} = \frac{\Delta_{\delta} - \Delta_n}{2} = (+0,314) \div (+0,499) \text{ мкм.}$$

Практически размеры образцовой детали могут находиться в пределах 400—600 мм. Поэтому  $\Delta_{пр} = (+0,314) - (+0,363)$  мкм, а ее проявление в виде погрешности измерения при измерении диаметров от 1000 до 10 000 мм составит  $\Delta_{изм(400)} = (+0,785) \div (+7,850)$  мкм;  $\Delta_{изм(600)} = (+0,588) \div (+5,880)$  мкм.

Таким образом, очевидно, что при проверке по образцовой детали большого диаметра влияние систематической погрешности на точность измерений уменьшается.

Однако учет систематической погрешности проверки еще не обеспечивает высокой точности самой проверки.

Необходимо аттестовать наружный и внутренний диаметры образцовой детали с точностью до 1—2  $\mu\text{м}$  и исключить влияние температурной погрешности. Для выполнения последнего условия недостаточно проводить измерения при температуре 20°C и полностью выравненных температурах эталона и ролика-калибра. Необходимо защитить измерительную зону от нагрева электрооборудованием стенда и электронной аппаратурой измерительного прибора. Во избежание влияния на точность измерений теплоты трения в опорах ролика и в зоне контакта ролика с образцовой деталью, измерения необходимо проводить при минимальных скоростях образцовой детали 30—50  $\text{м/мин}$ , а также избегать холостого качения ролика.

Поправка, выявленная при проверке, пересчитывается на 1  $\text{м}$  диаметра измеряемых деталей.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ**

Анализ точности измерения методом обкатывания роликом показал, что некоторые факторы могут весьма существенно влиять на стабильность работы измерительного устройства. Однако влияние ряда факторов аналитическим путем определить весьма трудно.

Для получения данных, позволяющих оценить точность измерения приборами различного типа, в ряде организаций были проведены экспериментальные исследования [11, 24, 31, 39, 41].

Анализ результатов этих исследований позволяет сделать следующие обобщающие выводы о выборе усилий прижатия и окружных скоростей измеряемых деталей.

Наличие на поверхности измеряемой детали смазывающе-охлаждающих жидкостей и шероховатость поверхности измеряемой детали для всех испытываемых измерительных устройств оказывали одинаковое влияние.

При измерении деталей, на поверхность которых подавалась эмульсия или смазка, проскальзывание наблюдалось в несколько большем диапазоне усилий прижатия ролика к детали. Например, при испытании фотоэлектрического устройства (рис. 12) верхний предел усилий, при котором проскальзывание еще не имеет существенного значения, повысился с 4 до 5  $\text{кгс}$ .

Однако при определенных усилиях прижатия точность измерения практически не снижается.

Испытания показали, что шероховатость поверхности в пределах  $\nabla 3$ — $\nabla 6$  весьма слабо влияет на точность измерения.

Большинство измерительных приборов хорошо работает при окружных скоростях 20—100  $\text{м/мин}$ , что вполне удовлетворяет требованиям тяжелого машиностроения, так как это соответствует диапазону скоростей резания, наиболее часто встречающихся в практике обработки деталей.

Надежная работа большинства приборов наблюдается при усилиях прижатия ролика к измеряемой детали свыше 15—20  $\text{кгс}$ . Однако для фотоэлектрических измерительных головок без промежуточных передач это усилие может быть снижено без ущерба для качества работы прибора до 7—10  $\text{кгс}$ , что дает значительные пре-



имущества, так как уменьшается составляющая погрешности измерения, обусловленная упругими деформациями ролика и измеряемой детали.

Исследования показали, что при выборе параметров измерительной головки (усилие прижатия ролика к детали) и условий измерения (амплитуда и частота колебаний системы деталь—ролик) необходимо учитывать влияние вибраций на точность измерений. Усилие прижатия ролика рекомендуется назначать исходя из формулы (33).

Точные измерения производить в процессе резания детали не рекомендуется.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РОЛИКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ**

Анализ результатов исследований КСХИ, ЛПИ, ЦНИИТ-МАШа и НИИПТМАШа влияния окружной скорости измеряемой детали на показания прибора приводит к общему заключению, что при повышении окружной скорости стабильность показаний прибора снижается.

В ряде случаев, особенно при исследовании измерительных головок с фотоэлектрическими датчиками без промежуточных передач, при превышении окружной скорости определенного предела наблюдается тенденция к значительному завышению показаний.

Исследователи объясняют эту тенденцию влиянием вибраций и недостаточной разрешающей способностью датчиков угла поворота измерительного ролика при больших окружных скоростях детали.

Следует отметить, что такое объяснение не отражает полноты явлений происходящих при работе измерительной головки прибора.

Это подтверждается испытаниями измерительных головок с индуктивными датчиками КЗТС и НИИПТМАШа, во время которых наблюдалось в некоторых случаях при переходе за определенную границу окружных скоростей значительное завышение показаний. Это завышение нельзя объяснить ни недостаточной разрешающей способностью датчика, ни влиянием вибраций.

В действительности при повышении окружной скорости, кроме указанных явлений, неизбежно нагревание в месте контакта ролика с измеряемой деталью, в опорах ролика и зубчатой передачи, в зоне зацепления зубчатых колес, в обмотке (индуктивного) и осветителе (фотоэлектрического) датчиков.

Нагревание ролика в процессе измерения, естественно, происходит более интенсивно, чем нагревание детали, что приводит к занижению показаний прибора.

Вопрос о том, какой из факторов для той или иной конструкции прибора является доминирующим в рабочем диапазоне окружных скоростей, можно решить специально поставленными экспериментами по выявлению так называемого «самонагрева» измерительного ролика; сравнение результатов таких экспериментов с расчетными данными поможет оценить влияние температурной деформации ролика.

НИИПТМАШем совместно с Уралмашзаводом исследовалось влияние самонагрева ролика с целью определения реальных значений  $\Delta_4$  для сравнения с расчетными, полученными по формуле (47).

Исследования проводились на карусельном станке при измерении наружного и внутреннего диаметров проточек обода колеса, обработанных до  $\nabla 6$ , с помощью медицинского электрического термометра ТЭМП-60, датчик которого после каждого цикла измерения прикладывался к рабочей поверхности ролика и контролируемой поверхности детали.

Результаты исследований показаны на рис. 71, где сплошной линией изображены экспериментальные кривые, а штриховой — построенные на основании вычислений по формуле (47) по фактическим значениям температуры ролика, изготовленного из закаленной стали ШХ15, и детали, изготовленной из стали 35Л.

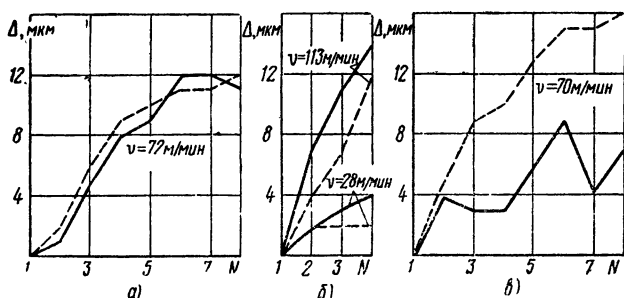


Рис. 71. Графики, построенные по результатам испытаний прибора ИД-6 (сплошные линии) и кривые, построенные на основании вычислений (штриховые линии):

$\Delta$  — отклонение результата измерения от номинального значения, за которое принят результат измерения при одинаковой температуре детали и ролика; №-номер серии измерений (в каждой серии проводилось по 50 измерений)

На рис. 71, а и б показаны результаты контроля диаметра наружной поверхности (721 мм), а на рис. 71, в — внутренней поверхности (702 мм).

Результаты опытов показывают, что расхождения экспериментальных данных с полученными расчетным путем при измерении наружных диаметров менее заметны, чем при измерении внутренних.

Для оценки результатов измерения наружных диаметров деталей, изготовленных с точностью ниже 3—4-го классов для ввода температурной поправки можно пользоваться формулой (47).

При этом основное влияние на погрешность измерения оказывает изменение температуры ролика.

Значительные расхождения результатов опытов с данными расчетов при измерении внутренних диаметров объясняются отличием условий контакта поверхностей ролика и детали от условий при измерении наружных диаметров. При измерении внутренних диаметров имеет место более интенсивное выделение тепла в зоне контакта и лучший теплообмен между роликом и деталью.

Как правило, выявление влияния окружной скорости поверхности контролируемой детали производится путем сопоставления результатов измерений, полученных при последовательном изменении скоростей.

Однако в связи с значительной работой трения, сопровождающей процесс измерения, полученные результаты характеризуют не только непосредственное влияние скорости, но и влияние изменений температуры измерительного ролика, вызванных его самонагревом. Так как интенсивность самонагрева ролика зависит от скорости, то разделить влияние этих двух факторов при обычной методике исследований невозможно.

Для оценки влияния обоих указанных факторов в НИИПТМА-Ше были проведены следующие экспериментальные исследования.

Параллельно исследовались два измерительных устройства с индуктивными датчиками, единственным существенным различием которых являлось то, что в одном из них датчик был снабжен механической повышающей передачей (см. рис. 13), а в другом (см. рис. 19) ее функции выполнял электронный умножитель измерительных импульсов.

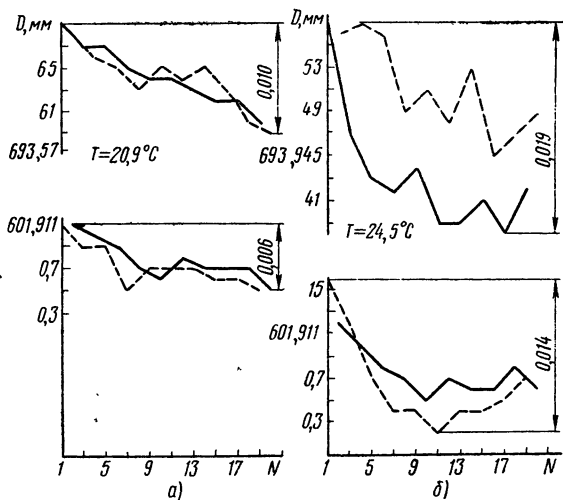


Рис. 72. Графики, построенные по результатам испытаний приборов ИД-7 и ИД-7М:

а — с датчиком, показанным на рис 19; б — с датчиком, показанным на рис 13

Оба датчика имели одинаковую цену импульса, массу, внешнюю форму и были изготовлены из одного и того же материала.

Измерительное усилие для обоих датчиков составляло 30 кгс.

Момент, необходимый для преодоления трения в элементах механизма, для первого датчика составлял 0,25 кгс·см, для второго 0,125 кгс·см.

Опыты производились на лабораторном стенде НИИПТМАШа (рис. 67) при измерении макета детали, изготовленного из стали 45 с наружным диаметром 694 мм и внутренним — 602 мм. Шероховатость рабочих поверхностей поверхности соответствовала  $\nabla 5$ .

Измерения производились с использованием накопителя, обеспечивающего цену отсчета показаний  $0,001\text{ мм}$  за 20 оборотов измеряемой детали.

Использование накопителя, кроме уменьшения цены отсчета, вызывало увеличение пути измерения, а следовательно, увеличивало и работу трения за период измерения.

Измерения производились в строго постоянном темпе с изменением скорости детали от наибольшей ( $v_{\text{наиб}}=150\text{ м/мин}$ ) к наименьшей ( $v_{\text{наим}}=30\text{ м/мин}$ ) и в обратном порядке.

После каждого трех измерений производилась смена измеряемого диаметра — наружного на внутренний и наоборот.

На графиках (рис. 72) приведены кривые, построенные на основании вычислений средних значений из каждого трех измерений (480 измерений каждым измерительным устройством).

Результаты расположены в последовательности их получения во время опытов, т. е. ось абсцисс практически соответствует координате времени. По оси ординат отложены полученные значения измеряемых диаметров. Верхние графики на рис. 72, *а* и *б* соответствуют наружному диаметру макета детали, нижние — внутреннему. Благодаря чередованию измерений каждая пара точек по оси ординат получена практически одновременно.

Штриховой линией изображены результаты опытов, полученных при скорости поверхности измеряемой детали порядка  $20\text{ м/мин}$ , сплошной — при  $120\text{ м/мин}$ .

Всем графикам присуща характерная особенность — постепенное загибание результатов измерений по мере увеличения числа опытов.

Так как при повышении температуры измерительного ролика его диаметр увеличивается, а следовательно, уменьшается угол его поворота за измерительный цикл, то это явление вполне закономерно и объясняется самонагревом ролика. Характерно, что для датчика с механической передачей, являющейся одним из источников нагрева, это явление выражено значительно сильнее.

Четкое разделение результатов, полученных при максимальной и минимальной скоростях на наружном диаметре макета детали датчиком с механической передачей (верхняя правая пара кривых), может служить подтверждением наличия систематической скоростной погрешности. Однако значительно меньшее проявление этого разделения на внутреннем диаметре и полное его отсутствие для датчика без механической передачи приводят к выводу, что в данном случае наблюдается также проявление температурной погрешности.

Анализ приведенных здесь результатов экспериментальных исследований приводит к выводам, что ранее воспринимаемое занижение показаний результатов измерений приборов при длительных испытаниях с повышенными скоростями вращения измерительного ролика как результат влияния скорости на разрешающую способность датчика, в действительности является результатом проявления систематической составляющей погрешности, вызванной нагреванием ролика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев И. А., Дворецкий Е. Р. Контроль размеров в машиностроении. М., Машгиз, 1959.
2. Динник А. Н. Справочник по технической механике. М.-Л. Огиз, 1949.
3. Доброгурскии С. О. Счетно-решающие механизмы. М., Оборонгиз, 1950.
4. Елецких И. И. О повышении точности измерения длины листов методом обкатки. Сб. «Автоматика и контроль в тяжелом машиностроении». Труды НИИПТМАШа, Вып. 6. Краматорск, 1969.
5. Забелин Н. А. Расчет счетно-решающих механизмов на точность. М., Оборонгиз, 1949.
6. Злодеев Г. А. Температурные погрешности измерений. Сб. «Основные вопросы точности, взаимозаменяемости и технических измерений в машиностроении», Под ред. А. Н. Гаврилова. М., Машгиз, 1958.
7. Иванов Б. Н. Автоматический контроль больших диаметров методом обкатки роликом и анализ погрешности метода. Труды НИИПТМАШа, Вып. 2, Краматорск, 1961.
8. Иванов Б. Н., Елецких И. И. Автоматическое измерение длины методом обкатки. Сб. «Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении». № 5. М., «Машиностроение», 1967.
9. Иванов Б. Н., Ионак В. Ф., Дубенец А. Л. Новые приборы для измерения кинематической точности зубообрабатывающих станков, № 18-67-15, М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967.
10. Иванов Б. Н., Мельничук В. А. Измерение диаметра поперечного сечения цилиндрических изделий методов обкатки роликом. «Измерительная техника», 1964, № 9.
11. Иванов Б. Н., Мельничук В. А. Использование автоматизированных устройств для измерения деталей больших диаметров методом обкатки роликом. «Обработка металлов резанием», № 17-66-8, М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1966.
12. Иванов Б. Н., Мельничук В. А. О методической погрешности измерения из-за некруглости измеряемых деталей. Сб. «Автоматика и контроль в тяжелом машиностроении». Труды НИИПТМАШа, вып. 6, Краматорск. 1969.
13. Иванов Б. Н., Мельничук В. А., Бондарь И. К. Прибор с цифровой индикацией для автоматического измерения диаметров крупногабаритных деталей. Сб. «Автоматика и контроль

в тяжелом машиностроении». Труды НИИПТМАШа, вып. 6, Краматорск, 1969.

14. Иванов Б. Н., Мельничук В. А., Бузунова И. Ф. Автоматизация измерения диаметров крупногабаритных деталей. Сб. «Обработка металлов резанием», №17-66-12, М., НИИИНФОРМ-ТЯЖМАШ, 1967.

15. Иванов Б. Н., Эстерзон Ю. Я. Промышленные испытыва устройства для автоматического измерения длины толстых листов «Автоматизация и приборостроение», Киев, 1964.

16. Иванов Б. Н., Эстерзон Ю. Я. Устройство для автоматического контроля длины толстых листов. Сб. «Металлургическое машиностроение», вып. 3, М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1965.

17. Ионак В. Ф., Иванов Б. Н. К выбору типа датчиков стола приборов для измерения кинематической точности (кинематометров). Сб. «Обработка металлов резанием», № 17-66-8, М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1966.

18. Ионак В. Ф., Иванов Б. Н. Фотоэлектрический преобразователь угла с временным усреднением (ПВУ), применяемый в кинематометрах. «Материалы I научно-технической конференции НИИ-ПТМАШа», Краматорск, 1968.

19. Ишлинский А. Ю. О проскальзывании в области контакта при трении качения. «Известия АН СССР, ОТН», т. 6, 1956.

20. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и точности механизмов приборов. Машгиз, 1961.

21. Крагельский И. В. Трение и износ. Машгиз, 1962.

22. Кукин Е. И. Активный контроль диаметров крупногабаритных изделий. «Известия вузов. Машиностроение», № 6, МВТУ, 1964.

23. Кукин Е. И. Измерение крупногабаритных деталей методом обкатывания роликом. Передовой научно-технический и производственный опыт, № 2-64-161/4, ГОСИНТИ, 1964.

24. Кукин Е. И. Исследование влияния некоторых факторов на точность измерения больших диаметров методом обкатывания. «Известия вузов. Машиностроение», № 11, 1964.

25. Кучер И. М., Шавлюга Н. И. Автоматизация металло-режущих станков. М.-Л., Машгиз, 1956.

26. Левашов А. В. Основы расчета точности кинематических цепей металлорежущих станков. М., «Машиностроение», 1966.

27. Макаревич Б. К., Новиков Н. И., Сапожков А. И. Автоматические методы измерения наружных диаметров. Труды ЦНИИТМАШа, № 20, 1961.

28. Мироненко А. В. Фотоэлектрические измерительные системы. М., «Энергия», 1967.

29. Нестеренко А. Д., Орнатский П. П. Детали и узлы приборов. М., Гостехиздат, 1961.

30. Новиков Н. И. Исследование и разработка методов и средств измерения наружных и внутренних диаметров до 10 м. ЦБНТИ ТЯЖМАШ, 1958.

31. Новиков Н. И. Теоретическое и экспериментальное исследование автоматических методов и средств измерения цилиндрических деталей, обрабатываемых на токарных и карусельных станках. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, М., ЦНИИТМАШ, 1964.

32. Новиков Н. И., Макаревич Б. К. Автоматическое измерение размеров при точении. — «Измерительная техника», 1961, № 6.

33. Палей М. А. Определение некруглости по профилограммам. — «Измерительная техника», 1962, № 3.
34. Перфильев Г. П. Автоматизация контроля размеров деталей в процессе обработки. «Опыт уральских заводов. Механическая обработка металлов». Вып. 1, 1950.
35. Пинегин С. В. Контактная прочность в машинах. М., «Машиностроение», 1965.
36. Пронин Б. А., Ревков Г. А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы). Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1967.
37. Рабинович А. Н. Автоматизация технологических процессов. Киев, Гостехиздат УССР, 1959.
38. Трутенъ В. А. Прибор для производственного контроля больших диаметров. «Вестник машиностроения», 1960, № 5.
39. Трутенъ В. А. Экспериментальные исследования однооборотного прибора. Труды Красноярского сельскохозяйственного института. Т. V. Красноярск, 1960.
40. Трутенъ В. А., Трутенъ Ф. А. Исследование уменьшения диаметра мерительного диска в процессе обкатывания. Труды КСХИ. т. X. Красноярск, 1962.
41. Трутенъ В. А., Трутенъ Ф. А. Некоторые электронные приборы для активного контроля больших диаметров. «Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении». Научно-технический сборник, № 5. М., «Машиностроение», 1967.
42. Трутенъ В. А. и Трутенъ Ф. А. Прибор для измерения больших диаметров. «Станки и инструмент», 1961, № 6.
43. Эстерзон Ю. Я. и Иванов Б. Н. Безупорная точная установка листов на рольганге. «Вестник машиностроения», 1966, № 4.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Метод контроля диаметральных и линейных размеров при помощи измерительного ролика . . . . .</b>	<b>4</b>
Сущность метода обкатывания роликом . . . . .	4
Принцип работы автоматизированных устройств для измерения диаметров . . . . .	7
Принцип работы автоматизированных устройств для измерения длин . . . . .	9
Классификация устройств . . . . .	10
<b>Глава II. Приборы для измерения диаметра и некруглости . . . . .</b>	<b>11</b>
Приборы для измерения диаметров . . . . .	11
Приборы для измерения диаметров с учетом некруглости . . . . .	36
Приборы для измерения диаметров с учетом температурных деформаций . . . . .	41
<b>Глава III. Устройства для контроля длин и линейных перемещений . . . . .</b>	<b>43</b>
Устройства для автоматического контроля длин прокатываемого металла . . . . .	43
Устройства для контроля линейных перемещений рабочих органов станков . . . . .	50
<b>Глава IV. Погрешности измерения методом обкатывания роликом . . . . .</b>	<b>54</b>
Измерение длин и линейных перемещений . . . . .	54
Измерение диаметров . . . . .	74
<b>Глава V. Самоориентация измерительного ролика . . . . .</b>	<b>88</b>
Схемы механизмов для самоориентации ролика . . . . .	89
Продольная ориентация ролика . . . . .	92
Поперечная ориентация ролика . . . . .	104
Влияние конусности ролика на самоориентацию . . . . .	106
<b>Глава VI. Экспериментальные исследования погрешности измерения методом обкатывания роликом . . . . .</b>	<b>112</b>
Методы и средства проверки точности . . . . .	112
Экспериментальные исследования влияния различных факторов на точность измерения диаметров . . . . .	137
Исследование влияния нагрева измерительного ролика на точность измерений . . . . .	138
Список литературы . . . . .	142

Борис Николаевич Иванов

## ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ

Редактор издательства Л. К. Тучкова  
Технические редакторы Уварова А. Ф., Макарова Л. А.  
Корректор И. М. Борейша

---

Сдано в набор 15/XI 1972 г	Подписано к печати 18/V 1973 г.	T-09002
Формат 84×108 <sup>1</sup> / <sub>32</sub>	Бумага № 2	Усл. печ л. 7,56
Тираж 5.500	Заказ № 90	Уч. изд л. 8,7
		Цена 44 коп.

---

Издательство «Машиностроение» Москва, Б-78, 1-й Басманный пер, 3  
Московская типография № 32 «Союзполиграфпрома» при Государственном  
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли.  
Москва, К-51, Цветной бульвар, д. 26.