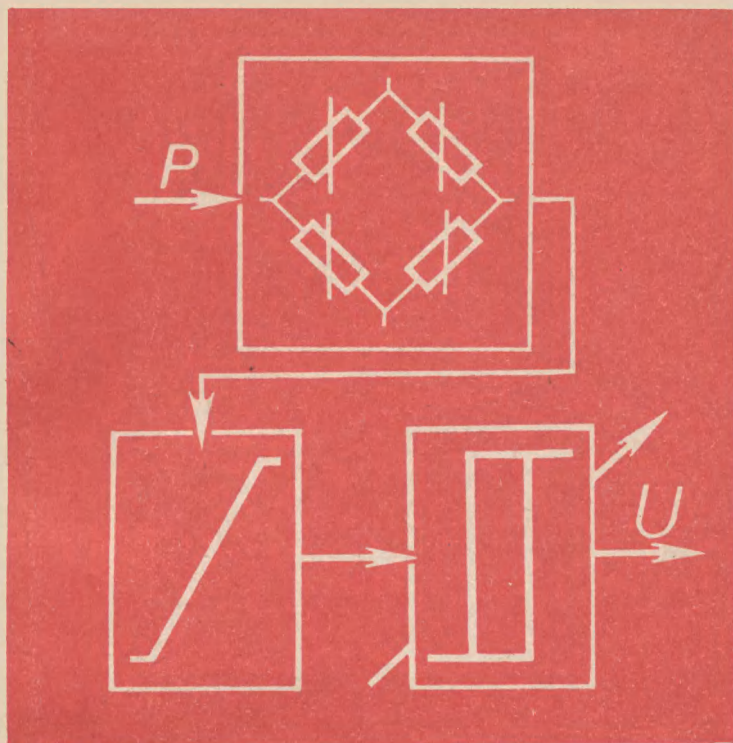




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



В. И. ЛИТВАК

**ТЕНЗОРЕЛЕ.  
РАСЧЕТ.  
КОНСТРУИРОВАНИЕ.  
ПРИМЕНЕНИЕ**



**БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ**



**В. И. ЛИТВАК**

**ТЕНЗОРЕЛЕ.  
РАСЧЕТ.  
КОНСТРУИРОВАНИЕ.  
ПРИМЕНЕНИЕ**

МОСКВА « МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1989



Scan AAW

ББК 32.96-04  
Л64  
УДК 681.584

Рецензент канд. техн. наук *Р.А. Макаров*

**Литвак В.И.**

Л64 Тензореле. Расчет, конструирование, применение. — М.: Машиностроение, 1989. — 160 с. ил. — (Б-ка приборостроителя)  
ISBN 5-217-00458-4

Рассмотрены различные тензорезисторные реле, их характеристики, конструкции и электрические схемы реле для контроля, сигнализации и регулирования различных физических величин (сил, давлений, моментов, перемещений, деформаций, скоростей, расходов и др.), а также для управления разнообразными технологическими процессами.

Для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами создания и применения контрольно-измерительных приборов, средств автоматизации производственных процессов и экспериментальных исследований.

2706040000—289  
Л ————— 289—89  
038 (01) —89

ББК 32.96-04

ISBN 5-217-00458-4 © Издательство "Машиностроение", 1989

## *ПРЕДИСЛОВИЕ*

Применение тензорезисторов в различных областях науки и техники приносит значительную пользу народному хозяйству. С помощью этого гибкого средства измерений, отличающегося простотой, надежностью, быстродействием, стабильностью, экономичностью, малыми габаритными размерами и массой, низкой стоимостью, успешно решаются разнообразные задачи, такие, как исследования постоянных и переменных упругих и пластических деформаций, измерения напряжений, сил, давлений, моментов и других физических величин. В настоящее время около 80 % преобразователей механических величин используют тензорезисторы.

Успехи современной электроники, в частности интегральной микроэлектроники, обеспечивающие возможность создания недорогих компактных и высоконадежных усилителей и преобразователей для согласования маломощного выхода тензорезисторов с исполнительными органами устройств автоматики, способствовали все более широкому использованию тензорезисторных устройств в системах автоматического контроля, сигнализации и регулирования различных технологических и испытательных процессов, диагностирования оборудования.

Однако существующая литература по тензометрии недостаточно освещает вопросы практического применения тензорезисторов в конкретных системах промышленной автоматики и не может ответить с необходимой полнотой на вопросы, возникающие при проектировании и применении тензорезисторных устройств.

Практически полностью отсутствует систематизированная литература по одной из перспективных разновидностей устройств, использующих тензорезисторы, — тензорезисторным реле (ТР), обеспечивающим сравнительно простыми средствами формирование и выдачу сигналов при достижении контролируемой величиной определенных фиксированных значений и успеш-

но конкурирующим по стоимости и надежности с традиционными типами реле с механическими входными сигналами. Применение ТР целесообразно и эффективно при создании индикаторов заданных значений и регуляторов деформаций, напряжений, сил, моментов, масс, параметров движения, различных счетных приборов, сигнализаторов возникновения разрушений, скорости и последовательности их развития, систем управления возбуждением механических колебаний и др.

В настоящей книге предпринята попытка в какой-то мере восполнить отмеченный выше пробел в литературе по тензометрии путем обобщения и систематизации материалов, имеющихся в разрозненных и немногочисленных отечественных и зарубежных публикациях, а также результатов разработок и исследований автора по вопросам конструирования и применения ТР.

Автор понимает, что при изложении широкого круга вопросов, связанных с проектированием и применением разнообразных ТР, в небольшом объеме книги отдельные вопросы освещены недостаточно подробно.

Автор будет признателен всем, кто пришлет в адрес издательства свои замечания по содержанию книги.

# Г Л А В А 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

## 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

Тензорезисторное реле (ТР) представляет собой устройство автоматического контроля, сигнализации или регулирования с воспринимающим органом (первичным преобразователем) на базе тензорезисторов и конечным числом возможных значений выходной величины.

ТР различного назначения строят по общим принципам.

Рассмотрим типовую структурную схему ТР, поясняющую взаимодействие между его элементами (рис. 1). Тензорезисторы  $T$  преобразуют контролируемый параметр в изменение электрического сопротивления. В зависимости от назначения и условий применения ТР, тензорезисторы устанавливают непосредственно на объекте контроля (в ТР деформаций и механических напряжений) или на первичном неэлектрическом (механическом) преобразователе — упругом элементе  $УЭ$ , предварительно преобразующем контролируемый параметр в деформацию (в ТР сил, моментов, давлений, перемещений и др.).

Тензорезисторы обычно включают в измерительную схему  $ИС$  (например, мостовую или потенциометрическую), преобразующую изменение сопротивления в изменение значений электрического тока, напряжения, частоты или кодового сигнала. Для тензорезисторов, являющихся параметрическими преобразователями, предусматривается источник питания  $ИП$  постоянным или переменным (синусоидальным либо импульсным) током.

Чувствительный (воспринимающий) орган и ряд промежуточных элементов, а именно: тензорезисторы с упругими элементами, измерительные схемы, которые часто снабжаются дополнительными усилителями и преобразователями электрических сигналов, образуют датчик ТР.

В ТР применяют как датчики с прямым (последовательным) преобразованием, так и датчики, использующие метод сравнения в неравновесном и равновесном режимах. Датчики с

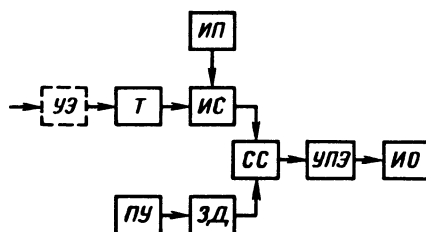


Рис. 1. Типовая структурная схема ТР

последовательным преобразованием отличаются простотой, однако на их характеристики влияют внешние условия, что обуславливает значительные погрешности.

Для повышения точности используют различные методы изоляции от влияния внешних воздействий, стабилизации этих воздействий, их компенсации или ослабления. Датчики, в которых используется метод сравнения в неравновесном режиме (дифференциальные датчики), в общем случае имеют две цепочки с последовательным преобразованием, каждая из которых может содержать чувствительный орган и преобразующие звенья. Для повышения чувствительности датчика эти цепочки включают так, чтобы полезные сигналы суммировались, а сигналы, вызванные изменениями внешних условий, и другие мешающие воздействия вычитались. Однако полная компенсация влияния факторов, вызывающих погрешности, достигается лишь при одном значении контролируемой величины. Если этим значением является заданный уровень срабатывания ТР, то может быть достигнута удовлетворительная точность. В противном случае для снижения уровня погрешностей приходится применять те же методы, что и для датчиков с последовательным преобразованием.

Наибольшей стабильностью в работе и минимальными погрешностями, обусловленными изменениями внешних условий, обладают компенсационные датчики (датчики уравнивающего преобразования), в которых используется метод сравнения в равновесном режиме. Компенсационные датчики сложнее датчиков с последовательным преобразованием и дифференциальных датчиков, однако с их помощью можно получать выходные сигналы большой мощности, обеспечивать любой вид функциональной связи между входной и выходной величинами, компенсировать погрешности, вызванные изменениями внешних условий в пределах всего диапазона контролируемой величины. Недостатком компенсационных датчиков является низкое быстродействие.

В схеме сравнения *СС* текущее значение контролируемого параметра с выхода датчика сопоставляется с установленными задатчиком *ЗД* значениями (уставками), при которых ТР должно сработать (т. е. изменить значение своей выходной величины).

В ТР для систем программного управления настройка задатчика может автоматически меняться от этапа к этапу программы. Для этого используются команды программного устройства *ПУ* системы управления или собственного программного устройства ТР.

В ТР для систем следящего управления настройка задатчика может меняться автоматически в функции ведущего параметра. Для этого используются команды задатчика ведущего параметра, если таковой применяется в системе управления, или от специального датчика ведущего параметра, если последний меняется по неизвестному заранее закону.

Сигнал с выхода *СС*, зависящий от соотношения сравниваемых величин, используется в исполнительном органе *ИО*. Предварительно он подается на усилительно-преобразовательные элементы *УПЭ*, в которых в зависимости от необходимости осуществляется усиление сигнала, его преобразование, фильтрация, стабилизация отдельных поправок, решение различных математических и логических задач, запоминание обнаруженных признаков событий, распределение сигнала от одной схемы сравнения *СС* к нескольким исполнительным органам и др. Исполнительные органы ТР воздействуют на командные, сигнализирующие, индикаторные, регистрирующие устройства.

Для контроля крупных и сложных объектов при необходимости слежения за несколькими однотипными или разнородными параметрами могут создаваться многоканальные ТР непрерывного или последовательного действия. Первые состоят из нескольких (по числу контролируемых параметров) постоянно включенных автономных систем, построенных по схеме, приведенной на рис. 1, причем общими у них могут быть командные исполнительные органы, а сигнализация о характере и причине ситуации, вызвавшей срабатывание канала ТР, выполняется отдельными для каждого контролируемого параметра элементами.

В многоканальных ТР последовательного действия в одних и тех же задающих, сравнивающих, усилительных, преобразовательных и других элементах производится поочередная однородная обработка исходной информации, получаемой от большого числа датчиков. Для того чтобы сигналы разнородных датчиков можно было обрабатывать в общих блоках, их предва-



нительно нормируют, т. е. приводят к унифицированной линейной шкале с заданными начальной и конечной точками.

Нормирующие устройства могут быть индивидуальными для каждого контролируемого параметра, групповыми или общими. Поочередное подключение датчиков ко входу, а исполнительных органов к выходу общих блоков производится синхронно работающими входными и выходными переключателями. Конструктивно их нередко объединяют в один обходящий переключатель.

Многоканальные ТР последовательного действия характеризуются минимальным объемом аппаратуры по сравнению с ТР непрерывного действия, однако уступают им по быстродействию и надежности.

Для обеспечения высокой надежности ТР могут снабжаться постоянно или периодически действующими цепями контроля работоспособности отдельных элементов или ТР в целом, например, на базе калибровочных сопротивлений, подключаемых с помощью коммутатора к тензорезисторам датчика и воспроизводящих условия срабатывания ТР.

В составе ТР могут использоваться микропроцессоры для решения таких задач, как программная перестройка задатчика, снижение погрешности за счет автоматической подстройки параметров срабатывания и отпускания в зависимости от значений внешних влияющих факторов (например, температуры окружающей среды), встроенная диагностика, включение резервных элементов, градуировка, выполнение вычислительных операций (например, при определении усредненных показаний, суммировании показаний нескольких датчиков) и др.

Некоторые элементы ТР, показанные на рис. 1, могут конструктивно объединяться с другими элементами или вообще отсутствовать. Так, измерительные схемы, кроме преобразования изменений сопротивлений тензорезисторов в изменения электрического тока или напряжения, часто одновременно выполняют функции схемы сравнения; при использовании полупроводниковых тензорезисторов со значительной тензочувствительностью, измерительных схем с повышенным уровнем выходного сигнала и высокочувствительных исполнительных органов (например, магнитоэлектрических реле) удастся обойтись без усилительных элементов. В ряде случаев ТР, используемые в устройствах аварийной защиты и сигнализации, имеют общие элементы с системами управления и контроля защищаемых объектов, например, датчики, усилители.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

Основными характеристиками, общими для всех типов ТР, являются статическая и динамическая характеристики (функция преобразования), параметры срабатывания и отпускания, чувствительность, порог чувствительности, перегрузочная способность, надежность, стабильность, погрешность (аналогичные характеристики используются и для оценки составных элементов ТР).

*Статическая характеристика* определяет функциональную зависимость между контролируемой величиной ( $x$ ) на входе ТР и выходным сигналом ( $y$ ). Ее можно задавать аналитически в виде уравнения  $y = f(x)$ , таблично или графически. Статическая характеристика ТР имеет релейный характер, т. е. непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное изменение выходной величины, которая может принимать конечное число значений (обычно 2 или 3).

На рис. 2 представлено несколько разновидностей статических характеристик ТР. В первых двух случаях выходная величина может принимать два значения ( $y_m$  и  $y_0$ ), в двух других случаях – три значения ( $-y_m, 0, +y_m$ ).

Характеристики, приведенные на рис. 2, а, в, – однозначные, т. е. каждому значению входной величины соответствует одно значение выходной величины. Характеристики, приведенные на рис. 2, б, г, наряду с областью, где значение входной величины однозначно определяет значение выходной величины, имеют еще и зону неоднозначности, где выходная величина может принимать два значения в зависимости от знака скорости изменения входной величины.

Неоднозначность хода статической характеристики при увеличении и уменьшении входной величины называется *гистерезисом*. Гистерезис возникает в ТР вследствие механического гистерезиса наклеиваемых тензорезисторов, внутреннего трения в упругих элементах, трения в подвижных элементах и др. Иногда в ТР приходится специально обеспечивать гистерезис статической характеристики регулируемой величины (например, в системах возбуждения переменных нагрузок для ресурсных испытаний изделий), что достигается специальными конструктивными и схемными решениями (А. с. 200846 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M 7/00).

Значение  $x = x_0$ , при котором величина  $y$  скачком изменяется до значения  $y_m$ , называется *параметром срабатывания*, а значение  $x = \lambda x_0$ , при котором  $y$  скачком уменьшается до  $y_0$ , – *па-*

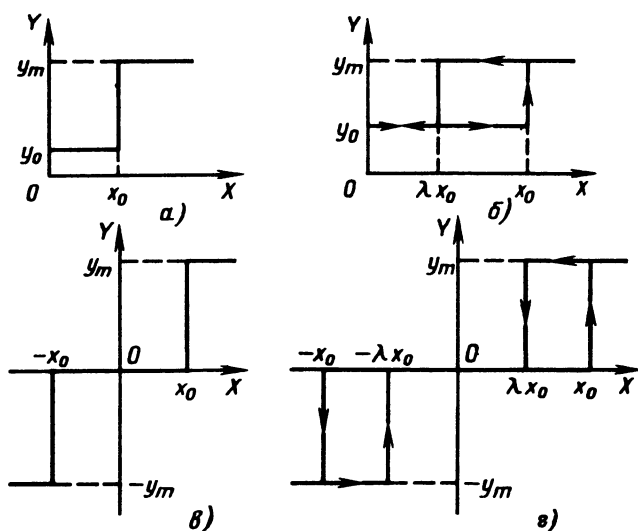


Рис. 2. Статические характеристики ТР

раметром отпускания реле (для характеристик на рис. 2, в, г  $y_0 = 0$ ). Область возможных значений  $x_0$  определяет *рабочий диапазон* ТР.

ТР может фиксироваться во включенном состоянии и после снятия воздействия на входе. В этом случае ТР возвращается в исходное состояние обычно после подачи воздействия на другой его вход или воздействия другого знака на тот же вход.

Статическая характеристика ТР приобретает релейный характер при использовании хотя бы одного составного элемента с релейными свойствами.

*Динамическая характеристика* отражает поведение ТР при быстрых изменениях (т. е. при частотах, превышающих 5 – 10 Гц) входной величины и зависит от его структуры и используемых элементов. Она может быть задана: динамическим оператором (передаточной функцией), представляющим собой дифференциальное уравнение в операторной форме, которое связывает входную и выходную величины; переходной характеристикой  $y = f(t)$ , где  $t$  – время, при скачкообразном изменении входной величины; частотной характеристикой, т. е. зависимостью параметра срабатывания от частоты изменения входного сигнала; фазовой характеристикой, т. е. зависимостью сдвига фаз между векторами входной и выходной величин от частоты синусоидального изменения входной величины.

Быстродействие ТР удобно характеризовать *временем срабатывания*  $t_{\text{сраб}}$ , которое измеряется интервалом времени от момента подачи на вход величины, равной или превосходящей параметр срабатывания  $x_0$ , до момента установления значения выходной величины  $y_m$ .

Значение  $t_{\text{сраб}}$  может зависеть от величины входного воздействия. Величина  $f_{\text{сраб}} = 1/(t_{\text{сраб}} + t_{\text{опт}})$ , где  $t_{\text{опт}}$  — время отпущения, характеризует *максимальную частоту срабатывания*.

*Статическая чувствительность* — это отношение изменения выходного сигнала  $\Delta y$  к вызывающему его изменению входной величины  $\Delta x$  в статических условиях, т. е.  $s_{\text{ст}} = \Delta y / \Delta x$ , или при переходе к пределу  $s_{\text{ст}} = dy/dx$ . Чувствительность  $s_{\text{ст}}$  постоянна, если статическая характеристика  $y = f(x)$  линейна. Если функция  $y = f(x)$  нелинейна, необходимо указывать точки, к которым относится данная чувствительность. Среднее значение  $s_{\text{ст}}$ , представляющее собой отношение  $y/x = k$ , называют коэффициентом преобразования.

При определении чувствительности ТР по характеристикам составных элементов чувствительности элементов при последовательном включении перемножаются, а при параллельном — складываются.

Под чувствительностью в динамических условиях работы подразумевают отношение скорости изменения выходного сигнала к соответствующей скорости изменения входного сигнала:

$$s_d = \frac{dy/dt}{dx/dt}.$$

Минимально возможное значение параметра срабатывания  $x_0$  определяет *порог чувствительности* ТР.

*Точность работы* ТР определяется отклонением фактического значения параметра срабатывания ( $x_0$ ) от заданного ( $x_{\text{зд}}$ ) и зависит от погрешностей, порождаемых относительным несовершенством конструкции и схемы устройства, условиями технологического процесса его изготовления и эксплуатации. Независимо от причин погрешности могут быть выражены в абсолютных или относительных единицах. Соответственно различают абсолютную ( $\delta x_0$ ) и относительную ( $\eta_{x_0}$ ) погрешности:  $\delta x = x_0 - x_{\text{зд}}$ ,  $\eta_{x_0} = \delta x_0 / x_0$ .

Отклонения  $\delta \Pi_i$  тех или иных характеристик  $\Pi_i$ , влияющих на параметр срабатывания ТР, от расчетных погрешностей (*пер-*

*вичные погрешности*) являются источниками *частных погрешностей*

$$\delta x_{0i} = \frac{\partial x_0}{\partial P_i} \delta P_i.$$

Суммарная результирующая погрешность определяется как сумма частных погрешностей, причем способ суммирования определяется природой первичных погрешностей.

Различают следующие виды погрешностей ТР: методические и инструментальные, основные и дополнительные, статические и динамические, систематические и случайные.

*Методические погрешности* зависят от выбранного метода измерения контролируемого параметра и принципа работы ТР.

*Инструментальные погрешности* возникают вследствие конструктивных недостатков ТР, отклонений его характеристик из-за неточности изготовления или естественного старения материалов, изнашивания и т. п.

Погрешности, связанные с режимами эксплуатации, обусловлены тем, что функция каждого из преобразований цепочки  $x \rightarrow y$  зависит не только от контролируемой величины, но и от дополнительных факторов, влияющих на свойства и параметры каждого из элементов ТР. К таким факторам относятся: атмосферное давление, температура и влажность окружающей среды, напряжение питания, внешние электрические и магнитные поля, удары и вибрация и т. п. Влияние дополнительных факторов оценивается чувствительностью к каждому из них, т. е. отношением изменения выходной величины элемента ТР к изменению дополнительного фактора. При градуировке и аттестации ТР все влияющие факторы могут поддерживаться в узких пределах их изменений. Такие оговоренные в технической документации условия называют нормальными, а суммарную результирующую погрешность, возникающую в этих условиях, — *основной погрешностью*. Погрешности, вызываемые изменениями внешних условий по сравнению с нормальными, называют *дополнительными*.

Погрешность, возникающая при установившемся значении контролируемой величины и неизменных внешних условиях, называется *статической*, а погрешность, возникающая при изменениях контролируемой величины и (или) внешних воздействий, — *динамической*. Динамическая погрешность обусловлена инерционностью подвижных элементов, наличием реактивных элементов в электрических цепях и т. п.; при этом она зависит не только от параметров ТР, но и от характера изменения контролируемого параметра.

Погрешности, не меняющиеся со временем или являющиеся известными функциями определенных параметров, называются *систематическими*. К ним относятся: погрешности градуировки датчика, связанные с ошибками в положении делений, нанесенных на шкалу; большинство дополнительных погрешностей (в частности, погрешности от ползучести тензорезисторов, изменения их чувствительности с изменением температуры и во время изотермических выдержек, от температурного приращения сопротивления, влияния влаги на сопротивления тензорезисторов и изоляции); погрешности, вызванные неправильной установкой устройства (например, неправильностью приклейки тензорезисторов к упругому элементу, характеризуемой степенью совпадения оси воспринимающего органа с заданным направлением измерения деформации); методические погрешности, обусловленные теоретическими ошибками метода измерений, и т. п. Частная погрешность ТР, обусловленная систематическими первичными погрешностями,  $\delta x_0 = \delta x_{01} + \delta x_{02} + \dots + \delta x_{0n}$ , где  $n$  — число первичных погрешностей.

Неопределенные по величине и знаку или недостаточно изученные погрешности, в проявлении которых не удастся установить закономерности, называются *случайными*. Они происходят от совместного проявления большого числа причин (например, погрешности, обусловленные отклонениями чувствительности отдельных тензорезисторов, определяемой качеством изготовления, числом и размерами дефектов приклейки к упругому элементу и другими причинами, от принимаемой при расчетах ТР средней чувствительности для соответствующей партии). Процесс появления случайных погрешностей является, как правило, стационарным, и разнообразие величин случайных погрешностей характеризуют законом распределения их вероятностей. При большом числе независимых причин появления случайных погрешностей обычно принимают (и это подтверждается опытом) закон распределения Гаусса. Случайную погрешность ТР оценивают либо средним квадратичным ее значением

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^N \frac{(x_{0j} - \bar{x}_0)^2}{N}},$$

где  $\bar{x}_0$  — среднее арифметическое значение результатов  $x_{0j}$  измерений величины  $x_0$ ;  $N$  — число измерений, либо вероятным (средним) значением  $E = 0,67\sigma$ , либо предельным значением  $\Delta_{\text{п.р}} = \pm 3\sigma$ . При случайном характере первичных погрешностей предельное значение погрешности ТР можно определить квадра-

тичным суммированием предельных значений частных погрешностей.

Для повышения точности работы ТР применяют следующие методы: стабилизация основных параметров элементов ТР технологическим путем (использование стабильных материалов и соответствующей технологии изготовления, в частности, использование для тензорезисторов основы и клеев со стабильными характеристиками, специальная термообработка микропроводов для проволочных тензорезисторов, применение термокомпенсированных тензорезисторов, изготовление упругих элементов из материалов с достаточной статической и циклической прочностью, малыми гистерезисом, последействием и релаксацией напряжения); пассивная защита от быстроменяющихся влияющих величин (уменьшение случайных погрешностей путем применения фильтрации, амортизации, влагозащиты, защиты от агрессивных сред и т. п.); активная защита от медленно меняющихся влияющих величин путем их стабилизации (например, применение стабилизаторов питающего напряжения, термостатирование ответственных элементов); автоматическая коррекция систематических погрешностей (использование корректирующих обратных связей, уменьшающих динамические погрешности, введение термочувствительных цепей, компенсирующих влияние колебаний температуры на характеристики ТР в целом или составных его элементов, схемная компенсация влияния длины и траектории линий, соединяющих тензорезисторы, установленные на объекте контроля, с измерительной схемой, и др.).

*Стабильность* характеристик ТР во времени и при изменении условий работы определяется временными, температурными и интервалами других величин, в которых эти характеристики не выходят за допустимые пределы.

*Перегрузочная способность* определяется максимальным значением контролируемой входной величины и временем ее действия, при котором ТР не выходит из строя.

*Надежность* ТР, которые могут быть отнесены к восстанавливаемым объектам, определяется показателями безотказности, долговечности, ремонтпригодности и, в частности, характеризуется следующими показателями: средней наработкой на отказ  $T_0$ , измеряемой отношением наработки объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки;

средним сроком службы  $T_{сл}$ , т. е. математическим ожиданием календарной продолжительности от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода объекта в предельное состояние;

средним временем восстановления работоспособного состояния  $T_v$ .

В качестве характеристики безотказности тензорезисторов и других невосстанавливаемых элементов ТР целесообразно использовать интенсивность отказов  $\lambda(t)$ , представляющую условную плотность вероятности возникновения отказа, определяемую для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Для ТР возможны два типа отказов: несрабатывание при выполнении условий срабатывания и срабатывание при невыполнении условий срабатывания (ложное срабатывание). Отказы первого типа весьма опасны, особенно при использовании ТР в системах защиты, так как могут привести к полному выходу из строя и разрушению дорогостоящего защищаемого оборудования, вредному воздействию на обслуживающий персонал; отказы второго типа обычно не приводят к опасным последствиям, однако являются причинами неоправданных простоев, связанных с поисками причин ложного срабатывания. При определении  $T_0$  в первую очередь принимают во внимание отказы первого типа, а при определении  $T_v$  — отказы обоих типов.

Если для применения любых устройств с тензорезисторами (в том числе и ТР) в экспериментальных исследованиях требование надежности не является первостепенным, то для применения в промышленности, особенно в системах контроля процессов, сигнализации, обеспечения безопасности и безаварийности, это требование представляется определяющим.

В зависимости от конкретных условий применения к ТР предъявляют требования, определяющие чувствительность к контролируемому параметру, воспроизводимость значений параметров срабатывания, быстродействие, влияние на характеристики утомляемости и старения элементов, внешних факторов, обратное влияние на контролируемый объект, повторяемость характеристик, обеспечивающую возможность замены вышедших из строя элементов без существенной перестройки и без снижения точности срабатывания ТР, технологичность конструкции, обеспечивающую возможность использования стандартных и унифицированных элементов, удобство и простоту монтажа, настройки и обслуживания.

ТР могут иметь ряд преимуществ по сравнению с распространенными типами реле с механическими входными сигналами, например, реле на базе микровыключателей, потенциометрических датчиков, герконовых датчиков положения, бесконтактных индуктивных датчиков. К таким преимуществам следует отнести простоту, гибкость, высокую надежность (вероятность безот-



казной работы), большой срок службы, невысокую стоимость, низкую погрешность, высокую статическую и динамическую чувствительность, повышенное быстродействие, малые размеры и массу, незначительное обратное влияние на контролируемый объект, малое энергопотребление, способность долго сохранять высокие метрологические характеристики (без проверок и регулировок) в жестких условиях эксплуатации.

Действительно, вероятность безотказной работы для ТР с проводниковыми тензорезисторами (например, фольговыми типа КФ4 и КФ5), зависящая в основном от надежности последних, при деформациях порядка  $10^3$  мкм/м достигает 0,98 при  $10^5$  циклах деформирования, что значительно выше, чем для микровыключателей, реле с потенциометрическими датчиками и других. Сравнительно невысокая стоимость ТР обусловлена небольшой стоимостью тензорезисторов и в ряде случаев может быть доведена до нескольких рублей (стоимость реле с индуктивными и емкостными датчиками по крайней мере на порядок выше).

Порог чувствительности ТР деформаций и перемещений составляет десятки долей микрометра, в то время как для реле с потенциометрическими (реостатными) преобразователями — сотни микрометров, для реле с электроконтактными и емкостными преобразователями — десятки микрометров. Максимальная частота срабатывания ТР может достигать нескольких десятков килогерц, в то время как этот параметр для реле с электроконтактными и потенциометрическими преобразователями составляет единицы герц; значение достижимой точности работы в зависимости от частотного диапазона для ТР на порядок выше, чем для реле с индуктивными преобразователями.

Максимально достижимый гарантийный срок сохраняемости метрологических характеристик для тензорезисторных датчиков в несколько раз выше, чем для струнных, потенциометрических, индуктивных.

При использовании в ТР интегральных тензорезисторных датчиков (см. п. 3 гл. 1) дополнительно к многим из перечисленных достоинств добавляется технологическая совместимость с интегральными микросхемами обработки сигналов, потенциальная массовость производства, обеспечиваемая микроэлектронной технологией, причем интегральные датчики непрерывно совершенствуются, расширяются их функциональные возможности. Так, в последнее время возросло внимание к датчикам, изменяющим одновременно несколько параметров (например, положение, давление), причем сочетание воспринимаемых физических величин может быть самым разнообразным.

ТР могут иметь преимущества и по сравнению с традиционными тензорезисторными устройствами (в частности, с измерительными и управляющими аналоговыми приборами). ТР во многих случаях удастся выполнить более простыми и дешевыми за счет снижения требований к отдельным элементам. Так, для большинства случаев применения ТР не играет роли линейность характеристик датчиков и других элементов ТР, широта диапазона усиливаемых и преобразуемых сигналов.

Следует иметь в виду, что в каждом ТР реализация всего набора перечисленных достоинств, часто связанных с противоречивыми требованиями, невозможна, однако это и не всегда нужно при реализации конкретных задач.

К недостаткам ТР (так же как и других тензорезисторных приборов) следует отнести необходимость их градуировки непосредственно с рабочим датчиком. Если нет возможности провести такую градуировку и приходится градуировать другой аналогичный датчик из той же партии, то погрешность, обусловленная неидентичностью и качеством приклейки рабочих и градуируемых тензорезисторов может, быть 1 — 5 % даже при тщательной приклейке, а общая погрешность ТР (включая погрешность усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов) может достигать 10 — 15 %. При градуировке непосредственно рабочего датчика, а также при наличии возможности контроля параметров (чувствительности, нуля и др.) усилительно-преобразовательных элементов погрешность ТР может быть уменьшена до 0,2 — 0,5 % и ниже.

ТР целесообразно использовать практически во всех случаях контроля и управления механическими величинами, когда предъявляются высокие требования к надежности, быстродействию, чувствительности и точности реле при их доступности, простоте конструкции, минимальном обратном влиянии на контролируемый объект и возможности установки тензорезисторов непосредственно на элементы контролируемого объекта (или на легко встраиваемые в конструкцию объекта упругие элементы).

### 3. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

**Тензорезисторы.** В основе работы тензорезисторов лежит свойство некоторых проводниковых (металлических) и полупроводниковых материалов менять активное сопротивление при деформации за счет изменения геометрических размеров и

удельного сопротивления. Чувствительность к деформациям определяется по формуле

$$s_T = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\xi}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}, \quad (1)$$

где  $R, l$  — сопротивление и длина токопроводящего элемента тензорезистора;  $\Delta R, \Delta l$  — приращения сопротивления и длины под внешним воздействием;  $\xi = \Delta R / R$ ;  $\epsilon = \Delta l / l$  — относительная деформация;  $\mu, \rho, \Delta \rho$  — соответственно коэффициент Пуассона, удельное сопротивление тензочувствительного материала и приращение удельного сопротивления.

Наряду с чувствительностью важными характеристиками тензорезисторов, существенно влияющими на выбор их типов и определяющих свойств ТР (в частности, конструктивную и метрологическую надежность), являются статическая характеристика преобразования, механический гистерезис, ползучесть, функция влияния температуры на чувствительность, температурная характеристика сопротивления, дрейф выходного сигнала, относительная поперечная чувствительность, сопротивление изоляции в рабочей области значений температуры (ГОСТ 21616–76).

Характеристика преобразования тензорезистора в общем виде является нелинейной функцией:

$$R = R_0 e^{\epsilon s_T},$$

где  $R_0$  — исходное сопротивление тензорезистора;  $R$  — сопротивление тензорезистора под действием деформации [2].

В ТР для контроля напряженно-деформированного состояния конструкций используют серийные тензорезисторы для прочностной тензометрии. В ТР сил, масс, давлений и других, применяемых в промышленной автоматике, используют в основном тензорезисторы, выпускаемые для приборной тензометрии (например, фольговые тензорезисторы типа КФ5), а также специальные типы тензорезисторов, некоторые из которых упоминаются ниже.

Проводниковые тензорезисторы выполняют в виде решеток из тензочувствительной проволоки или фольги (чаще всего константановой) на бумажной, тканевой или лаковой (пленочной) основе. Их приклеивают непосредственно к контролируемому объекту или к упругому элементу, деформация которого является известной функцией контролируемого параметра.

Преимуществами фольговых тензорезисторов по сравнению с проволочными, являются: больший допустимый рабочий ток,

что снижает порог чувствительности ТР; возможность создания преобразователей разнообразных форм, приспособленных к виду деформации и конфигурации деталей, к которым их приклеивают.

Перспективной для ТР разновидностью проводниковых тензорезисторов являются тензорезисторы с тонкопленочными чувствительными элементами из различных тензочувствительных сплавов, которые наносятся, например, методом резистивного испарения на металлические подложки, предварительно покрытые изоляционным слоем. Достоинствами таких тензорезисторов являются возможность создания миниатюрных датчиков, исключение клея, наличие атомарной связи изоляционных и чувствительных элементов, приводящее к высокой стабильности характеристик [8].

Наряду с приклеиваемыми и тонкопленочными существуют неприклеиваемые проводниковые тензорезисторы, у которых тензочувствительная проволока наклеивается на изоляторы, закрепленные на взаимно перемещающихся при деформации элементах контролируемого объекта.

К специальным видам проводниковых тензорезисторов, применяемых в ТР, могут быть отнесены сигнализаторы появления и развития трещин и датчики усталостных повреждений. Сигнализаторы трещин представляют собой отрезки провода или узкие полоски фольги на изоляционной основе, которые приклеивают на элементы контролируемого объекта в районе концентраторов напряжений перпендикулярно к предполагаемому направлению распространения трещин. Когда трещина достигает места расположения сигнализатора, последний разрывается и обрыв его цепи используется для получения электрического сигнала. Если обычные проводниковые тензорезисторы используются в области деформаций, где статическая характеристика  $\xi(\epsilon)$  близка к линейной, то сигнализаторы трещин работают в областях, где эта характеристика может быть как линейной, так и релейной (см. рис. 2, а при  $x = \epsilon$ ,  $y = \xi$ ,  $y_0 > 0$ ,  $y_m = \infty$ ). Так, Киевское ПО "Веда" выпускает фольговые сигнализаторы, позволяющие регистрировать развитие трещин длиной от 0,1 до 200 мм как дискретно с шагом регистрации от 0,1 до 1 мм, так и непрерывно.

Датчик усталостных повреждений, аналогичный по форме и методике установки обычному фольговому тензорезистору, позволяет обнаруживать и исследовать скрытые повреждения в эксплуатирующейся или испытываемой конструкции по необратимому изменению удельного электросопротивления фольги, зависящему (при определенном режиме отжига фольги) от

числа циклов нагружения. Зависимость между изменением сопротивления  $\Delta R$ , достигающим 5 ... 10 Ом, и числом циклов нагружения  $N$  установлена экспериментально и имеет вид

$$\Delta R = 6,63 \cdot 10^{-5} (\epsilon - \epsilon_0) N^{0,4}, \text{ Ом,}$$

где  $\epsilon$  — изменяющаяся деформация;  $\epsilon_0$  — минимальная деформация, при которой происходит изменение сопротивления, равная  $(1,0 - 1,4) \cdot 10^3$  мкм/м.

Известны также датчики из графитовой нити, на базе композитных матриц и полупроводниковой пленки из (Bi Sb)Te и другие, обладающие на 2—3 порядка большей чувствительностью к деформациям, накопленным в процессе усталости, чем проводниковые тензорезисторы.

В НИКИМП (г. Москва) предложен комбинированный фольговый тензорезистор для одновременного контроля деформаций и усталостных разрушений, состоящий из секций, часть которых зашунтирована перемычками с концентраторами напряжений, имеющими заданные пределы усталости.

Проводниковые тензорезисторы имеют низкую чувствительность (для тензорезисторов из константана  $s_T = 2 \pm 0,2$ ); выходные сигналы измерительных схем с такими тензорезисторами не превышают обычно нескольких милливольт. Однако это не исключает их широкого применения, так как существуют достаточно дешевые и стабильные усилители и другие преобразователи малых сигналов.

Значительно большую чувствительность ( $s_T = 200$ ) при высоком уровне выходного сигнала (0,1 В и более) имеют полупроводниковые тензорезисторы на основе монокристаллов кремния, германия, карбида кремния, на элементах с  $P - N$ -переходом (известны тензотранзисторы и тензорезисторы, имеющие релейные характеристики), на выпрямляющих контактах металл—полупроводник. Свойства полупроводниковых тензорезисторов зависят от материала, способа изготовления, вида и количества примесей, ориентирования действия сил, направления тока относительно осей кристалла. Используя эти факторы, можно изготовить тензорезисторы с заданными свойствами.

Недостатками полупроводниковых тензорезисторов являются высокая чувствительность к внешним условиям (температуре, освещению и др.), значительный разброс характеристик. Если средняя погрешность преобразования по входу и выходу датчиков с проводниковыми тензорезисторами составляет 0,1 ... 0,2 % при наличии серийного выпуска датчиков класса 0,04 — 0,05, то

точность датчиков с полупроводниковыми тензорезисторами в большинстве случаев не превышает 0,5 ... 0,1 %.

Полупроводниковые тензорезисторы целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо создавать дешевые ТР на малые и особо малые значения входного параметра, ТР с датчиками высокой жесткости, датчиками в миниатюрном и микроминиатюрном исполнении, а также технологическими датчиками, для которых высокие метрологические характеристики не являются определяющими факторами, а важны надежность и долговременная стабильность.

Наряду с одиночными тензорезисторами изготавливают и мостовые тензорезисторные структуры (фольговые, тонкопленочные, полупроводниковые), конструктивно представляющие собой четыре тензорезистора, межсоединения, нормирующие резисторы и контактные площадки, монолитно объединенные в схему моста и изготовленные из одного материала.

Нормирующие резисторы представляют собой элементы из фольги или тонких пленок, закрепленные на подложках через слой изолятора и закрытые сверху защитной пленкой. Выполняют их из константана, меди, никеля и сплавов на основе этих материалов в виде магазинов, состоящих из отдельных последовательно соединенных секций с определенным сопротивлением каждая, зашунтированных шинами. В полупроводниковых структурах нормирующие резисторы могут быть интегрированы в кристалл, содержащий тензорезисторы, или нанесены на поверхность кристалла в виде тонких пленок. Регулируя нормирующие резисторы (с помощью луча лазера, скрайбирования шунтирующих шин, травления и т. д.), можно нормировать параметры датчиков, обеспечивая полную их взаимозаменяемость, что существенно упрощает процесс эксплуатации ТР, повышает их ремонтпригодность, особенно в условиях промышленного применения (за счет уменьшения  $T_B$ ).

Преимуществами датчиков на основе мостовых монолитных структур являются: более низкая (на 25 – 30 %) трудоемкость изготовления благодаря упрощению монтажа и повышенная (в 2 – 3 раза) надежность, обусловленная значительным уменьшением числа паяных соединений контактных узлов, с дефектами которых прямо или косвенно связано большинство отказов датчиков (вероятность выхода из строя мостовой структуры не больше, чем у отдельного тензорезистора), повышенная стабильность нуля и чувствительности, пониженная температурная погрешность нуля (для фольговых структур) за счет выполнения всех элементов схемы из одного участка фольги.

Тензорезисторы ТР, используемых в промышленной автома-

тике, для обеспечения надежной работы во многих случаях нуждаются в защите от внешних воздействий. С этой целью они могут монтироваться в существующих или специально выполненных углублениях или проточках упругих элементов; соединительные провода от тензорезисторов прокладываются в специально выполненных канавках или сверлениях и фиксируются скобками и (или) пластмассовой заливкой, применяются герметики, шитки из резины, фольги, теплоизоляция, многослойные покрытия и т. п.

Примером надежной защиты может служить многослойное покрытие, примененное при исследовании гидрогенераторов Киевской ГЭС. Это покрытие не имеет непосредственного контакта с решеткой тензорезистора. Первый его слой состоит из прокладки (фторопластовая пленка) и приклеиваемой к детали вне тензорезистора оболочки (калька, конденсаторная бумага); второй слой — основная защита — наносится на оболочку первого слоя и состоит из пластмассы на основе эпоксидных смол (для повышения прочности и жесткости может применяться армирование); третий слой из коррозионно-стойкого металла (фольга, фасонный кожух) обеспечивает гидроизоляцию второго слоя, повышает жесткость всего покрытия и в некоторых случаях экранирует электромагнитные помехи.

Существенное влияние на метрологические характеристики датчиков, а следовательно, и на точность работы ТР оказывает качество наклейки тензорезисторов, зависящее от толщины и сплошности слоя клея, его однородности, значений адгезии, ползучести, усталостной прочности, влагостойкости и др. С течением времени, как правило, все показатели качества наклейки ухудшаются, вследствие чего необходим его периодический контроль.

В эксплуатационных условиях качество наклейки тензорезисторов может контролироваться путем измерения сопротивления изоляции и разброса показаний одного и того же тензорезистора при неизменных условиях (у хорошо наклеенных тензорезисторов разброс не превышает 1 %), пропускания через тензорезистор импульсов тока и определения значения тестового повышения температуры тензорезистора, приводящего к соответствующему изменению его сопротивления, анализа отклонения экспоненциальной формы импульса отклика (изменения сопротивления) тензорезистора на импульс нагревающего тока. Последний метод позволяет обнаружить снижение чувствительности тензорезисторов на 3 — 5 %, прогнозировать еще не наступившее, но возможное ухудшение метрологических характеристик.

**Упругие элементы.** Упругие элементы в ТР служат для предварительного преобразования контролируемых величин в деформацию (т. е. в величины, которые могут быть преобразованы тензорезисторами в изменение электрического сопротивления), а также для расширения рабочего диапазона контролируемых деформаций. Чувствительность упругого элемента ТР

$$s_{y.э} = \Delta \epsilon_{ср} / \Delta x, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{ср}$  — деформация, воспринимаемая размещенным на упругом элементе тензорезистором и осредненная по его длине (базе);  $x$  — входная величина.

Выбор конструкции и материала упругого элемента определяется характером и диапазоном изменений контролируемой величины, конструктивными и эксплуатационными особенностями объекта контроля, допустимой погрешностью. К материалам упругих элементов ТР предъявляется комплекс многообразных, часто противоречивых требований. Во многих случаях он должен обладать хорошими упругими свойствами, достаточной прочностью и выносливостью, малым гистерезисом и последействием, технологичностью, стабильностью характеристик во времени и в условиях переменной температуры [3, 7, 10].

При изготовлении полупроводниковых упругих элементов перспективно использование современных технологических процессов полупроводниковой техники (диффузионного, автоэпитаксиального и гетероэпитаксиального), позволяющих получать упругий элемент вместе с тензорезисторами (тензомодуль) как одно целое без применения клеев, обуславливающих погрешности из-за упругих несовершенств (диффузионные, авто- и гетероэпитаксиальные тензорезисторы называют интегральными). В зависимости от назначения тензомодули изготавливают в виде балок, столбиков, мембран и др. Известны тензомодули подобного типа, снабженные вторичными преобразователями, например, усилителями, выполненными в едином технологическом цикле с тензочувствительной схемой.

В ТР используются упругие элементы как с непрерывной (линейной или нелинейной) статической характеристикой  $\epsilon_{ср}(x)$ , например, балочки, скобы, мембраны и др., так и с релейными характеристиками. Примерами последних являются элементы в виде балочки с подвижным толкателем, кинематическая связь которого с объектом контроля имеет зазор регулируемого значения или выполнена в виде рычажно-пружинной системы опрокидывающего действия, элементы с различными



упорами и ограничителями, скачком меняющими жесткость конструкции при достижении нагрузки определенного значения.

**Измерительные схемы.** В измерительных схемах изменения сопротивления тензорезисторов преобразуются в изменения электрического тока, напряжения, частоты или кодового сигнала. Одновременно измерительные схемы во многих случаях позволяют суммировать относительные изменения сопротивлений нескольких тензорезисторов датчика, исключать (или ослаблять) влияние температуры и некоторых других факторов внешней среды на выходной сигнал датчика.

Чувствительность измерительных схем в зависимости от характера осуществляемых преобразований определяется одним из следующих выражений:

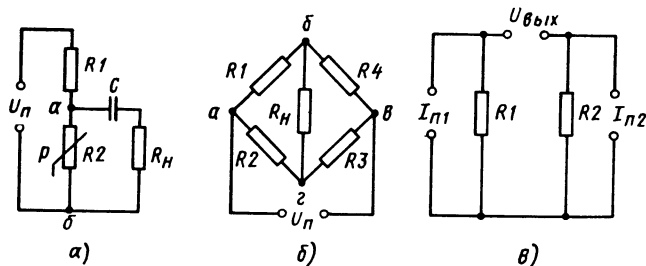
$$s_{ис}(I) = \frac{\Delta I}{\Delta R/R}; s_{ис}(u) = \frac{\Delta u}{\Delta R/R}; s_{ис}(f) = \frac{\Delta f}{\Delta R/R}, \quad (3)$$

где  $\Delta R/R$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора;  $\Delta I$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta f$  – соответственно изменения тока, напряжения, частоты выходного сигнала.

Наибольшее распространение в ТР, так же как и в тензорезисторных устройствах других типов, получили потенциометрические (делители напряжения) и мостовые измерительные схемы [9, 10].

На рис. 3, а приведена типовая потенциометрическая схема. Последовательно включенные пассивный резистор  $R1$  и тензорезистор  $R2$  питаются от источника постоянного тока с напряжением  $U_{\Pi}$ . При  $R_2 \ll R_{\Pi}$  напряжение между точками а и б

$$u_{\Pi} = U_{\Pi} \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_2} = U_{\Pi} \frac{1 + \Delta R_2/R_2}{1 + R_1/R_2 + \Delta R_2/R_2}. \quad (4)$$



**Рис. 3. Измерительные схемы ТР:**

а – потенциометрическая; б – мостовая; в – с питанием от источников тока

Максимальная чувствительность схемы достигается при  $R_1 = R_2$ .

Разлагая при  $R_1 = R_2 = R$  в ряд по степеням  $\Delta R/R$  соотношение (4) и пренебрегая членами разложения, содержащими  $\Delta R/R = s_T \epsilon$  в квадрате и более высоких степенях, получим:

$$u_n \approx \frac{u_p}{2} + \frac{u_p}{4} s_T \epsilon. \quad (5)$$

Если в обоих плечах делителя – активные тензорезисторы, причем изменения их сопротивлений в результате деформации равны по величине и противоположны по знаку, то второе слагаемое в формуле (5) удваивается.

Недостатком рассмотренной потенциметрической схемы является наличие на ее выходе значительной постоянной составляющей, затрудняющей непосредственное измерение малых изменений напряжений. Поэтому измерение обычно проводится лишь после исключения постоянной составляющей с помощью разделительного конденсатора  $C$  (при контроле динамических процессов), не пропускающего, в частности, медленно меняющиеся сигналы, обусловленные влиянием температуры на характеристики тензорезисторов, или путем компенсации постоянной составляющей напряжением смещения от дополнительного источника, включенного последовательно с нагрузкой  $R_n$  при обратной полярности к источнику питания схемы (при контроле статических процессов).

Более совершенным для измерения малых изменений сопротивления являются мостовые схемы (рис. 3, б). Работают они на постоянном и переменном токе. Питание моста осуществляется от источника, который присоединяют к точкам  $a$  и  $e$  (диагональ питания); к измерительной диагонали (точки  $b$  и  $z$ ) подключается нагрузка моста. Тензорезисторы могут включаться в одно, два смежных или во все четыре плеча. Если все включаемые в мост тензорезисторы активные, то изменения сопротивлений тензорезисторов в смежных плечах должны быть противоположными по знаку при положительных и отрицательных деформациях. Сочетая полупроводниковые тензорезисторы  $P$ - и  $N$ -типов, можно получить мост с двумя или четырьмя активными плечами при деформациях одного знака. Использование двух или четырех активных тензорезисторов увеличивает чувствительность датчика теоретически в 2 или 4 раза соответственно; кроме того, при этом происходит непосредственная (прямая) температурная его компенсация. Прямая температурная компенсация в связи с разбросом значений сопротивлений, температур-

ных коэффициентов сопротивлений и чувствительности (ТКС и ТКЧ) у тензорезисторов, особенно у полупроводниковых, не всегда обеспечивает допустимую температурную погрешность датчика. Поэтому во многих случаях приходится использовать схемную температурную компенсацию (см. п. 4 гл. 1).

Для падения напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_H$  в измерительной диагонали неуровновешенного моста постоянного тока

$$u_H = I_H R_H = \frac{U_{\Pi} (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) / R_H + \dots \rightarrow \dots \rightarrow + R_3 R_4 (R_1 + R_2) / R_H}, \quad (6)$$

где  $I_H$  — ток в измерительной диагонали.

При  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  мост сбалансирован, и в соответствии с (6) разность потенциалов в измерительной диагонали  $u_H = 0$ .

Если в предварительно сбалансированной схеме (см. рис. 3, б) при  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  и  $R_H \gg R$  сопротивление в одном, двух ("схема полумоста") или четырех ("схема полного моста") плечах изменится на  $\Delta R \ll R$ , причем изменения сопротивлений в смежных плечах имеют противоположные знаки, то напряжение сигнала на выходе моста станет равным (с погрешностью, не превышающей 1 % для металлических тензорезисторов):

$$\Delta u = \frac{N u_H}{4} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{N u_H}{4} s_T \epsilon, \quad (7)$$

где  $N$  — число активных тензорезисторов.

При использовании полупроводниковых тензорезисторов большие изменения сопротивления нарушают линейность зависимости  $\Delta u(\epsilon)$ .

В ТР используются как уравновешенные, так и неуровновешенные мостовые схемы. В первых (используемых для ТР с компенсационными датчиками) разбаланс, вызванный изменением сопротивлений тензорезисторов, уравнивается (компенсируется) калиброванным изменением прецизионных сопротивлений других плеч, перемещением движка реохорда, вводимого между плечами моста (см.  $R_6$  на рис. 4, а; резистор  $R_5$  служит для регулирования чувствительности), регулированием вспомогательного источника тока и т. п. Мерой контролируемой величины являются параметры компенсирующего воздействия. Применимы в ТР и цифровые уравновешенные

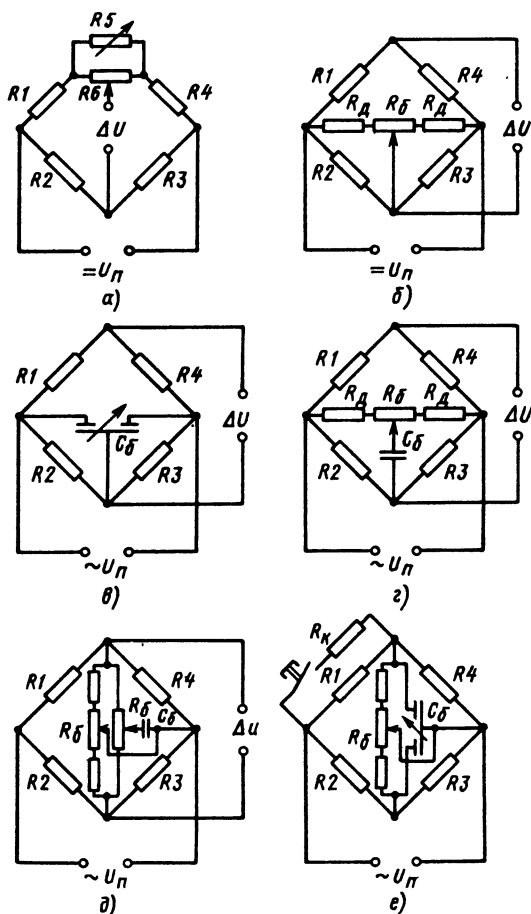


Рис. 4. Схемы уравнивания тензорезисторных мостов

измерительные мосты. Их особенность заключается в том, что прецизионный уравнивающий резистор разделен на ступени, причем установка ступени, отвечающей состоянию компенсации (соответствующим образом закодированная), образует цифровую выходную величину.

Уравновешенные мосты пригодны для ТР, контролирующих статические процессы, когда за время уравнивания процесс существенно не изменится.

В неуравновешенных мостах, используемых в ТР для датчиков с прямым преобразованием или датчиков сравнения в

неравновесном режиме, изменение сопротивления тензорезисторов контролируется по значению разбаланса. Для начальной балансировки и регулировки чувствительности практические схемы мостов имеют регулируемые резисторы (рис. 4, б). Неуравновешенные мосты применимы в ТР, используемых для контроля как статических, так и динамических процессов.

При питании моста переменным током активные сопротивления в плечах моста (см. рис. 3, а) необходимо заменить комплексными сопротивлениями  $z = R + jX$ , где  $R$  – активное сопротивление;  $X$  – реактивное сопротивление. Реактивная составляющая разбаланса моста появляется как результат реактивной асимметрии элементов моста (например, емкость решетки приклеенного тензорезистора составляет несколько десятков пикофарад), влияния паразитных емкостей и емкостей асимметрии соединительных линий.

Равновесие моста достигается при выполнении условия  $z_1 z_3 = z_2 z_4$ .

Для уравнивания активной и реактивной составляющих разбаланса мостов используют регулируемые резисторы и конденсаторы (см.  $R_6$  и  $C_6$  на рис. 4, в – е).

Резистором  $R_K$  вводится искусственный калибровочный разбаланс моста, используемый для проверки и регулирования подключаемых к его выходу элементов ТР, в частности, усилителей.

Линейностью зависимости выходного сигнала от изменения сопротивления, повышенной чувствительностью, уменьшенной температурной погрешностью отличаются измерительные схемы полупроводниковых тензорезисторов, использующие источники тока (см. рис. 3, в). Если начальная настройка схемы обеспечивает выполнение условия  $u_{вых} = I_{п1} R_1 - I_{п2} R_2 = 0$ , то в случае использования одного активного тензорезистора

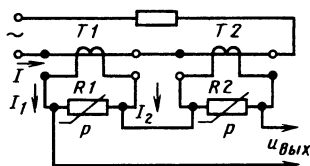
$$\begin{aligned} I_{п1} R_1 &= I_{п2} R_2 \text{ и } u_{вых} = I_{п1} (R_1 + \Delta R_1) - I_{п2} R_2 = \\ &= I_{п1} (R_1 + \Delta R_1) - I_{п1} R_1 = I_{п1} \Delta R_1 = s_T \epsilon R_1 I_{п1}. \end{aligned}$$

Разновидностью схемы, приведенной на рис. 3, в, являются дифференциальные измерительные схемы на трансформаторах тока. Для дифференциальной схемы переменного тока (рис. 5) выходное напряжение

$$u_{вых} = I_1 R_1 - I_2 R_2 = I(k_{тp1} R_1 - k_{тp2} R_2),$$

где  $I$  – первичный ток трансформаторов  $T1, T2$ ;  $I_1, I_2$  – вторичный ток трансформаторов,  $k_{тp1}, k_{тp2}$  – коэффициенты трансформации.

Рис. 5. Дифференциальная измерительная схема на трансформаторах тока



Дифференциальная схема постоянного тока отличается от приведенной на рис. 5 подключением тензорезисторов к вторичным обмоткам трансформаторов  $T1$ ,  $T2$  через выпрямители. Точность схемы обеспечивается при высокой идентичности коэффициентов  $k_{\text{тр}1}$  и  $k_{\text{тр}2}$ .

В измерительных схемах, преобразующих изменения сопротивления полупроводниковых тензорезисторов и датчиков усталостных повреждений в изменения частоты, достигаются высокая помехоустойчивость (так как нет потерь информации, связанных с ослаблением сигналов низкого уровня), удобство согласования с цифровыми и микропроцессорными устройствами обработки информации. Одни из вариантов подобной схемы — это автогенератор на базе частотно-зависимого моста (рис. 6, а) [5]. Частота сигнала на выходе такой схемы

$$f = 1 / (2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}). \quad (8)$$

При создании высокоточных ТР, к быстрдействию которых не предъявляются высокие требования, целесообразно при-

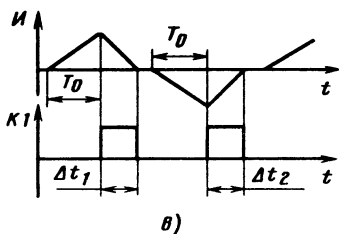
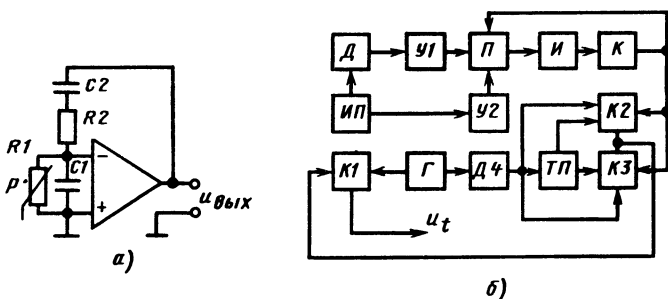


Рис. 6. Измерительные схемы с преобразованием сигналов датчика в частотный и кодовый сигналы

менять измерительные схемы с преобразователями сигнала датчика в кодовый сигнал, например, использующие метод двойного интегрирования (рис. 6, б) [11].

Сигнал датчика  $D$  усиливается нормирующим усилителем  $У1$  и в течение стабильного интервала времени  $T_0$  (рис. 6, в) подается через переключатель  $П$  на вход интегратора  $И$ . По окончании интервала  $T_0$  на вход  $И$  подключается опорное напряжение противоположной полярности с выхода нормирующего усилителя  $У2$ , в результате чего напряжение на выходе  $И$  уменьшается до нуля. Нулевое состояние фиксируется компаратором  $К$ , отключающим опорное напряжение. В следующем полупериоде напряжение источника питания  $ИП$  датчика меняет знак на противоположный. Если в первом полупериоде температурный и временной дрейфы напряжений датчика и усилителей  $У1$  и  $У2$  приводили к увеличению времени  $\Delta t_1$ , то во втором полупериоде эти дрейфы уменьшают время  $\Delta t_2$ .

Время включения опорного напряжения пропорционально коэффициенту передачи датчика  $k_d = u_{вых}/u_{п}$ , где  $u_{вых}$  и  $u_{п}$  — напряжения выходного сигнала и питания датчика. При этом для  $n$  полупериодов суммарное время

$$t = \frac{s_{y1}}{s_{y2}} T_0 \sum_{i=1}^n \left[ k_{di} + \frac{(-1)^i u_{дри}}{u_{пi}} \right],$$

где  $u_{дри}$  — напряжение дрейфа усилителей  $У$ , приведенное к их входу;  $s_{y1}$ ,  $s_{y2}$  — коэффициенты усиления усилителей  $У1$  и  $У2$ .

Таким образом, две следующие друг за другом число-импульсные посылки содержат информацию о коэффициенте  $k_d$  без влияния дрейфа. Измерение  $k_d$  осуществляется благодаря использованию одного источника как для питания датчика, так и для формирования опорного напряжения, в результате чего нестабильность источника питания не влияет на погрешность преобразования, а сказывается только на разрешающей способности и чувствительности канала измерения. Погрешность измерения, определяемая влиянием на входную цепь усилителя  $У1$  помех сети, ослабляется выбором времени интегрирования  $T_0$ , равным периоду помех. Для получения сигнала  $u_t$ , пропорционального  $t$ , в схеме, показанной на рис. 6, б, предусмотрены генератор заполняющей частоты  $\Gamma$ , делитель частоты  $ДЧ$ , триггер полярности  $ТП$ , ключевые схемы  $К1 - К3$ . Основная погрешность схемы  $\pm 0,1\%$ , дополнительная погрешность — на  $10^\circ\text{C}$   $\pm 0,05\%$ .

В измерительных схемах с преобразованием сигналов тензорезисторных датчиков в частоту или код получили применение серийно выпускаемые промышленностью интегральные микросхемы типа КР1108ПП1, К1113ПВ1, К522ПВ1, К522ПВ2, а также гибридные микросборки Ярославского НПО "Электронприбор" и НИКИПМ типов М099ЕН1, М0101УТ1, М0100ПП1.

**Задатчики и программные устройства.** Задатчики служат для установки значения контролируемого параметра, при котором должно сработать ТР. Уровень срабатывания может быть постоянным или меняющимся по определенному закону (программе).

Выбор типа задатчика зависит от характера контролируемого параметра, конструктивных особенностей ТР, в том числе от вида и диапазона изменений сигнала измерительного тракта ТР, направляемого в схему сравнения. Так, если сравнение текущего значения контролируемого параметра и заданного уровня срабатывания ТР проводится непосредственно в измерительной схеме ТР, то применяют задатчики в виде реохордов или тензорезисторов, наклеиваемых на элемент, деформацию которого можно регулировать при настройке ТР. Если же сравнение проводится на выходе измерительной схемы после преобразования изменений сопротивления тензорезисторов в изменение тока, напряжения или частоты электрического сигнала и после предварительного усиления сигнала, то задатчиками могут служить резисторные делители напряжений, автотрансформаторы, источники опорного напряжения, стабилитроны. В последнем случае тип и число последовательно включаемых стабилитронов выбирают так, чтобы превышение уровня стабилизации происходило при достижении заданного значения напряжения, соответствующего параметру срабатывания ТР. При этом обеспечивается минимальное потребление энергии в режиме, когда контролируемый параметр меньше уровня срабатывания и ток через стабилитроны практически не протекает.

Заданный уровень срабатывания ТР устанавливается перемещением органа настройки задатчика, переключением элементов с фиксированной настройкой вручную или автоматически по сигналам датчиков ведущего параметра контролируемого процесса или программного устройства.

В задатчике ТР для системы следящего управления (рис. 7), который применяется в стенде нагружения закрылка самолета силами, изменяющимися в функции угла его отклонения, при ресурсных испытаниях носителем зависимости уровня срабатывания ТР силы от угла отклонения закрылка  $\alpha_{зк}$ , выполняющей роль ведущего параметра и определяющего значение прикла-



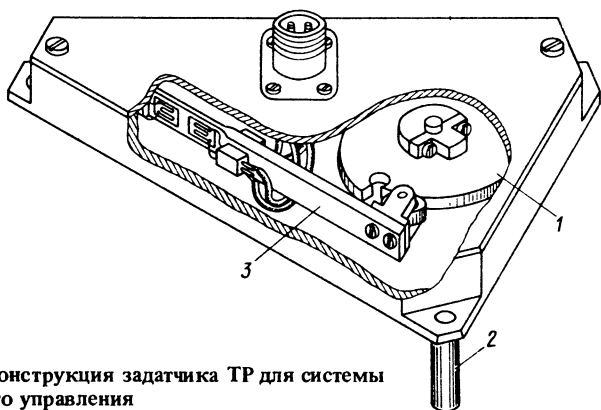


Рис. 7. Конструкция задатчика ТР для системы следящего управления

дываемой силы, является профильный кулачок 1 (рис. 7). Приводом носителя служит механизм отклонения закрылка, связываемый с кулачком осью 2; ось 2 выполняет роль датчика ведущего параметра  $\alpha_{зк}$  (А.с. 183448 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01M 7/00). Элементом настройки задатчика является мост из четырех тензорезисторов, наклеенных на консольную стальную балочку 3.

Для программного управления ТР используют задатчики на базе функциональных потенциометров, движки которых перемещаются с постоянной скоростью, задатчики с фотоэлектрической следящей системой для реализации программ, задаваемых в виде рисованных графиков, многоцепные реле времени, счетно-импульсные устройства, выполненные, например, на базе микроЭВМ, и др. Задатчики ТР для систем программного управления со ступенчатым изменением контролируемых параметров представляют собой наборы переменных резисторов или других элементов с фиксированной настройкой, включаемых поочередно на соответствующих этапах программы.

**Схемы сравнения.** Схемы сравнения формируют сигналы управления выходными (исполнительными) элементами ТР в зависимости от величины и знака разности  $\Delta x$  текущего значения контролируемого параметра  $x$  и уставки задатчика  $x_{зд} = x_0$ . В соответствии с назначением схемы сравнения содержат входное устройство, осуществляющее образование разности  $\Delta x = x - x_{зд}$ , и выходной элемент (нуль-индикатор), формирующий сигнал управления.

Для получения разности  $\Delta x$  используют мостовые и потенциометрические схемы, активные и пассивные сумматоры напряжений разных типов. Если величины  $x$  и  $x_{зд}$  сравнивают путем

сопоставления сопротивлений тензорезисторов датчика и тензорезисторов (или точных резисторов) задатчика, то для определения  $\Delta x$  можно использовать непосредственно измерительную схему ТР, например, мост. В качестве нуль-индикаторов применяют разнообразные релейные элементы: электромеханические реле, схемы на кремниевых стабилитронах, тиристорах, туннельных диодах, триггеры, диодные, транзисторные, оптоэлектронные ключи и т. д. К нуль-индикатору нужно подводить сигналы определенного уровня, поэтому в ряде случаев требуется предварительно усилить сигналы  $x$  или  $\Delta x$ .

На рис. 8 показано несколько разновидностей схем сравнения ТР.

В первой схеме (рис. 8, а) тензорезисторные мосты задатчика  $B_{зд}$  и датчика  $B_{д}$  включены последовательно встречно (противофазно). Разность напряжений, снимаемых с диагоналей мостов, после предварительного усиления направляется в цепь управления поляризованного (фазочувствительного) реле  $P$ . Аналогично построена схема (рис. 8, б), где используется датчик с тензорезисторным мостом  $B_{д}$  и задатчик с реохордом  $R_{зд}$  (резистор  $R_{чв}$  служит для настройки чувствительности моста задатчика).

В отличие от схем, показанных на рис. 8, а, б, где сравниваются сопротивления, в схеме, приведенной на рис. 8, в, сравниваются напряжения.

В двухуровневом компараторе (рис. 8, г) на выходе появляется сигнал, соответствующий логической единице, если входной сигнал  $u_x$  выходит за пределы  $u_{зд}$ , определяемые делителем напряжения  $R1 - R3$ . Для многопороговых ТР в качестве схем сравнения можно использовать многоуровневые детекторы аналоговых сигналов, например, на базе компараторов и источника опорных сигналов нескольких уровней.

В другой схеме (рис. 8, д) разность сравниваемых напряжений поступает на вход нуль-индикатора, выполненного в виде трехпозиционного реле на транзисторах  $VT1 - VT4$ . Если  $u_x \neq u_{зд}$ , то в зависимости от знака разности  $u_x - u_{зд}$  через один из выходных резисторов  $R1, R2$  протекает ток.

Простейшая схема вычитания близких частот строится на основе тактируемого фронтом  $D$ -триггера. Сформированные в виде меандров импульсы вычитаемых частот  $f_x$  и  $f_{зд}$  подаются соответственно на входы  $C$  и  $D$  такого триггера (рис. 8, е). Вследствие постепенного изменения сдвига фаз между этими импульсными последовательностями тактирующие фронты импульсов на входе  $C$  совпадают попеременно то с положительными полупериодами импульсов на входе  $D$ , то с отрицательными.

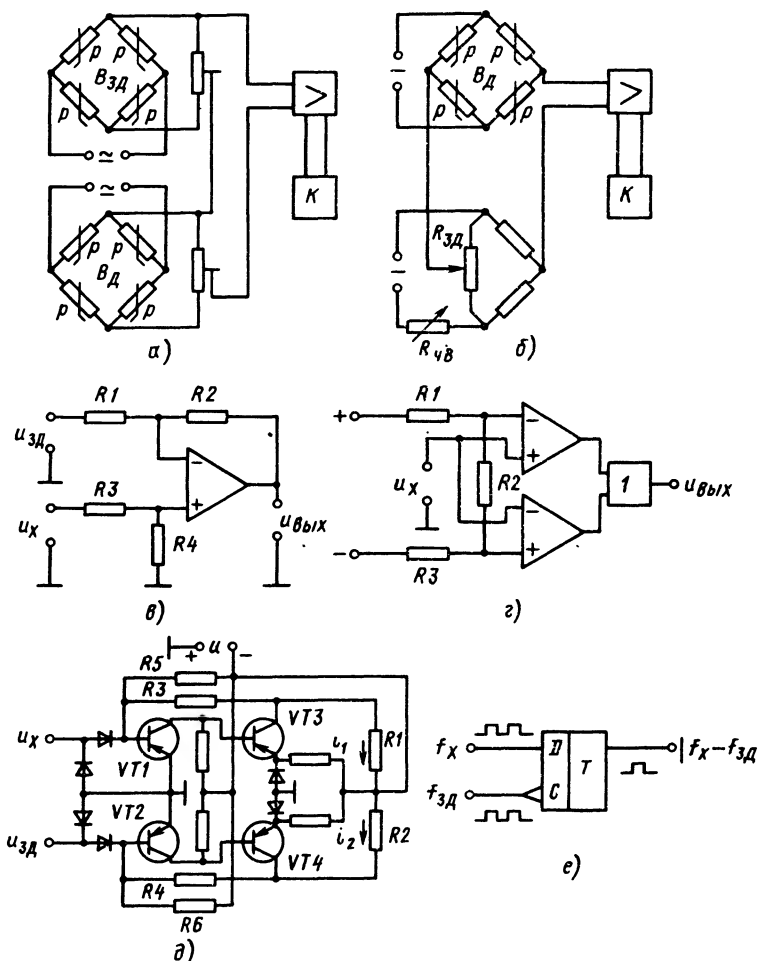


Рис. 8. Схемы сравнений ТР:

а, б – сопротивлений; в – д – напряжений; е – частот

ми полупериодами этих импульсов. В результате на выходе триггера генерируются импульсы с частотой, равной абсолютному значению разности сравниваемых частот.

В ТР с цифровыми уравновешенными мостами следует использовать устройства сравнения величин в цифровом коде (например, на базе микросхем типа 134СП1, представляющих собой 4-разрядные схемы сравнения в интегральном исполнении и осу-

щественных одновременное сопоставление всех разрядов по логике равно—больше—меньше).

**Усилители.** В ТР усилению подвергаются сигналы датчика  $x$  или схемы, определяющей разностный сигнал  $\Delta x$ , если их мощность недостаточна для воздействия на нуль-индикатор, а также сигнал нуль-индикатора, если его мощность мала для приведения в действие исполнительных органов.

Чувствительность (коэффициент усиления) усилителя определяется одним из следующих выражений:

$$s_y(u) = \frac{\Delta u_{\text{вых}}}{\Delta u_{\text{вх}}} ; s_y(I) = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} ; s_y(p) = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}} , \quad (9)$$

где  $\Delta u_{\text{вх}}$ ,  $\Delta I_{\text{вх}}$ ,  $\Delta P_{\text{вх}}$ ,  $\Delta u_{\text{вых}}$ ,  $\Delta I_{\text{вых}}$ ,  $\Delta P_{\text{вых}}$  — соответственно изменения напряжения, тока, мощности входного и выходного сигналов.

К усилителям сигналов датчика, называемых измерительными, предъявляются повышенные требования в отношении точности преобразования, стабильности характеристик, помехозащищенности и других параметров, влияющих на погрешность ТР.

Простотой структуры, возможностью встраивания непосредственно в датчик, отсутствием необходимости уравнивания измерительного моста по переменной составляющей, большой перегрузочной способностью отличаются усилители постоянного тока. Так весьма перспективными представляются дифференциальные усилители постоянного тока с балансными каскадами на входе. Использование во входных цепях таких усилителей высокостабильных планарных транзисторов, интегральных схем и т. п. позволяет довести стабильность нуля до необходимого уровня. В качестве примера на рис. 9 представлена схема включения измерительного моста с активным ( $R1$ ) и компенсационным ( $R2$ ) тензорезисторами на входе усилителя постоянного тока на базе операционного усилителя в интегральном исполнении. Резистором  $R3$  уравнивают мост при отсутствии деформации. Питание моста осуществляется от стабильного источника постоянного тока через ограничительный резистор  $R4$ . Для защиты входной цепи от возможного пробоя при повреждении тензорезисторов применены диоды  $VD1$  и  $VD2$ . Для регулирования усиления служит резистор  $R5$ . Для повышения устойчивости усилителя введена емкость  $C$ . Вводя дополнительную положительную обратную связь, охватывающую операционный усилитель, можно скорректировать нелинейность, присущую неравновесному мосту, и нелинейность тензорезисторов. Для сохране-

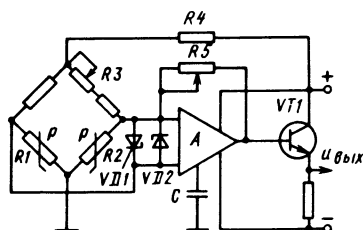


Рис. 9. Схема усилителя постоянного тока на базе операционного усилителя

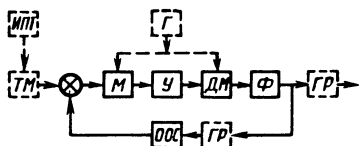


Рис. 10. Схема измерительного усилителя, использующего принцип "модуляция – демодуляция"

ния работоспособности усилителя при случайном замыкании выходной клеммы предназначен транзистор  $VT1$ . Дрейф нуля схемы составляет 1 ... 2 %.

Высокой стабильностью обладают измерительные усилители постоянного тока, в которых предусматривается преобразование (рис. 10) сигнала постоянного тока от тензорезисторного измерительного моста  $ТМ$ , получающего питание от источника постоянного тока  $ИПТ$ , в сигнал переменного тока по структуре модулятор  $М$  – усилитель переменного тока  $У$  – демодулятор  $ДМ$  (МДМ-усиление или усиление на несущей частоте). Усилители переменного тока не имеют дрейфа нуля, а дрейфы модулятора и демодулятора малы. Управление модулятором и демодулятором осуществляется от сети переменного тока. Однако при таком управлении усилитель чувствителен к наводкам с частотой сети, и его быстродействие, ограниченное частотой модуляции (несущей частотой), низко. Поэтому иногда в измерительный усилитель встраивают генератор  $Г$ , частота которого отличается от частоты сети, а в быстродействующих усилителях значительно больше ее. Пульсации сигнала после демодуляции сглаживаются фильтром  $Ф$ . Для повышения помехоустойчивости усилителя на его выходе или в цепи обратной связи включают устройство гальванического разделения  $ГР$  входных и выходных цепей. По приведенной схеме, в частности, выполнены усилители типа 909ПА, 1925ПА-10М, Ф7024, Ф7025, Ф7028, Ф7029, Ш74. У них основная погрешность составляет 0,05 ... 0,15 % на различных пределах входного сигнала.

При использовании измерительных МДМ-усилителей для усиления сигналов, в которых наряду с постоянной имеется и динамическая составляющая, частота модуляции должна быть в 5 – 8 раз выше частоты динамической составляющей

(при выборе частоты следует иметь в виду, что с увеличением частоты растет влияние линии, соединяющей датчик с усилителем).

В случаях, когда контролируемый процесс не содержит постоянной составляющей или она должна быть исключена, целесообразно применять усилители переменного тока с необходимыми полосой частот и мощностью выхода.

В одной из распространенных в тензорезисторных приборах разновидности усилителя переменного тока (рис. 11) используется входной трансформатор, который обеспечивает согласование малого сопротивления тензорезисторов с большим входным сопротивлением усилителя и позволяет повысить отношение полезного сигнала к помехе. Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  уменьшают ослабление сигнала на выходе каскада за счет сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$ .

Для согласования выхода усилителей переменного тока с низкоомной нагрузкой (например, обмоткой выходного исполнительного реле) применяют трансформаторные выходные каскады или балансные каскады на мощных транзисторах.

В отличие от измерительных усилителей к усилителям разностного сигнала  $\Delta x$  требование стабильности усиления практически не предъявляется, если в наиболее неблагоприятных условиях обеспечивается включение исполнительных органов при выполнении условия срабатывания ТР. Для усилителя разностного сигнала обычно достаточен малый рабочий диапазон выходного сигнала, определяемый зоной срабатывания нуля-индикатора или исполнительного органа; важно только, чтобы этому сигналу соответствовало возможно меньшее значение  $\Delta x$ . Условиям применения в качестве усилителей разностного сигнала ТР соответствуют, в частности, усилители с релейной статической характеристикой, в которых сравнительно простыми средствами обеспечиваются большое усиление, низкий порог чувствительности, малые постоянные времени и значительные выходные мощности. Для усиления разностного сигнала в ТР могут использоваться электромеханические (на электромагнитных и магнитоэлектрических реле), электронно-ламповые, транзисторные, тиристорные, фотоэлектрические, магнитные усилители.

**Исполнительные органы.** Исполнительными органами ТР могут служить электромеханические и электронные реле (в том числе различные ключи, триггеры, схемы с тиристорами и т. п.), электроизмерительные приборы (милли- и микроамперметры, милливольтметры и др.) и автоматические компенсаторы (типа КСТ3, КСТ4) с встроенными электро- и свето-

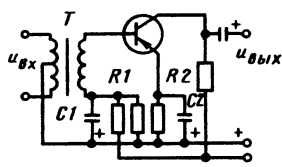
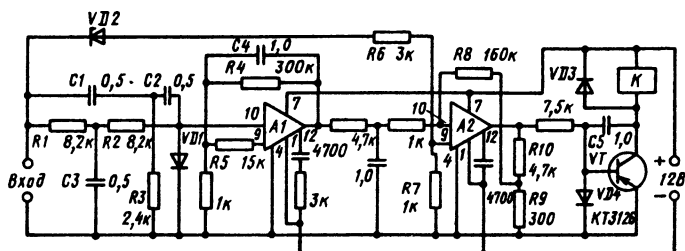


Рис. 11. Схема усилителя переменного тока с входным трансформатором

Рис. 12. Схема включения исполнительного электромагнитного реле



контактными (фоторелейными) преобразователями положения указателя, магнитные пускатели и контакторы; электромагнитные муфты, клапаны и задвижки с электромагнитным приводом, электрогидравлические усилители мощности и др.

Исполнительное электромагнитное реле в ТР часто включается (рис. 12) через промежуточное электронное реле, снабженное предварительным усилителем разностного сигнала  $\Delta x$ . На входе усилителя включен запирающий фильтр на элементах  $R1 - R3$ ,  $C1 - C3$ , настроенный на основную гармонику помехи (50 Гц). На микросхеме  $A1$  (типа К140УД1Б) собран усилитель-интегратор с цепью отрицательной обратной связи  $R4 C4$ . Второй каскад выполнен на микросхеме  $A2$  (также типа К140УД1Б) и работает в триггерном режиме благодаря цепи положительной обратной связи на резисторах  $R8 - R10$ . Транзистор  $VT$  (КТ312Б) служит для согласования  $A2$  с нагрузкой — исполнительным реле  $K$  с магнитоуправляемыми контактами. Цепь  $VD3 - C5$  предназначена для устранения "дребезга" якоря реле, диоды  $VD1$  и  $VD4$  — для ограничения уровней входных сигналов. Цепь  $VD2 - R6 - R7$  защищает вход усилителя от повышенных напряжений, вызванных обрывами во входных цепях.

В качестве исполнительных целесообразно использовать электромеханические реле с встроенными многофункциональными интегральными схемами, удобными для согласования с усилительно-преобразовательными элементами ТР.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

Проектированию ТР предшествует определение основных технических требований, таких, как конкретное назначение в системе контроля или управления, допустимые пределы и характер изменения контролируемых параметров, необходимая точность, допустимые размеры и масса, условия эксплуатации (температура, давление, влажность, механические воздействия, срок службы, надежность, стабильность).

В соответствии с требованиями к точности выбирается структурная схема ТР. При этом следует иметь в виду, что в большинстве случаев удовлетворительные характеристики могут быть получены в ТР с датчиками, использующими последовательное преобразование или сравнение в неравновесном режиме. ТР с компенсационными датчиками более сложны, имеют низкое быстродействие. Их применение оправдано в случаях, когда необходима повышенная точность контроля низкочастотных процессов, особенно если контролируемый объект снабжен информационно-измерительной системой с тензометрическими компенсационными приборами и удастся сделать общими для этих приборов и ТР элементы устройств автоматической компенсации.

ТР представляет собой систему многоступенчатого преобразования контролируемой величины  $x$  в выходной электрический сигнал. Чувствительность типового ТР с последовательным преобразованием

$$s_{\text{ТР}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = s_{y.z} s_{\text{Т}} s_{\text{и.с}} s_y, \quad (10)$$

где  $s_{y.z}$ ,  $s_{\text{Т}}$ ,  $s_{\text{и.с}}$ ,  $s_y$  — соответственно чувствительность упругого элемента, тензорезисторов, измерительной схемы и усилительно-преобразовательных элементов, определяемая из формул (2), (1), (3) и (9).

Функция преобразования в данном случае при использовании среднего значения чувствительности имеет вид

$$y = s_{\text{ТР}} x.$$

В ТР с датчиком уравнивающего преобразования имеются цепи прямого и обратного преобразования. Последняя включает в себя обратный преобразователь с чувствительностью  $\beta$  и может в общем случае состоять из нескольких преоб-



разователей в цепи прямого преобразования. Эта цепь обеспечивает преобразование выходной величины цепи прямого преобразования в однородную с входной величиной. Функция преобразования такого датчика

$$y = \frac{s_{\text{пр}} s_0}{1 + s_0 \beta} x = s_{\text{пр}} s_{\text{ур}} x = s_{\text{тр}} x,$$

где  $s_0 = s_2 s_3 \dots s_i$  — чувствительность цепи прямого преобразования, охваченной цепью обратного преобразования;  $s_{\text{пр}} = s_1 s_i + 1 \dots s_n$  — чувствительность цепи прямого преобразования, не охваченной цепью обратного преобразования;  $s_{\text{ур}} = s_0 / (1 + s_0 \beta)$  — чувствительность цепи уравнивающего преобразования;  $s_{\text{тр}} = s_{\text{пр}} s_{\text{ур}}$ .

Введение обратного преобразователя уменьшает погрешность цепи прямого преобразования, и при  $s_0 \beta \gg 1$  погрешность цепи уравнивающего преобразования определяется только погрешностью цепи обратного преобразования.

Чувствительность  $s_{\text{тр}}$  должна обеспечивать надежное срабатывание исполнительного органа в заданном диапазоне изменений контролируемого параметра. Для этого необходимо выполнение условия

$$s_{\text{тр}} x_{\text{сраб min}} > y_n, \quad (11)$$

где  $x_{\text{сраб min}}$  — минимальное значение контролируемой величины, при которой срабатывает ТР;  $y_n$  — номинальное значение выходного параметра, обеспечивающее надежное срабатывание исполнительного органа ТР.

Вид упругого элемента определяет назначение ТР в целом, а от деформируемости и частотных свойств упругого элемента в значительной степени зависят чувствительность ТР и применимость его для контроля динамических процессов. При выборе или конструировании упругих элементов следует учитывать: форму и геометрические размеры контролируемого объекта; допустимую степень воздействия на него (жесткость для ТР перемещений, характеризующую силовую реакцию упругого элемента на контролируемый объект; прогиб или деформации для ТР сил; увеличение объема контролируемого объекта при подключении и деформировании упругого элемента ТР давления и т. д.); диапазон возможных изменений контролируемого параметра; частотный диапазон измерений и допустимые значения собственной частоты упругого элемента (при недемпфиро-

ванных упругих элементах  $f_H \geq (5 \div 10) f_0$ , где  $f_H$  и  $f_0$  — соответственно максимальная частота контролируемого процесса и собственная резонансная частота упругого элемента); допустимые погрешность ТР и степень постоянства характеристик; требуемую в соответствии с условием (11) чувствительность.

Обычно выбирают упругий элемент, чувствительность которого достаточна для контроля процесса с погрешностью, не превышающей заданную. Это условие можно записать в следующем виде:

$$\epsilon_{\text{ср}} > \epsilon_{\text{min доп}} ,$$

где  $\epsilon_{\text{ср}}$  — деформация, воспринимаемая размещенным на упругом элементе тензорезистором и осредненная по его длине;  $\epsilon_{\text{min доп}}$  — минимальная деформация, достаточная для осуществления контроля с погрешностью не выше допустимой (максимально допустимую деформацию упругого элемента с целью снижения погрешности от гистерезиса принимают обычно равной 25 — 30 % предела прочности материала элемента).

Чувствительность упругого элемента определяется не только его типом, но и тем, какая зона деформаций выбрана в качестве рабочей, какая часть зоны используется в работе и где она расположена.

Деформация  $\epsilon_{\text{ср}}$  определяется на основе зависимостей, приводимых в соответствующих справочниках [3, 7, 9, 10].

Если требование высокой чувствительности должно сочетаться с требованиями высокого быстродействия ТР, то для нахождения компромиссного соотношения между чувствительностью и быстродействием целесообразно каждый упругий элемент характеризовать величиной

$$W = f_0 s_{y.з} = \frac{CB}{V\sqrt{E\rho}} ,$$

где  $V$  — объем упругого элемента;  $E, \rho$  — соответственно модуль упругости и плотность материала упругого элемента;  $B$  — конструктивный коэффициент чувствительности;  $C$  — конструктивный коэффициент быстродействия, определяющий частоту  $f_0$  [9].

Учитывая, что коэффициенты  $B$  каждого типа упругого элемента известны, можно упругие элементы разных конструкций сравнивать по величине  $w = CB$ . При максимальных значениях  $C$  коэффициент  $w$  стержневого упругого элемента равен 0,25, кольцевого — 1,5, мембранного — 2,0, балочного — 0,96.

Поэтому наиболее перспективным упругим элементом является мембранный, наименее перспективным – стержневой.

При выборе материалов упругих элементов предпочтение следует отдавать материалам с минимальным значением  $E\rho$ . Дальнейшее увеличение произведения  $f_0 s_{y,z}$  достигается уменьшением объема  $V$ , что прежде всего обеспечивается надлежащим выбором длины упругого элемента, которая используется под наклейку тензорезисторов. Так, для стержневого упругого элемента рабочую длину выбирают в пределах  $(1,2 \dots 2) L_{\text{тр}}$ , где  $L_{\text{тр}}$  – длина тензорезистора. Рабочая длина кольцевого упругого элемента определяется углом, в пределах которого деформация поверхностных волокон кольца не меняет знака, и ее выбирают в пределах  $(1,0 \dots 1,2) L_{\text{тр}}$ . Длину балочного элемента выбирают в пределах  $(1,2 \dots 1,5) L_{\text{тр}}$ . Ширина выбранного тензорезистора определяет ширину кольцевого и балочного элементов и минимальный радиус стержневого элемента. Ширину кольца принимают равной  $(1,1 \dots 1,2) b_{\text{тр}}$ , где  $b_{\text{тр}}$  – ширина тензорезистора, а ширину балки  $(2,2 \dots 2,4) b_{\text{тр}}$ . Минимальный радиус стержневого элемента определяется по формулам:  $r_{\text{min}} = b_{\text{тр}}/\pi$ ;  $r_{\text{min}} = L_{\text{тр}}/2\pi$ . Изменением толщины упругого элемента, как правило, добиваются заданной чувствительности датчика, порога чувствительности ТР.

Не все размеры чувствительного элемента влияют на его быстродействие. Например, быстродействие стержня не зависит от сечения, быстродействие кольца не зависит от его ширины и т. д. Это значит, что имеются условия для выполнения упругих элементов с различной чувствительностью, но с одинаковой собственной частотой, и наоборот.

Присоединяемые к упругому элементу детали (силовые и вспомогательные подушки, штоки и др.) снижают собственную частоту упругого элемента, поэтому их масса должна быть минимальной. При расчете прижимных пружин усилие прижима необходимо выбирать в зависимости от возможных вибрационных нагрузок с таким расчетом, чтобы при вибрациях между силовой подушкой и упругим элементом не нарушался силовой контакт.

При назначении допусков на детали необходимо учитывать, что на размеры упругого элемента, определяющие чувствительность датчика, допуск должен быть минимальным. Особенно это относится к "тонким" упругим элементам. Выполнение толщины такого элемента даже по второму классу точности приводит к разбросу чувствительности до 20 %. Поверхность под установку тензорезисторов должна иметь высокий (до 10-го) класс чистоты поверхности.

Вместо громоздкого многовариантного расчета упругих элементов с дискретной вариацией их параметров и последующим выбором лучшего варианта в ряде случаев удается разработать простые критерии целенаправленной коррекции, позволяющие получить необходимые параметры ТР или его датчика. Так, для тензорезисторных датчиков силы с осесимметричными кольцевыми упругими элементами предложен критерий коррекции чувствительности в виде

$$h_{i+1} = h_i \sqrt{u_i / u_n},$$

где  $i$  — порядковый номер варианта расчета;  $h_i, u_i$  — соответственно высота сечения кольцевого элемента и напряжение выходного сигнала;  $u_n, h_{i+1}$  — необходимые напряжение выходного сигнала и соответствующая ему высота сечения элемента [2]. При этом обеспечиваются быстрая сходимость процесса последовательных приближений и заданная точность расчета.

Использование подобных критериев чувствительности и их формализация через геометрические параметры упругих элементов позволяют выполнять расчеты на ЭВМ.

Характеристики ТР в значительной степени зависят от свойств используемых тензорезисторов, методов и качества их крепления на упругом элементе. Неприклеиваемый тензорезистор в динамическом отношении представляет собой безынерционное пропорциональное звено, так как практически не вносит фазовых и частотных искажений в процессе преобразования деформаций упругого элемента в изменение сопротивления. В приклеиваемых тензорезисторах (в частности, полупроводниковых) затрачивается некоторое время на установление сигнала после того, как приложено возмущающее воздействие на упругий элемент и они являются инерционными элементами с постоянной времени, зависящей от свойств клея и технологических факторов. Оптимальное взаимодействие упругого элемента и тензорезистора достигается при удовлетворении следующих требований: применение одинаковых тензорезисторов (одинаковых размеров и из одной партии); выбор размеров упругого элемента, при которых в местах расположения тензорезисторов обеспечивается однородное поле деформации; применение тензорезисторов с максимально большой базой в направлении деформации.

Высокую точность датчика можно обеспечить применением тензорезисторов, в частности, фольговых, характеристики которых рассчитывают по заданным геометрическим параметрам. Изменяя такие параметры тензорезисторов, как ширина нити

или длина перемычки его чувствительного элемента, можно получить заданные значения ползучести, что позволяет компенсировать временные нестабильности упругого элемента.

Измерительная схема выбирается из условия обеспечения достаточного выходного сигнала для следующего каскада преобразования — усилителя или непосредственно исполнительного органа. Предпочтение при этом отдается мостовым схемам (см. рис. 3, б) с максимальным числом активных плеч.

Если ограничена поверхность для установки тензорезисторов или если ТР предназначено для контроля только переменной составляющей механической величины, то в качестве измерительной схемы может использоваться потенциометрическая схема.

При сохранении основного сопротивления тензорезистора  $R_0$  (рис. 13) последовательным и параллельным включением добавочных постоянных резисторов  $R_{пс}$  и  $R_{пр}$  можно изменить (уменьшить) чувствительность одного или нескольких тензорезисторов с таким расчетом, чтобы выровнять ее во всех активных плечах и тем самым обеспечить симметрию моста и возможность одинакового вклада всех активных тензорезисторов в выходное напряжение.

Симметрия моста может быть нарушена по следующим причинам: чувствительности тензорезисторов даже при самом строгом отборе имеют разброс значений из-за отклонений условий изготовления от идеальных; приклеенные тензорезисторы имеют различные предварительные напряжения из-за процесса приклеивания; размерные погрешности изготовления упругих элементов (например, различие в толщине стенок), а также неоднородность материала вызывают отклонения местных деформаций от расчетного значения; тензорезисторы смещены относительно расчетного положения. Для малых изменений чувствительности сопротивления этих резисторов определяются по формулам:

$$R_{пс} = \frac{R_0}{2} \frac{\Delta s_T}{s_T}; R_{пр} = 2R_0 \frac{s_T}{\Delta s_T}; \frac{\Delta s_T}{s_T} \ll 1,$$

где  $\Delta s_T = s'_T - s_T$ ,  $s'_T$  — начальное значение чувствительности [1].

При проектировании ТР следует минимизировать влияние следующих факторов, от которых зависит точность работы ТР: температуры, сопротивления изоляции, паразитных электрических напряжений, термоЭДС.

Действие температуры на характеристики тензорезисторов

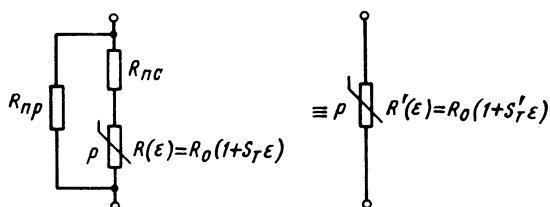


Рис. 13. Схема уменьшения тензочувствительности тензорезистора включением дополнительных резисторов

выражается в изменении сопротивления материала тензорезистора, чувствительности, сопротивления ненагруженного тензорезистора в результате различия коэффициентов теплового расширения тензорезистора и конструкции, на которой укреплен тензорезистор, а также в возникновении термоЭДС. В результате контактной разности потенциалов материала тензорезистора и выводов.

Распространены следующие методы устранения (или уменьшения) температурных погрешностей, проявляющихся в дрейфе нуля:

- применение балансных схем (так, в мостовых измерительных схемах эффективно включение компенсационного тензорезистора в смежное плечо);

- использование тензорезисторов с чувствительностью к деформации противоположного знака по отношению друг к другу, включаемых в противоположные плечи моста (деформации противоположных плеч моста должны иметь одинаковый знак);

- компенсация выходного сигнала с помощью термопар (ЭДС термопары, расположенной вблизи тензорезисторов, компенсирует составляющую выходного напряжения измерительной схемы, обусловленную влиянием температуры на тензорезистор);

- использование термозеристоров для температурной компенсации.

Сопротивление изоляции между наклеенным тензорезистором и металлической поверхностью объекта контроля имеет конечную величину и зависит от подложки тензорезистора, свойств связующего, используемого клея, влажности окружающей среды, качества изоляции кабеля (как между отдельными жилами, так и между каждой жилой и массой), соединяющего тензорезисторы с остальными элементами ТР.

Сопротивление изоляции, которое оказывается включенным параллельно плечам измерительного моста, создает допол-

нительный разбаланс моста, искажающий результаты измерений. Для оценки влияния сопротивления изоляции следует исходить из того, что разбаланс моста в результате влияния сопротивлений изоляции, подключенных к каждому плечу моста, может быть выражен через разбаланс моста, возникающий в случае, если сопротивление изоляции  $R_{из}$  подключено параллельно только к сопротивлению  $R$  ( $R \ll R_{из}$ ) одного плеча моста. Относительное изменение сопротивления тензорезистора за счет механического воздействия равно  $(\Delta R/R)_{мех} = s_T \epsilon$ , в то время как соответствующая величина, выраженная через  $R_{из}$ , с хорошим приближением может быть представлена как  $(\Delta R/R)_{из} \approx \approx R/R_{из}$ . Если потребовать, чтобы разбаланс моста за счет  $R_{из}$  составлял лишь 0,01 разбаланса от механического воздействия на тензорезистор при  $\epsilon = \epsilon_{сраб}$ , то можно получить следующую упрощенную формулу для требуемого значения сопротивления  $R_{из}$  в зависимости от сопротивления  $R$  и чувствительности  $s_T$  тензорезистора:

$$R_{из} \geq \frac{100R}{s_T \epsilon_{сраб}} . \quad (12)$$

В типовой мостовой измерительной схеме (рис. 14), обеспечивающей достаточно высокую точность ТР, резисторы, включаемые дополнительно к тензорезисторам  $R1$ ;  $R4$ , имеют следующие назначения:

$R5$  компенсирует температурную зависимость нуля датчика (как правило, выполняется из медного или никелевого провода);

$R6$  служит для балансировки моста при нулевой или какой-либо заданной деформации упругого элемента (резисторы  $R5$  и  $R6$  можно менять местами);

$R7$  компенсирует изменение чувствительности моста от температуры; в зависимости от используемых элементов датчика преобладает температурная зависимость чувствительности или модуля упругости материала упругого элемента; в первом случае терморезистор  $R7$  должен иметь положительный ТКС (из никелевой или медной проволоки); во втором случае — отрицательный (полупроводниковый тензорезистор); значения ТКС терморезисторов часто меняют с помощью последовательно и (или) параллельно включенных постоянных резисторов;

$R8$  служит для подгонки чувствительности к номинальному значению (сопротивления  $R7$  и  $R8$  часто делят на две части, которые включают симметрично относительно источника питания);

Рис. 14. Типовая мостовая измерительная схема с термокомпенсирующими и балансирующими цепями

$R_9$  позволяет устанавливать заданное выходное сопротивление датчика (важно для ТР, в которых суммируются сигналы от нескольких датчиков);

$R_{10}$  служит для установки заданного входного сопротивления (важно для некоторых источников питания).

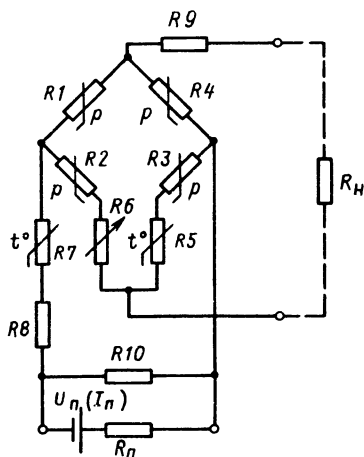
Возможность регулирования входного и выходного сопротивлений моста и, следовательно, его чувствительности обеспечивает взаимозаменяемость датчика.

Градуировочная характеристика моста, выполненного по схеме, представленной на рис. 14, зависит не только от его внутренних параметров, но и от внутреннего сопротивления  $R_{\Pi}$  источника питания и нагрузочного сопротивления  $R_H$  (т. е. входного сопротивления усилителя или исполнительного органа при его непосредственном подключении к измерительному мосту). При работе от внешнего источника напряжения обычно принимают  $R_{\Pi} = 0$ , а при работе от внешнего источника тока принимают  $R_{\Pi} \rightarrow \infty$ .

Как следует из выражений (5) и (7), увеличение напряжения питания  $u_{\Pi}$  в потенциометрических и мостовых измерительных схемах приводит к росту приращения напряжения  $\Delta u$  на тензорезисторе при его деформировании. Однако увеличение  $u_{\Pi}$  эффективно до определенного предела и зависит от тока, протекающего через тензорезистор, ограничиваемого допустимой температурой нагрева электрическим током (при высокой температуре клей размягчается, контролируемая деформация не передается правильно клеем на подложку тензорезистора, и вследствие этого появляется недопустимая погрешность).

Для установившегося теплового режима, при котором имеет место равновесие между количеством теплоты, образующейся в тензорезисторе, и теплоты отводимой, допустимый ток

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\alpha (t - t_0) I_{\text{пр}} F}{A \rho}},$$





где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, постоянный для каждого типа тензорезистора;  $l_{\text{пр}}$  и  $F$  — соответственно периметр и площадь сечения рабочего тела тензорезистора;  $t$  — допустимая температура тензорезистора, устанавливаемая в соответствии с конкретными условиями работы ТР;  $t_0$  — температура окружающей среды;  $A$  — тепловой эквивалент работы.

Выбранная измерительная схема ТР и значение  $I_{\text{доп}}$  используемых тензорезисторов определяют значение питающего напряжения.

В полупроводниковых тензорезисторах при выборе режима работы необходимо принимать во внимание существенное падение чувствительности от деформаций с ростом температуры тензорезистора, ограничивающее рост  $\Delta u$ , в связи с чем существует оптимальный ток, при котором приращение  $\Delta u$  на тензорезисторе от деформации максимально.

Выбор вида напряжения, питающего измерительную схему, в значительной степени зависит от условий эксплуатации ТР и частотных характеристик контролируемого процесса. Использование постоянного питающего напряжения целесообразно, когда сигнал датчика, не зависящий от напряжения питания (термо-ЭДС, контактная разность потенциалов), не превышает допустимого значения, или для ТР, в которых возможна периодическая коррекция нуля.

Применение синусоидального и импульсного питающего напряжений, значительно снижающих требования к дрейфовым характеристикам усилителей, приводит к трудностям, обусловленным реактивными составляющими сигнала и нелинейностью демодуляторов.

В любом электромеханическом преобразователе всегда желательно иметь максимальный входной сигнал. Определим условие максимального съема сигнала в случае потенциометрической измерительной схемы (см. рис. 3, а). Выходное напряжение этой схемы без приложения нагрузки

$$u_{\text{н}} = u_{\text{п}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (13)$$

Если  $R_2$  — активный тензорезистор, меняющий свое сопротивление в результате деформации на  $\Delta R_2$ , а  $R_1$  — пассивный элемент ( $R_1 = \text{const}$ ) и  $R_2 \ll R_{\text{н}}$ , то, продифференцировав (13), получим в малых приращениях

$$\Delta u = \frac{u_{\text{п}} R_1 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)^2}. \quad (14)$$

При прохождении максимально допустимого тока  $I_{\text{доп}}$

$$u_{\text{п}} = I_{\text{доп}} (R_1 + R_2). \quad (15)$$

При подстановке в (14) значения  $\Delta u$  из (15) и, учитывая, что в соответствии с формулой (1)  $\Delta R_2 = s_T \epsilon R_2$ , получим:

$$\Delta u = \frac{I_{\text{доп}} R_2 s_T \epsilon}{1 + R_2/R_1}.$$

Отсюда видно, что условие максимального съема сигнала выполняется при  $m = R_2/R_1 \rightarrow 0$ . Однако в соответствии с выражением (15) при увеличении  $R_1$  растет значение  $u_{\text{п}}$ , обеспечивающее получение установленного значения  $I_{\text{доп}}$ . Исследованиями установлено, что одновременное увеличение напряжения  $u_{\text{п}}$  и уменьшение  $m$  (при условии, что рабочий ток через тензорезистор не превышает  $I_{\text{доп}}$ ) примерно до 0,12 ... 0,20 приводит к увеличению чувствительности схемы. Дальнейшее увеличение  $u_{\text{п}}$  и уменьшение  $m$  нецелесообразно, так как, не давая заметного увеличения чувствительности, оно ведет к неоправданному увеличению напряжения  $u_{\text{п}}$ .

В мостовых измерительных схемах для повышения чувствительности следует стремиться к согласованию сопротивления нагрузки моста  $R_{\text{н}}$  (см. рис. 14) с выходным сопротивлением моста.

Если для используемой измерительной схемы при  $s_y = 1$

$$s_y u_{\text{и.с}} \geq u_{\text{н}}, \quad (16)$$

где  $u_{\text{и.с}}$  — напряжение выходного сигнала измерительной схемы при  $x = x_{\text{сраб}}$ , то к выходу схемы может непосредственно подключаться исполнительный орган, т. е. условие (11) выполняется без применения усилителя, и удастся создать безусилительное ТР [в зависимости от характеристик используемых исполнительных органов условия создания безусилительных ТР могут быть представлены в виде соотношений для токов и мощностей выходного сигнала, аналогичных условию (16)].

Условие (16) сравнительно просто выполнить, если использовать в качестве исполнительных органов милливольтметры и микроамперметры с встроенными электро- и светоконтактными преобразователями (например, приборы типа М303К, М1530К, М1830К) или высокочувствительные магнитоэлектрические реле. Для увеличения сигнала на выходе измерительной схемы при создании безусилительных ТР можно использовать параллельное включение нескольких тензорезисторов в плечах

моста. Расчет такой схемы, сводящийся к определению количества  $n$  параллельно включаемых тензорезисторов в активных плечах моста, при котором обеспечивается получение выходного сигнала, достаточного для срабатывания выбранного исполнительного органа, заключается в следующем.

Ток в измерительной диагонали моста с одинаковыми сопротивлениями  $R_{\Pi}$  плеч,  $N$  из которых активные, в соответствии с выражениями (1) и (6)

$$i = I_{\text{м}} \epsilon_{\text{сТ}} R_{\Pi} \frac{N}{4(R_{\Pi} + R_{\text{н}})}, \quad (17)$$

где  $I_{\text{м}} = u_{\Pi}/R_{\text{м}}$  — ток питания моста;  $R_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузки моста;  $R_{\text{м}}$  — сопротивление моста, равное в данном случае  $R_{\Pi}$ .

Так как ток питания моста  $I_{\text{м}} = 2I_{\Pi}$ , где  $I_{\Pi}$  — ток каждого плеча моста, то при  $N = 4$  выражение (17) принимает вид

$$i = \frac{2 I_{\Pi} \epsilon_{\text{сТ}} R_{\Pi}}{R_{\Pi} + R_{\text{н}}}. \quad (18)$$

При одном и том же напряжении  $u_{\Pi}$ , при  $n = 1$  и для моста с любым значением  $n$  должно иметь место равенство

$$I_{\Pi} R_{\Pi} = I_{\text{доп}} R, \quad (19)$$

где  $I_{\text{доп}}$  — максимальный допустимый ток одного тензорезистора;  $R$  — сопротивление одного тензорезистора.

Тогда из (18) при подстановке значения  $I_{\Pi} R_{\Pi}$  из (19) и  $R_{\Pi} = R/n$  можно получить

$$i = \frac{2 I_{\text{доп}} \epsilon_{\text{сТ}} R}{R_{\text{н}} + R/n}.$$

Отсюда условие срабатывания исполнительного органа

$$n \geq \frac{i_{\text{н}} R}{2 I_{\text{доп}} \epsilon_{\text{сТ}} R - i_{\text{н}} R_{\text{н}}}, \quad (20)$$

где  $i_{\text{н}}$  — номинальный ток срабатывания исполнительного органа.

При согласовании в такой схеме сопротивления  $R_{\text{н}}$  с выход-

ным сопротивлением моста  $R_n = R_n = R/n$  условие (20) приобретает вид

$$n \geq \frac{i_n}{I_{\text{доп}} \epsilon s_T}.$$

Если условие (16) не выполняется, то в ТР вводится усилитель сигнала измерительной схемы с коэффициентом усиления

$$s_{y(u)} = \frac{y_n}{u_{\text{и.с}}} \quad \text{или} \quad s_{y(I)} = \frac{y_n}{I_{\text{и.с}}}, \quad (21)$$

где  $I_{\text{и.с}}$  — ток выходного сигнала измерительной схемы при  $x = x_{\text{сраб}}$ .

Выходная мощность  $P_y$  (в В·А) усилителя должна при этом удовлетворять условию:

$$P_y = \left( \frac{I_{m_n}}{\sqrt{2}} \right)^2 R_{\text{и.о}} 10^{-6},$$

где  $I_{m_n}$  — амплитудное значение тока срабатывания исполнительного органа, мА;  $R_{\text{и.о}}$  — сопротивление управляющей цепи исполнительного органа, Ом.

Облегчить выполнение условия (16) в безусилительных ТР и уменьшить необходимый коэффициент усиления в ТР, использующих усилитель, можно обеспечивая на выходе измерительной схемы отличный от нуля начальный сигнал при нулевой входной величине ( $x = 0$ ), например, путем создания начального разбаланса тензорезисторного моста (см. рис. 14) с помощью резистора  $R_6$ . Этот начальный разбаланс, обеспечивающий создание сигнала, необходимого для срабатывания исполнительного органа, очевидно, не должен превышать значения сигнала, соответствующего  $x = x_{\text{отп}}$  (если начальный разбаланс превышает значение сигнала, соответствующее  $x = x_{\text{отп}}$ , то ТР не будет отпускать при полной разгрузке датчика, т. е. при  $x = 0$ ).

Переключения во внешних цепях ТР могут осуществляться как при срабатывании исполнительных органов (например, электромагнитных реле), т. е. при увеличении контролируемого параметра, так и при их отпускании, т. е. при уменьшении контролируемого параметра. Во втором случае точность работы ТР в меньшей степени зависит от стабильности питания измерительной схемы, чем в первом. Действительно, для случая использова-

ния в ТР мостовой измерительной схемы зависимость тока  $I_H$  в измерительной диагонали моста от напряжения питания  $u_{\Pi}$  характеризуется определяемой из (6) производной:

$$\frac{dI_H}{du_{\Pi}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_H (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + \dots \rightarrow \dots \rightarrow + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} .$$

Так как  $x_{отп} < x_{сраб}$ , то в случае, когда ТР осуществляет переключение при отпуске исполнительного органа, разбаланс моста, характеризуемый разностью  $R_1 R_3 - R_2 R_4$ , меньше, чем в случае переключения при срабатывании исполнительного органа, а следовательно, меньше и значение  $dI_H/du_{\Pi}$ .

В состав ТР входят соединительные линии, связывающие тензорезисторы, которые установлены на контролируемом объекте, с другими элементами ТР. С ростом длины линий уменьшается чувствительность схемы за счет влияния сопротивления проводов и шунтирующего действия их емкостей, растут паразитные фазовые сдвиги, ухудшаются условия балансировки. Для практических расчетов влияния длины  $l$  соединительных линий на выходной сигнал тензорезисторного устройства с мостовой измерительной схемой, питаемой переменным током с частотой  $f$ , существует эмпирическая зависимость

$$M = A(f)l + 1 .$$

где  $M = I/I_{\max}$  — отношение выходного тока устройства при данной длине соединительных линий к максимальному выходному току устройства [ $A(f) = \text{const}$  при  $f = \text{const}$  и использовании кабеля определенного типа]. Для устройств с измерительными мостами, питаемыми постоянным током, определяющим фактором является сопротивление соединительных линий.

В процесс проектирования ТР в целом или отдельных их элементов (в частности, датчиков) может возникнуть необходимость в оптимизации конструкции и технологии, например, достижении заданного уровня качества при минимальных затратах путем перебора большого числа вариантов реализации. Для решения этой задачи строят математическую модель оптимизации. При этом ТР рассматривается как совокупность элементов конструкции, каждый из которых может быть реализован различными способами, т. е. имеет набор альтернативных вариантов реализации. Эти варианты отличаются друг от друга ис-

пользованием различных материалов и технологий, причем для каждого варианта всех элементов должны быть известны затраты на реализацию и балльная оценка качества, задано множество конструкторских ограничений, представляющих собой совокупность несовместимых вариантов реализации различных элементов изделия, и установлен желаемый уровень качества по изделию в целом.

Оптимизация сводится к выбору варианта, не нарушающего конструкторских ограничений и обеспечивающего минимальные затраты на его реализацию при заданном уровне качества. Эта задача может быть решена как задача целочисленного программирования с булевыми переменными [2]. Ее математическая модель записывается следующим образом:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} c_{ij} x_{ij},$$

$$\sum_{i,j \in J^{\mu}}^{l_i} x_{ij} \leq k_{\mu} - 1 \quad (\mu = 1, \bar{\alpha})$$

$$\sum_{j=1}^{l_j} x_{ij} = 1, \quad (i = 1, \bar{n})$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} k_{ij} x_{ij} \geq k, \quad x_{ij} \in \{0; 1\},$$

где  $z$  — затраты на реализацию изделия в целом;  $n$  — число элементов изделия;  $c_{ij}$  — затраты на реализацию  $i$ -го элемента изделия  $j$ -м вариантом;  $x_{ij}$  — число  $i$ -х элементов, реализованных  $j$ -м вариантом;  $l_i$  — число вариантов реализации  $i$ -го элемента изделия;  $\alpha$  — число конструкторских ограничений;  $J_{\mu}^{k_{\mu}}$  — набор индексов элементов, входящих в конструкторское ограничение,  $k_{\mu}$  — число несовместимых элементов в  $\mu$ -м конструкторском ограничении;  $k_{ij}$  — балльная оценка качества  $i$ -го элемента, реализованного  $j$ -м вариантом,  $k$  — заданный уровень, ниже которого оценка качества на должна быть.

На стадии проектирования следует предусматривать меры обеспечения необходимой надежности ТР, своевременного обнаружения отказов и отклонений его характеристик от заданных

значений. С этой целью нужно по возможности обеспечивать: применение тензорезисторных мостовых структур, включающих как активную часть (мост), так и элементы компенсации и коррекции; защиту тензорезисторов от внешних воздействий; контроль качества приклейки тензорезисторов при изготовлении и эксплуатации ТР (см. п. 3 гл. 1); использование упругих элементов с высокими прочностными и упругими характеристиками, подвергнутых операциям термоциклирования и искусственного старения, усилительно-преобразовательных элементов на базе интегральной микроэлектроники, бесконтактных исполнительных органов ТР и др.

Одним из эффективных средств повышения надежности ТР является резервирование наименее надежных элементов. Так, в первую очередь целесообразно резервировать тензорезисторы, для чего непосредственно на контролируемый объект или упругий элемент датчика приклеивают не один, а несколько комплектов тензорезисторов. Для подключения (автоматического или ручного) к измерительной схеме резервных тензорезисторов (электрически ненагруженных) могут использоваться, например, сигналы, получаемые в процессе калибровки датчика при недопустимых изменениях его характеристик.

Значение калибровочного сопротивления для датчиков с  $N$  активными тензорезисторами рассчитывают по формуле

$$R_k = (R + 2R_d) / NC_d s_T \epsilon,$$

где  $R$  — сопротивление плеча, к которому подключено калибровочное сопротивление;  $R_d$  — сопротивление линий, охватываемых калибровочным сопротивлением;  $C_d$  — усредненный коэффициент эффективности преобразований деформации упругого элемента;  $\epsilon$  — заданная деформация, соответствующая, например, порогу срабатывания ТР [9].

Автоматическое включение резервных тензорезисторов (или сигнализация необходимости такого включения) осуществляется, например, устройством, выполненным на базе компаратора, сравнивающего сигнал с выхода измерительной схемы ТР при подключении калибровочного сопротивления с уровнем этого сигнала, соответствующим исправному датчику, и управляющего переключателем тензорезисторов.

Калибровочное сопротивление подключается вручную (кнопкой, тумблером) или автоматически (электронными ключами, контактами реле и т. п.) по командам генераторов периодических сигналов, реле времени (при нулевых или других фиксированных значениях контролируемого параметра вне зоны срабатывания ТР).

Судить о неисправностях датчика и включать резерв можно также по росту разности между его сигналом и предварительно нормированным сигналом от вспомогательного датчика или датчика на базе дополнительного комплекта тензорезисторов, наклеенных на упругий элемент рабочего датчика; по значительному увеличению сигнала на выходе измерительной схемы (в частности, в диагонали моста), возникающему при таких частых неисправностях, как обрыв соединительных проводов тензорезисторов, и обнаруживаемому с помощью пороговых устройств.

## 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

Разнообразие контролируемых параметров и процессов, разнородность объектов контроля и режимов их работы, различия используемых принципов действия и технических средств, возможность реализации однотипных устройств различными методами и средствами – все это обуславливает многообразие ТР. ТР можно классифицировать по ряду признаков:

1) физическая природа контролируемого параметра: ТР деформаций, сил, массы, давления, моментов, перемещений, скоростей, ускорений и др.;

2) тип используемого тензорезистора, в значительной степени определяющий конструктивные особенности и характеристики ТР: ТР с проводниковыми и полупроводниковыми тензорезисторами;

3) характер процесса, который может контролироваться ТР: ТР для статических и быстропротекающих (динамических) процессов;

4) воздействие, необходимое для срабатывания ТР: ТР, реагирующие на увеличение или уменьшение контролируемого параметра;

5) метод измерения контролируемого параметра (ТР с прямым и уравнивающим преобразованием);

6) число воспринимаемых контролируемых параметров: одноканальные и многоканальные ТР;

7) число значений, которое может принимать выходная величина ТР;

8) количество обеспечиваемых независимой установкой значений параметров (порогов) срабатывания: одно- и многопороговые;

9) по области применимости – универсальные, т. е. пригодные для контроля параметров одной и той же природы в разнообразных объектах, и специализированные, приспособленные



для контроля соответствующего параметра только в конкретных условиях.

## **Г Л А В А 2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ**

### **1. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Устройства для контроля деформаций должны обеспечивать надежную установку на исследуемый объект, не влияя на его нагруженность, быть легкими, небольшими по размерам и малоинерционными, чтобы без запаздывания следовать за быстроменяющимися нагрузками. В значительной степени этим требованиям удовлетворяют тензорезисторные устройства.

В зависимости от характера контролируемой величины и диапазоне ее изменений активные тензорезисторы крепят либо непосредственно на объекте контроля, либо на промежуточном преобразующем элементе, согласующем их характеристики с конкретными условиями применения. Так, при контроле больших деформаций, превышающих допустимые для тензорезисторов значения, их приклеивают на промежуточный упругий элемент в виде рамки, скобы, арки, консольной балочки, которые устанавливают на контролируемом объекте.

Контроль напряжения  $\sigma$  в материалах обычно осуществляется через относительную деформацию  $\epsilon$ . При выполнении закона Гука

$$\sigma = \epsilon E, \quad (22)$$

где  $E$  — модуль упругости материала.

Рассмотрим измерение напряжений через относительную деформацию на примерах односторонне нагруженной симметричной балочки и вала, подвергаемого кручению, при использовании тензорезисторного моста, построенного по схеме, приведенной на рис. 3, б. Для контроля напряжения при одноосном напряженном состоянии активный тензорезистор так наклеивают на элемент конструкции в интересующем сечении, чтобы его продольная ось совпадала с направлением главной деформации. Тензорезисторы для температурной компенсации наклеивают на вспомогательную ненагружаемую компенсационную пластину из того же материала, что и исследуемый элемент

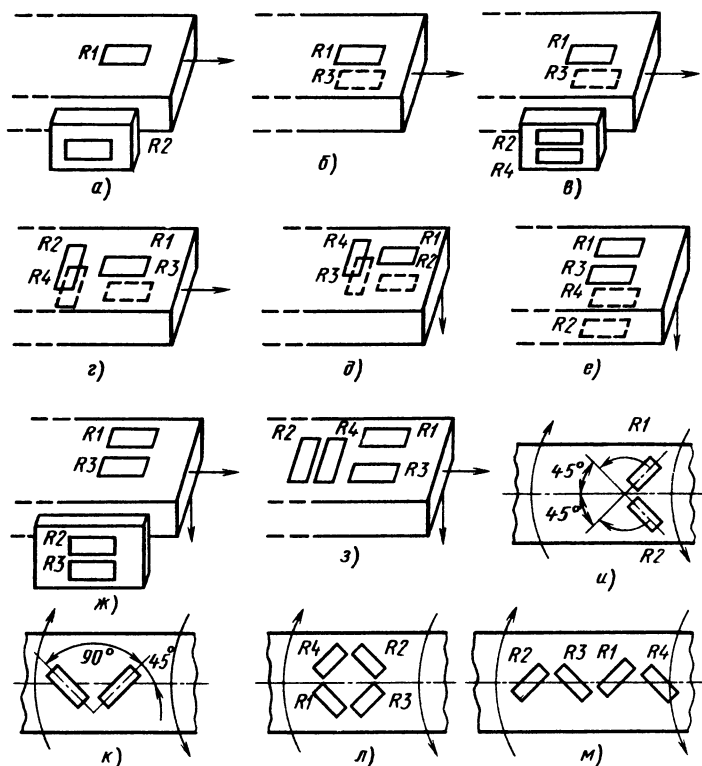


Рис. 15. Схемы размещения тензорезисторов для контроля относительных деформаций и напряжений

(рис. 15, а). В этом случае на основании выражений (1), (7), (24)

$$\sigma = \frac{4 E \Delta u}{u_{\Pi} s_T} .$$

Для исключения влияния на результаты контроля изгибных деформаций на балочку наклеивают два активных тензорезистора, включаемых в смежные плечи моста и располагаемых симметрично на верхней и нижней сторонах балочки (рис. 15, б). В этом случае

$$\sigma = \frac{2 E \Delta u}{u_{\Pi} s_T} . \quad (23)$$

При включении тензорезисторов во все плечи моста возможно использование схем, представленных на рис. 15, в, г. В случае первой схемы (рис. 15, в) на балочку наклеивают два активных тензорезистора  $R1$  и  $R3$ . Два других тензорезистора  $R2$  и  $R4$  наклеивают на компенсационную пластину. Напряжение определяют по формуле (23). Во второй схеме (рис. 15, г) компенсационные тензорезисторы наклеивают так же, как и активные, на балочку, но ориентируют их перпендикулярно к направлению действия силы. С учетом поперечной чувствительности тензорезисторов

$$\Delta u = \frac{u_{\text{п}}}{2} (1 + \mu) s_{\text{T}} \epsilon; \quad \sigma = \frac{2 E \Delta u}{u_{\text{п}} (1 + \mu) s_{\text{T}}},$$

где  $\Delta u$  — сигнал на выходе моста;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

При контроле напряжений изгиба используют те же схемы, но тензорезисторы располагают так, чтобы исключить нормальные напряжения (рис. 15, д, е). По схеме, приведенной на рис. 15, д, на балку наклеивают четыре тензорезистора ( $R1, R2$  — активные,  $R3, R4$  — компенсационные). При изгибе балки один активный тензорезистор ( $R1$ ) воспринимает деформацию растяжения и увеличивает свое сопротивление, а другой ( $R2$ ) — воспринимает сжатие и уменьшает сопротивление. С учетом поперечной чувствительности компенсационных тензорезисторов

$$\Delta u = \frac{u_{\text{п}}}{2} (1 - \mu) s_{\text{T}} \epsilon_{\text{изг}}.$$

При этом растягивающие или сжимающие напряжения компенсируются.

Для измерения одновременно действующих нормальных и изгибных напряжений могут использоваться схемы, приведенные на рис. 15, ж, з.

При измерении крутящего момента, приложенного к стержню, тензорезисторы наклеивают под углом  $45^\circ$  к оси стержня (рис. 15, и—м); в направлениях, перпендикулярных и параллельных оси стержня, имеют место только деформации сдвига. На схеме, показанной на рис. 15, и, на стержень наклеены два тензорезистора под углом  $45^\circ$  к оси стержня: один из них регистрирует растяжение, а другой — сжатие. Включенные в смежные плечи моста, они удваивают сигнал на выходе.

При измерении напряжений сдвига  $\tau$  используется уравнение  $\tau = G \gamma$ , где  $G$  — модуль сдвига;  $\gamma$  — угол поворота.

Изменения угла  $\gamma$  вызывают пропорциональные изменения размеров волокна. Если исходить из условия, что относительная деформация тензорезистора, наклеенного под углом  $45^\circ$  к оси стержня,  $\epsilon = \tau/2 G$ , то с учетом (1) и (7)

$$\tau = \frac{8G \Delta u}{N s_T u_{\Pi}}.$$

Простейшие ТР деформаций и механических напряжений представляют собой тензорезисторный мост, в диагональ которого включена обмотка высокочувствительного электромеханического реле или электроизмерительный прибор (микроамперметр, милливольтметр) с встроенным электро- или светоконтактным преобразователем.

Для ТР с равноплечим мостом при  $N$  активных плечах в соответствии с (6) условие срабатывания

$$I_{\Pi} \approx \frac{N u_{\Pi} \Delta R}{4 R (R + R_{\Pi})} = I_{\text{сраб}}, \quad (24)$$

где  $\Delta R$  – приращение сопротивления активного тензорезистора, обеспечивающее срабатывание ТР;  $R$  – сопротивление плеча моста;  $I_{\text{сраб}}$ ,  $R_{\Pi}$  – ток срабатывания и сопротивление обмотки исполнительного реле.

Из условия (24), с учетом (1) и (22), можно получить формулу для значений деформаций  $\epsilon_{\text{сраб}}$  и напряжений  $\sigma_{\text{сраб}}$ , при которых срабатывает ТР:

$$\epsilon_{\text{сраб}} = \frac{\sigma_{\text{сраб}}}{E} = \frac{4 I_{\text{сраб}} (R + R_{\Pi})}{N u_{\Pi} s_T}.$$

При использовании в качестве исполнительного магнито-электрического реле, имеющего  $I_{\text{сраб}} = 1$  мкА и  $R_{\Pi} = 2$  кОм, ТР срабатывает при  $\Delta R = 0,14$  Ом, что соответствует  $\epsilon_{\text{сраб}} = 7 \cdot 10^{-4}$  (при  $u_{\Pi} = 6$  В и использовании одного активного тензорезистора с  $s_T = 2$  и  $R = 100$  Ом).

Введением усилителей выходных сигналов измерительного моста можно повысить чувствительность ТР.

В схеме ТР, показанной на рис. 16, а,  $\Delta R = 0,01$  Ом, что при использовании тензорезисторов с  $R = 100$  Ом и  $R_T = 2$  Ом соответствует  $\epsilon_{\text{сраб}} = 5 \cdot 10^{-5}$ . Здесь измерительный мост, образованный тензорезисторами  $R1$  и  $R2$  и обмоткой трансформатора, а также усилитель питаются от сети переменного тока с частотой

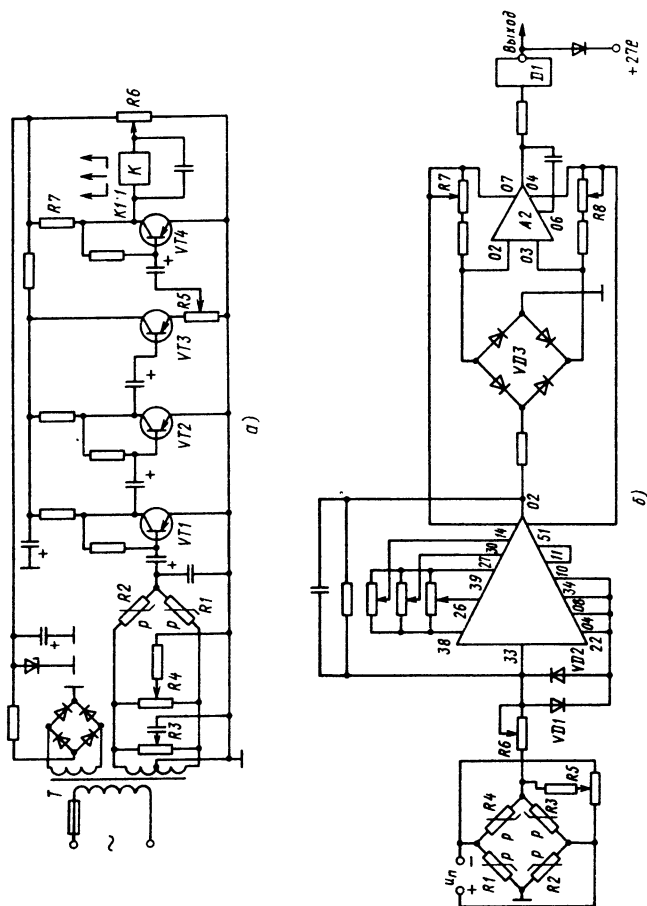


Рис. 16. ТР относительных деформаций и напряжений с последовательным преобразованием

50 Гц. Начальную балансировку моста по реактивной и активной составляющим проводят соответственно потенциометрами  $R3$  и  $R4$ . Напряжение разбаланса моста усиливается в усилителе переменного тока на транзисторах  $VT1 - VT4$ . Усиление регулируется резистором  $R5$ . Резисторы  $R6, R7$  и транзистор  $VT4$  образуют выходной мост, в диагональ которого включена обмотка реле  $K$  (например, реле типа РП-5 или РП-7). Сопротивление транзистора  $VT4$  между коллектором и эмиттером, зависящее от сигнала на входе усилителя, является переменным плечом выходной мостовой схемы. Условия срабатывания ТР задаются потенциометром  $R6$ . При этом настройка может быть такой, что при достижении заданного значения контролируемого параметра ток в диагонали выходного моста равен току отпускания либо току срабатывания реле  $K$ . При использовании трехпозиционного поляризованного реле в качестве реле  $K$  можно раздельно фиксировать отклонения контролируемого параметра как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. При необходимости программного изменения уровня срабатывания ТР в схеме можно предусмотреть несколько потенциометров  $R6$ , поочередно подключаемых к выходному мосту программным устройством.

ТР, схема которого показана на рис. 16, б, предназначено для контроля знакопеременных напряжений и деформаций с раздельной установкой уровней срабатывания по каждому из знаков напряжений потенциометрами  $R7$  и  $R8$ . Срабатывает ТР при значениях  $\Delta R$ , составляющих единицы миллиом. Питание моста, в плечи которого включены тензорезисторы  $R1 - R4$ , осуществляется от стабилизатора постоянного тока (на схеме не показан). Начальная балансировка моста проводится с помощью потенциометра  $R5$ , чувствительность устанавливается резистором  $R6$ . Предварительное усиление сигнала разбаланса моста осуществляется в микромодуле  $A1$ .

Выходной сигнал микромодуля  $A1$ , знак которого зависит от знака сигнала разбаланса измерительного моста, через диодную сборку  $VD3$  направляется в операционный усилитель  $A2$ , а затем в ключ  $D1$ , к которому подключается исполнительный орган ТР.

Если ТР, построенные по схемам рис. 16, имеют датчики с прямым преобразованием, то ТР, выполненные по схеме рис. 17, имеют компенсационный датчик. Измерительные диагонали моста с тензорезисторами  $R1, R2$ , воспринимающими контролируемую деформацию, и моста с тензорезисторами  $R5 - R8$ , наклеенными на консольную балочку  $КБ$  компенсатора, включены последовательно противофазно на входе усилителя пере-

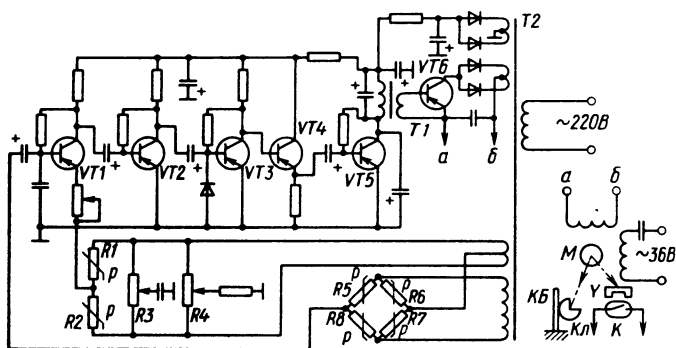


Рис. 17. ТР относительных деформаций и напряжений компенсационного типа

менного тока на транзисторах  $VT1 - VT6$ . К выходу усилителя подключена управляющая обмотка двухфазного реверсивного двигателя  $M$ , который поворачивает кулачок  $К1$ , деформирующий балочку  $КБ$ , до тех пор, пока сигнал моста балочки не скомпенсирует сигнал моста датчика. Положение кулачка однозначно определяется значением контролируемой величины. С кулачком связываются каретки указателя, перо регистратора контролируемой величины и миниатюрный постоянный магнит  $Y$ , вызывающий срабатывание исполнительных магнитоуправляемых контактов  $K$  при достижении определенного значения контролируемой величины, задаваемого установкой положения контактов  $K$ . Резисторами  $R3$  и  $R4$  осуществляется начальная балансировка измерительного моста по реактивной и активной составляющим сигнала.

Для контроля напряженно-деформированного состояния крупных и сложных конструкций часто возникает необходимость в многоканальных ТР механических напряжений. Такие ТР могут строиться на базе логгеров — устройств для сбора, обработки и регистрации аналоговой и цифровой информации больших объемов. Примером может служить логгер мод. "Logрас 2001" фирмы "Дайтрон Электроник" ("Datron Electronics", Великобритания) с числом каналов 20 — 200 и скоростью опроса 20 каналов/с, логгер мод. 2240С фирмы "Дисон Флюк" (John Fluke Mfg. Co. Inc. США) с числом каналов 60 — 1000 и скоростью опроса 15 каналов/с. Основными элементами этих логгеров, рассчитанных на подключение тензорезисторных датчиков (наряду с датчиками других видов), являются управляющая микроЭВМ, системный контроллер с встроенным дис-

плеем и коммутатор. Управляющая программа реализует операции масштабирования, линеаризации характеристик, сравнения с пороговыми уровнями и уровнями аварийной сигнализации.

## 2. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ СИЛ

ТР сил, отличающиеся высокой чувствительностью, сравнительно простыми датчиками, малой инерционностью, небольшой погрешностью и большим сроком службы, применяют для контроля силонагруженности в статических и динамических режимах различных машин и сооружений в процессе эксплуатации и испытаний (на прочность, надежность и др).

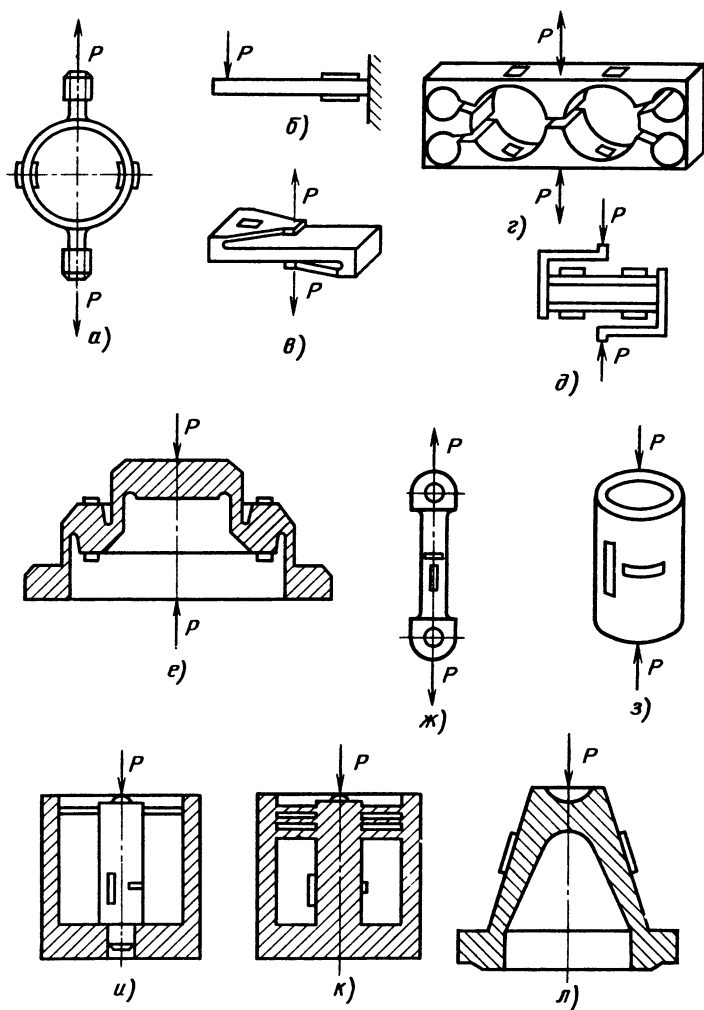
В ТР используются два способа измерения сил: 1) тензорезисторы устанавливаются непосредственно на детали, подвергающейся действию контролируемой силы; 2) тензорезисторы устанавливаются на специально вводимых в разрыв контролируемой силовой цепи упругих элементах, деформирующихся пропорционально приложенной силе.

Первый способ применим, если измеряемая деформация однозначно связана с контролируемой силой и отсутствуют погрешности, вызываемые действием других составляющих сил. При этом желательно, чтобы тензометрируемая деталь была легко съемной и могла подвергаться проверке, а ее рабочее сечение должно обеспечивать достаточную чувствительность датчика. В отдельных случаях специально уменьшают сечение детали. Однако это не всюду допустимо, так как ослабляется деталь и изменяются динамические характеристики контролируемого объекта.

Второй способ измерения сил обеспечивает более точные результаты, так как используются датчики высокой чувствительности, подвергаемые предварительной градуировке и выполняемые из специальных материалов с применением высококачественной технологии приклейки тензорезисторов и термообработки.

К конструкции упругих элементов тензорезисторных датчиков сил предъявляются обычно следующие требования: приложение контролируемого усилия к датчику по возможности в точке; обеспечение постоянной деформации вдоль тензорезистора; гарантированные прочность и герметичность датчика; исключение искажений выходного сигнала от поперечных сил и моментов, возникающих в результате отклонения от соосности направления прилагаемой силы; компенсация температурной погрешности в интервале рабочих температур; минимальные габарит-





ные размеры, в особенности в направлении измеряемой силы; перемещение точки приложения силы только прямолинейно, в направлении вектора силы. Для обеспечения высокой усталостной долговечности в условиях многократного нагружения, минимального гистерезиса и линейной зависимости между измеряемой силой и деформацией напряжение в материале упругих элементов не должно превышать 25 – 30 % предела упругости.

Важным преимуществом тензорезисторного метода измере-

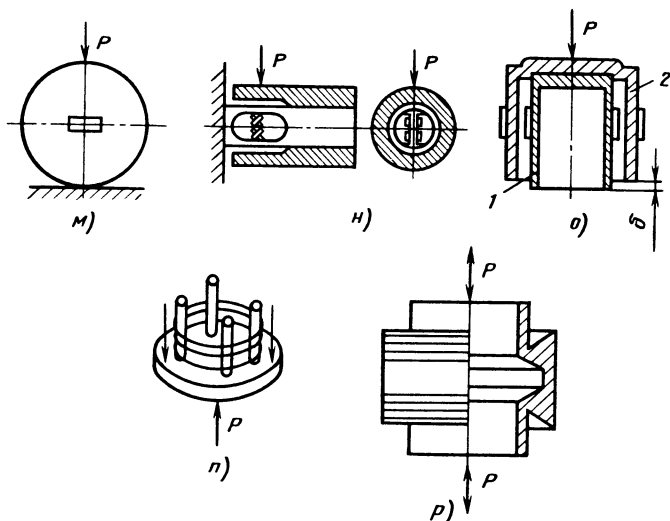


Рис. 18. Конструкция тензорезисторных датчиков сил

ния сил является большое разнообразие форм упругих элементов, что позволяет для каждой технической задачи обеспечить наиболее рациональный их выбор.

Упругие элементы для малых сил выполняют в виде колец, консольных балочек, скоб (рис. 18, а – в). Кольцевые элементы отличаются простотой изготовления, удобством монтажа тензорезисторов и защиты их от внешних воздействий. Применяют их обычно для измерений сил в диапазоне 0,5 ... 10 кН. Статические характеристики  $\epsilon(P)$  колец имеют относительно большую нелинейность. Консольные балки используют для измерения сил в диапазоне 0,2 ... 5 кН. В балках равного сечения деформации по длине тензорезистора не постоянны, средняя деформация тензорезистора зависит от точности его расположения относительно заделки или точки приложения силы. Увеличение сигнала на выходе датчика при исключении влияния неточности расположения тензорезистора можно получить в датчиках с упругим элементом в форме балки равного сопротивления изгибу. Недостатком упругих элементов в виде консольных балок является нелинейность их характеристик, обусловленная изменением плеча приложения силы при прогибе. Этот недостаток устранен в элементе, выполненном в виде двух консольных балок, соединенных жестким поперечником (рис. 18, в).

Для повышения чувствительности датчика в упругих элементах делают вырезы и утонения, повышающие напряжения в местах установки тензорезисторов (рис. 18, *г*). Кроме того, применяют упругие элементы, имеющие поверхности, которые под действием контролируемых нагрузок испытывают как растягивающие, так и сжимающие напряжения (рис. 18, *б, в, д, е*), благодаря чему возможно использование мостов с четырьмя активными плечами.

Для построения датчиков, рассчитанных на большие нагрузки при ограниченной массе и размерах, применяют упругие элементы в виде сплошных стержней и втулок (рис. 18, *ж, з*) с прямоугольным, круглым или профильным сечением. Для таких элементов достаточно легко достигаются высокие классы точности выполнения геометрических размеров, чистоты обработки поверхности.

Так как точка приложения силы практически никогда не лежит точно на продольной оси стержня вследствие конструктивных несовершенств датчика и направление действия силы всегда образует некоторый угол с осью стержня, возникают поперечные силы и моменты, вызывающие деформации стержня, непропорциональные прикладываемым к стержню силам. Для исключения (или уменьшения) этой погрешности наклеенные на стержень тензорезисторы соединяют так, чтобы в выходном сигнале датчика отсутствовали составляющие от деформаций изгиба (например, два активных тензорезистора наклеивают в направлении продольной оси симметрично с двух сторон и включают их последовательно в одно плечо моста). Для снижения эффекта от действия поперечных сил и моментов стержень можно выполнять полым или профильным (например, в виде двутавра) так, чтобы при той же площади поперечного сечения момент сопротивления изгибу по продольной оси в преобладающем направлении действия поперечной силы был больше.

Эффективный способ исключения влияния изгибных деформаций состоит во введении дополнительных упругих элементов с малой жесткостью по оси действия контролируемых сил и большой жесткостью по перпендикулярным осям, например, центрирующей мембраны (рис. 18, *и*) или набора балок, работающих на изгиб (рис. 18, *к*). Эти меры одновременно повышают механическую устойчивость стержней.

Равномерность распределения напряжений при сохранении механической устойчивости обеспечивается в упругих элементах с переменной толщиной стенок (рис. 18, *л*). При этом контролируемая сила должна прикладываться к упругому элементу

всегда в одной и той же точке, например, к сфере из более твердого материала (рис. 18, *и, к*).

В малой степени реагирует на приложение контролируемых сил внецентренно или под углом упругие элементы в форме шара (рис. 18, *м*), применяемые в датчиках сил сжатия (обычно более 50 кН).

В упругом элементе, показанном на рис. 18, *н*, в области расположения тензорезисторов обеспечивается поле деформаций чистого сдвига, благодаря чему при смещениях точки приложения силы погрешности малы.

Сдвиговые упругие элементы, представителем которых является элемент на рис. 18, *н*, все более широко используются при создании прецизионных, жестких, универсальных датчиков. Для получения деформаций сдвига в таких элементах под действием измерительных усилий применяют следующие способы:

приложение перерезывающей (поперечной) силы к балке, геометрия которой обеспечивает превышение деформации сдвига по сравнению с деформацией изгиба (этот способ используется в элементе, показанном на рис. 18, *н*);

закручивание торсиона круглого или прямоугольного сечения моментом, создаваемым силовоспринимающим рычагом (деформация сдвига возникает на поверхности торсиона);

приложение силы к диагонали квадратной пластины, в которой возникают деформации чистого сдвига благодаря выполнению краев пластины утолщенными и обеспечивающими наложение на продольные деформации пластины равных по величине и противоположных по знаку деформаций.

В табл. 1 приведены расчетные соотношения и ориентировочные минимальные значения для номинальных нагрузок  $P_n$  основных типов сдвиговых датчиков (разработка тензорезисторных датчиков сил на малые  $P_n$  вызывает гораздо больше затруднений, чем создание аналогичных датчиков на большие нагрузки, поэтому проводится оценка нижней границы  $P_n$ ) [11]. Здесь  $n$  — число балок;  $b$  — толщина стенок балки, торсиона, пластины;  $h$  — высота стенки балки, прямоугольного торсиона, пластины;  $D$  — наружный диаметр торсиона круглого сечения;  $L$  — плечо рычага торсиона;  $\tau_n$  — номинальное значение касательного напряжения. При оценке нижней границы  $P_n$  принимались следующие значения этих параметров, достижимые без применения специальной технологии:  $n = 1$ ,  $b = 0,3$  мм,  $h = 10$  мм,  $D = 10$  мм,  $L = 100$  мм. Для проводниковых тензорезисторов и мостовой измерительной схемы реальное значение  $\tau_n = 80 \dots 90$  Н/мм<sup>2</sup>.

Для защиты датчиков от перегрузок используют механические упоры с большим поперечным сечением, предотвращающие

Таблица 1

Тип сдвигового элемента	Расчетная формула	Минимальная номинальная нагрузка, Н
Балка	$P_H = nbh\tau_H$	250
Торсион круглого сечения	$P_H = \frac{\pi D^2 b \tau_H}{2L}$	50
Торсион прямоугольного сечения	$P_H = \frac{0,3hb^2 \tau_H}{L}$	0,2
Элемент с наложением деформаций	$P_H = bh\tau_H$	2,5

чрезмерные деформации упругого элемента; применяют антиударные крепления датчиков. Так, элемент, показанный на рис. 18, *о*, имеет два диапазона измерений. Чувствительность в первом (рабочем) диапазоне определяется характеристиками цилиндра 1. После выбора зазора  $\delta$  (в диапазоне возможных перегрузок) дальнейшая деформация определяется суммарной жесткостью цилиндров 1 и 2. За счет применения упоров можно обеспечивать релейный характер функции преобразования ТР.

В датчиках сил используются обычно тензорезисторы на пленочной основе; все более широко применяются наклеиваемые мостовые фольговые и полупроводниковые структуры. Некоторые конструкции упругих элементов предусматривают использование неприклеиваемых тензорезисторов, например, в виде намотки на цилиндрической части элемента, меняющей свои размеры под действием измеряемой силы (рис. 18, *п, р*). Такие датчики более стабильны в работе (за счет уменьшения дрейфа нуля, повышения временной стабильности чувствительности и термостойкости, устранения чувствительности к влажности), но выдерживают меньшие перегрузки.

Промышленность серийно выпускает ряд типов тензорезисторных датчиков сил [3, 10]: датчики силы типов 1778ДСТ-К от 500 Н до 50 кН, 1909ДСТ-0,1 от 40 Н до 5 кН, ДЭДВУ от 2 до 300 кН; осваивается выпуск датчиков от 10 Н до 25 МН. В серийных датчиках используют обычно мостовую схему, подобную показанной на рис. 14 (датчики обычно снабжаются дополнительными тензорезисторными мостами, которые используются для решения дополнительных задач контроля и управления или служат для резервирования).

Основная погрешность лучших датчиков с проводниковыми

тензорезисторами достигает 0,03 – 0,04 %, а с полупроводниковыми – 0,2 %.

Для исключения влияния влаги и пыли тензорезисторные датчики сил часто выполняют герметичными. Один из таких датчиков, предназначенный для работы под водой, с упругим телом в виде стержня 1 (рис. 19) с наклеенными активными 9 и компенсационными 8 тензорезисторами и проушинами 2 для включения в силовую цепь выполнен герметичным за счет введения уплотнительных резиновых колец 4, 6, 12, защиты кабельного вывода виниловой трубкой и заполнения объемов под кожухом 10, панелью 5, крышкой 7, гайками 3, 11 герметизирующим составом из пчелиного воска, канифоли и бензоупорной смазки.

Датчики с металлическими тензорезисторами дают низкое выходное напряжение, передача и преобразование которого (например, при наличии сильных помех) могут стать затруднительными. Поэтому целесообразно размещать предварительный усилитель выходного напряжения измерительной схемы внутри корпуса датчика.

При использовании тензорезисторных датчиков сил в условиях многократного нагружения часто приходится решать по крайней мере одну из следующих задач: а) своевременное обнаружение начальных усталостных повреждений упругих элементов датчика или деталей контролируемой конструкции, на которые крепятся тензорезисторы, особенно в случаях, когда для повышения уровня выходного сигнала сечение тензометрируемых элементов уменьшается; б) выполнение такого включения датчика в силовую цепь, при котором его разрушение не вызывало бы ударов и недопустимых перегрузок контролируемой конструкции.

Автором предложено ТР силы (рис. 20), которое реагирует на появление повреждений в тензометрируемом элементе 1 датчика (А.с. 615369 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L 1/22). На элементе 1 наклеены тензорезисторы 2 и один или несколько проволочных или фольговых сигнализаторов 3 появления и развития трещин (п. 3 гл. 1) с сопротивлением, значительно меньшим сопротивления тензорезисторов. Сигнализаторы включаются в плечи измерительного моста последовательно с тензорезисторами 2. К выходу моста через усилитель 4 подключен двухуровневый компаратор 5. Нижний уровень компаратора соответствует сравнительно небольшому разбалансу моста при заданном предельном значении силы, воспринимаемой элементом 1 (при неповрежденных сигнализаторах 3), и при его достижении включается исполнительный орган 6; верхний уровень компаратора соответствует

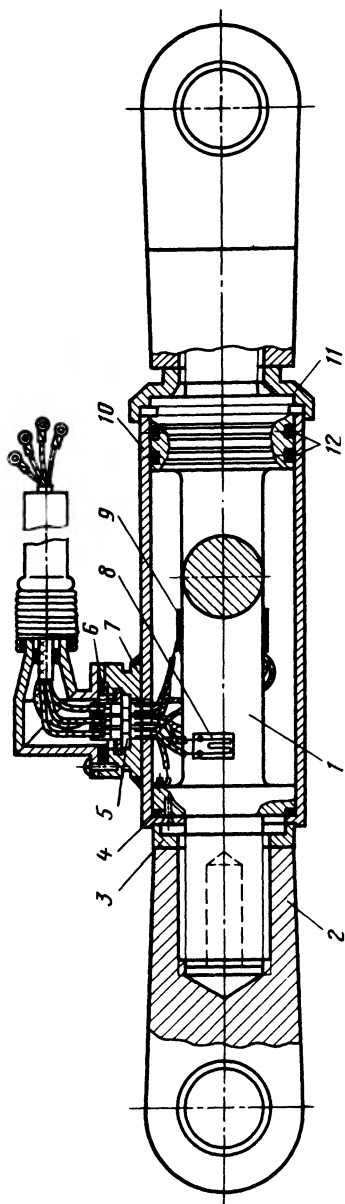


Рис. 19. Конструкция герметичного тензорезисторного датчика сил

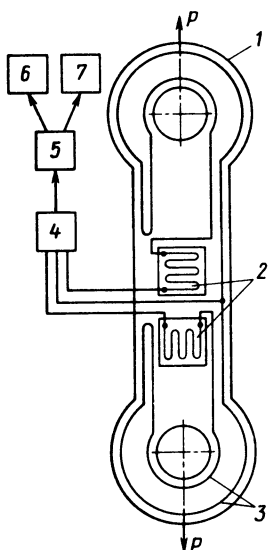


Рис. 20. Схема ТР, реагирующего на повреждение тензометрируемого элемента датчика

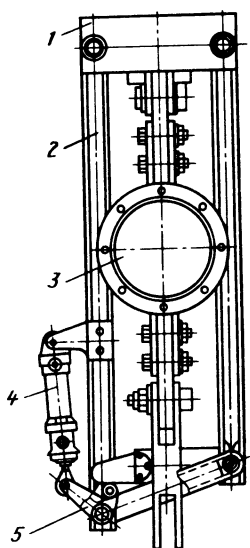


Рис. 21. Конструкция рамки для установки динамометрического датчика в силовую цепь

срабатыванию одного из сигнализаторов 3 (в результате повреждения элемента 1), при котором разрывается соответствующее плечо моста, в измерительной диагонали моста создается значительный сигнал и включается исполнительный орган 7 (исполнительный орган 6 включает, например, звуковой сигнал, а исполнительный орган 7 отключает систему нагружения).

Для предохранения контролируемого объекта от перегрузок при разрушении датчика может служить разработанная при участии автора рамка, состоящая из перекладин 1 (рис. 21) и тяг 2 с гидроприводом 4. При разрушениях датчика 3, и в частности узла его крепления к силовой цепи, усилие, передаваемое на нагружаемую конструкцию, воспринимают тяги 2 рамки. Регулировка первоначального натяжения тяг осуществляется подачей жидкости в гидроцилиндр 4, воздействующий на разгружающий кулачок 5. Такая рамка позволяет также периодически снимать датчик для его поверки без нарушения целостности силовой цепочки.

В ТР, определяющем в каждый момент времени (рис. 22) максимальное значение переменной нагрузки за предшествующий период и включающем исполнительное реле при достижении



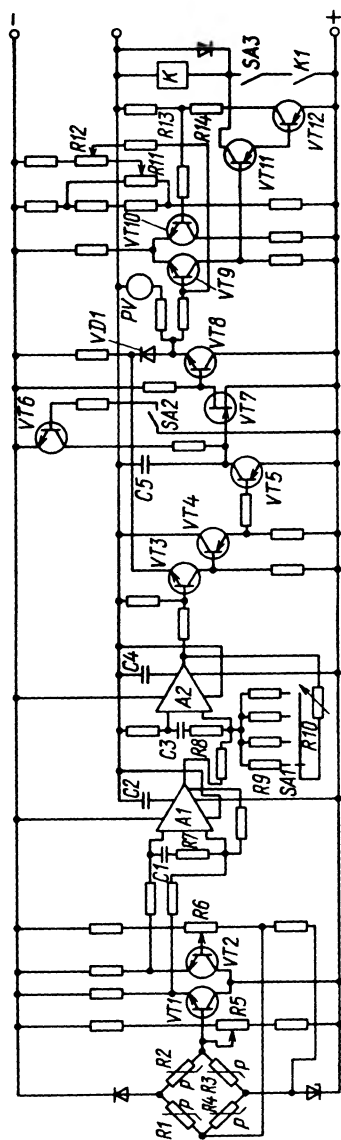


Рис. 22. Схема ТР максимальных значений переменных нагрузок

заданной предельной нагрузки, контролируемое усилие воспринимается датчиком с тензорезисторами  $R1 - R4$ , включенными в мостовую схему. Эмиттерные повторители на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  служат для развязки моста с входом операционного усилителя  $A1$ . Начальная балансировка моста осуществляется потенциометром  $R5$ . Потенциометр  $R6$  используется при калибровании измерительного прибора  $PV$ . В усилителях  $A1$  и  $A2$  за счет отрицательной обратной связи по напряжению обеспечивается стабильное усиление и малый дрейф нуля. К выходу усилителя на транзисторах  $VT3 - VT5$  с коэффициентом усиления, равным  $1$ , подключен запоминающий конденсатор  $C5$ . Усиление зарядного усилителя стабилизируется цепью отрицательной обратной связи на транзисторах  $VT7$ ,  $VT8$  и диоде  $VD1$ . Напряжение на конденсаторе меняется в соответствии с изменением амплитуды входного сигнала. Потенциал на коллекторе транзистора  $VT5$  через цепь обратной связи прикладывается к эмиттеру транзистора  $VT3$ , запирая его при уменьшении входного сигнала. Транзистор  $VT3$  открывается лишь в случаях, когда исследуемый входной сигнал превышает напряжение на конденсаторе  $C5$ . Постоянная времени разряда  $C5$ , определяемая входным сопротивлением полевого транзистора  $VT7$ , весьма велика.

Напряжение на выходе усилительного транзистора  $VT8$ , соответствующее напряжению на конденсаторе  $C5$ , измеряется прибором  $PV$ . При включении тумблера  $SA2$  конденсатор  $C5$  разряжается через открывающийся при этом транзистор  $VT6$ . Для фиксации предельно допустимых значений нагрузок используется амплитудный дискриминатор на транзисторах  $VT9$  и  $VT10$ . Если напряжение, подаваемое на базу  $VT9$ , превышает пороговое значение, задаваемое потенциометрами  $R11$  и  $R12$ , и определяющее пороговое значение контролируемой силы, то транзисторы  $VT11$  и  $VT12$  открываются и включается выходное исполнительное реле  $K$ . Цепь обратной связи из резисторов  $R13$  и  $R14$  при открытии транзисторов  $VT11$  и  $VT12$  сохраняет открытое состояние дискриминатора при уменьшении входного сигнала.

Помехоустойчивые и чувствительные ТР сил могут быть построены на базе датчиков с измерительными схемами, преобразующими изменения сопротивления тензорезисторов в изменения частоты электрических сигналов. Так, в датчике с тензомостом, выполненным на кремниевой балке, и измерительной схемой в виде двухпетлевого  $RC$ -генератора с запаздывающей обратной связью, достигается чувствительность порядка сотен и тысяч герц на ньютон [2]. В ТР с подобными датчиками может использоваться схема сравнения, приведенная на рис. 8, е.

### 3. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ МАССЫ

Тензорезисторные реле массы позволяют создавать быстродействующие чувствительные и точные приборы для регистрации и дистанционной передачи результатов взвешивания, устройства для защиты от перегрузок подъемных машин, системы автоматизации различных технологических процессов, связанных с взвешиванием деталей конструкций, дозированием и смешиванием материалов, регулированием уровня жидких и сыпучих тел в резервуарах, контролем загрузки транспортных средств и др.

Использование тензорезисторных датчиков сил, рассмотренных в п. 2 гл. 2, в массоизмерительной технике является одним из распространенных и эффективных путей автоматизации процесса взвешивания и создания электромеханических весов со следующими преимуществами по сравнению с механическими:

- отсутствие сложных механических передач и в связи с этим высокая долговечность и уменьшенные затраты на обслуживание;

- возможность контроля масс в широком диапазоне, включая измерения очень больших масс, которые либо вообще не могут быть осуществлены механическим способом, либо выполняются только при значительных затратах;

- повышенная скорость взвешивания, обеспечивающая, в частности, измерения при быстроменяющихся условиях нагружения;

- электрическая обработка сигналов датчика, исключаящая, например, процессы механической регулировки и позволяющая автоматизировать сравнительно простыми средствами регистрацию результатов измерения и выдачу протокола взвешивания, переключение диапазонов контроля, компенсацию сигнала от массы тары (любое произвольное состояние взвешиваемого объекта можно принять за нуль отсчета), устранение влияния на измерения динамических составляющих контролируемой нагрузки, вызываемых, например, колебаниями груза на подвеске, сотрясениями при взвешивании транспортных средств в движении и др.;

- возможность выполнения (в случае необходимости) вычислительных операций в виде суммирования сигналов нескольких датчиков, перемножения этих сигналов на скорость транспорта, пересчета массы в объем, вычисления стоимости (перечисленные достоинства в определенной степени характерны для ТР и других механических величин).

Датчики в массоизмерительных приборах необходимо встра-

ивать в силовую цепь так, чтобы воспринимать действие массы целиком, и если для обеспечения устойчивости или по другим конструктивным соображениям силовой поток разветвляется (например, распределение массы больших резервуаров, бункеров, платформ на несколько опор), то датчики силы должны быть встроены во все ветви силового потока (т. е. во все опоры), а их сигналы должны суммироваться.

Применяется ряд вариантов схем включения нескольких тензорезисторных датчиков сил, обеспечивающих суммирование сигналов (рис. 23). В одной из них (рис. 23, а) требуется только один источник питающего напряжения; однако для исключения погрешностей суммирования необходимо равенство чувствительностей и равенство внутренних сопротивлений всех датчиков. Этот недостаток исключается при последовательном включении измерительных цепей (рис. 23, б, в), но при питании постоянным напряжением (рис. 23, б) требуется несколько (по числу датчиков) дорогостоящих высокостабильных источников постоянного напряжения. В схеме, представленной на рис. 23, в, каждый датчик питается переменным током через трансформатор тока  $T$  и выпрямитель  $V$  от общего стабилизированного источника.

Если по условиям применения массоизмерительного прибора положение датчиков относительно опор может меняться, целесообразно применять датчики с большой опорной поверхностью и последовательно-параллельной схемой включения тензорезисторов (рис. 24), обеспечивающей в известных преде-

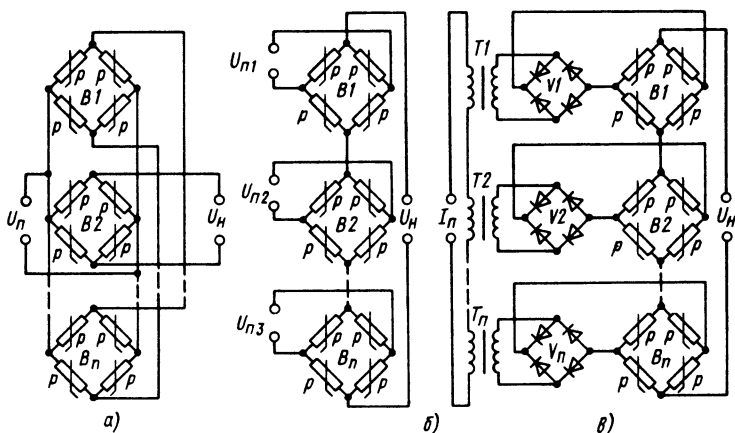
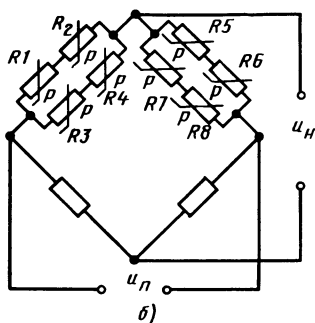
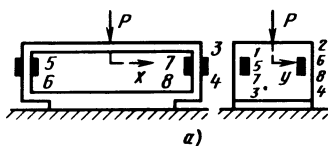


Рис. 23. Схема суммирования сигналов датчиков сил

Рис. 24. Датчик массы с большой опорной поверхностью:

*a* — конструкция упругого элемента;  
*б* — схема



лах независимость результатов измерения от смещения точки приложения нагрузки в направлениях  $x$  и  $y$ .

Схема, приведенная на рис. 25, иллюстрирует один из методов подавления динамических помех, возникающих, например, в условиях колебаний рычажной системы весов. Коромысло  $K$  весов, опирающееся на призму  $\Pi$ , связано с грузоприемным устройством  $ГП$  и датчиком силы  $ДС$ . Выходной сигнал датчика содержит постоянную и переменную составляющие. Первая соответствует измеряемому значению массы, а вторая обусловлена колебаниями рычажной системы.

Сигнал датчика после усиления в предварительном усилителе  $ПУ$  подается на дифференцирующую схему  $Д$  на базе  $RC$ -цепей и одновременно на суммирующую схему  $СС$  на операционном усилителе  $A2$ . Дифференцирующая схема отфильтровывает постоянную составляющую сигнала и выдает на выходе только переменную составляющую (колебания рычажной системы весов, а следовательно, и переменное напряжение сигнала датчика имеют обычно синусоидальную форму; производная такого сигнала также имеет гармонический характер).

Выходной сигнал схемы  $Д$  синусоидальной формы поступает в усилитель  $У$  на микросхеме  $A1$  для компенсации ослабления амплитуды сигнала схемой  $Д$  и обеспечения равенства амплитуд сигнала на выходе усилителей  $ПУ$  и  $У$ . С выхода усилителя  $У$  усиленный синусоидальный сигнал поступает в преобразователь

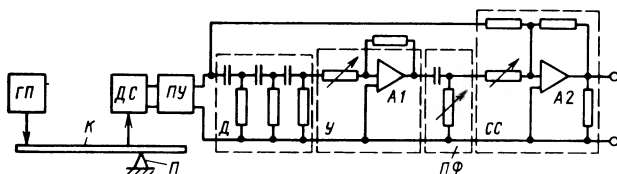


Рис. 25. Устройство подавления динамических помех в весах

фазы  $ПФ$ , где сдвигается по фазе на  $180^\circ$  по отношению к фазе выходного сигнала усилителя  $ПУ$ . Сдвинутый по фазе синусоидальный сигнал поступает в схему  $СС$ . Выходной сигнал усилителя  $ПУ$  также подается в схему  $СС$  синхронно с сигналом усилителя  $У$ , и содержащаяся в нем переменная составляющая подавляется. В результате с выхода схемы  $СС$  снимается только постоянный сигнал, соответствующий значению контролируемой массы.

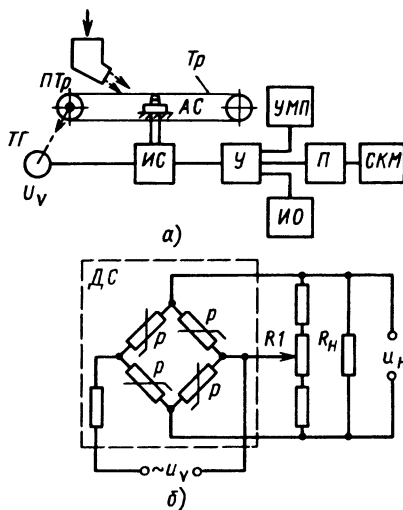
Исполнительный орган  $ТР$  на базе схемы, показанной на рис. 25, подключается к схеме  $СС$  через дополнительный усилитель. Если контролируемая масса меняется во времени, то переменную составляющую, обусловленную колебаниями системы, выделяют многократным дифференцированием сигнала датчика. Для исключения переменных составляющих сигнала, являющихся результатом сложения паразитных колебаний различных гармоник, можно использовать несколько последовательно соединяемых блоков, каждый из которых включает схемы дифференцирования, преобразования фазы и суммирования.

Для подавления динамических помех при взвешивании применяют методы, основанные на усреднении результатов многократного измерения, использовании фильтров нижних частот, измерении в моменты равенства нулю периодической динамической помехи.

В конвейерных весах, снабжаемых транспортером, подлежат контролю такие параметры, производные от массы, как мощность подачи, т. е. транспортируемая лентой и в единицу времени масса, и общее количество перемещаемого груза. Мощность подачи определяется как произведение загрузки ленты на ее скорость, а общее количество перемещаемого груза соответствует интегралу во времени от мощности подачи.

В одном из вариантов  $ТР$ , реагирующего на заданные значения мощности подачи и общего количества перемещаемого на конвейере весов груза (рис. 26), для питания моста измерительной схемы  $ИС$  датчика силы  $ДС$  используется пропорциональное скорости  $v$  ленты транспортера  $Тр$  напряжение  $u$ , с выхода тахогенератора  $ТГ$ , связанного с приводом транспортера  $ПТр$ . В схеме  $ИС$  с помощью резистора  $R1$  производится компенсация сигнала, обусловленного массой тары (рис. 26, б).

Напряжение  $u_n$  в измерительной диагонали моста  $ИС$  пропорционально мощности подачи и после усиления в усилителе  $У$  направляется в указатель мощности подачи  $УМП$  и исполнительный орган  $ИО$   $ТР$ , срабатывающего при достижении заданного значения подачи. Одновременно сигнал с выхода усилителя  $У$  подается в преобразователь  $П$  напряжения в частоту, где выраба-

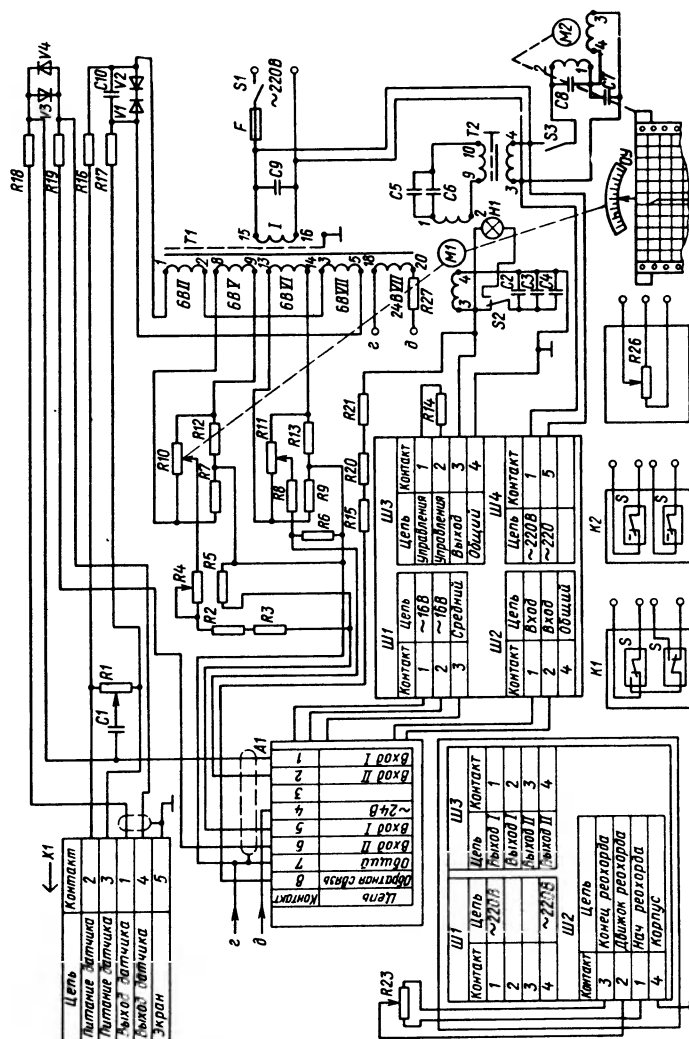


**Рис. 26. Конвейерные весы:**  
**а** – структурная схема; **б** – электрическая схема

тываются импульсы с частотой, пропорциональной напряжению  $u_H$ . Эти импульсы суммируются в счетчике *СКМ*, показания которого пропорциональны общему количеству перемещаемого груза. В качестве *СКМ* может использоваться программный счетчик (например, типа Ф5007), выдающий командный сигнал после поступления предварительно заданного числа импульсов.

Для автоматического взвешивания продукта, выдачи его определенными дозами, регистрации результатов измерений промышленностью выпускается ряд устройств на базе приборов КСТ3, КСТ4 и других, использующих компенсационный метод измерения сигналов тензорезисторных датчиков сил.

В приборе типа КСТ4 (рис. 27) измерительная схема включает измерительный мост (реохорд  $R_{10}$ , резисторы  $R_7, R_{12}, R_4, R_2, R_3, R_5$  – для приборов однопредельных и с искробезопасной измерительной цепью; реохорд  $R_{10}$ , резисторы  $R_2 – R_5, R_7, R_{12}, R_{17}, R_{18}$  – для приборов трехпредельных с ручным переключением пределов измерений); мост подавления начального входного сигнала, например, от веса тары (потенциометр  $R_{11}$ , резисторы  $R_6, R_8, R_9, R_{13}$  – для приборов однопредельных и с искробезопасной измерительной цепью; потенциометр  $R_{11}$ , резисторы  $R_6, R_8, R_9, R_{13}, R_{19}, R_{20}$  – для приборов трехпредельных); предварительный усилитель  $A_1$  для подавления реактивной составляющей входного сигнала, обусловленной



**Рис. 27. Электрическая схема прибора КСТ4**



емкостной несимметрией линии связи прибора с датчиком и обеспечения порога чувствительности 1 мкВ; усилитель мощности  $A2$ ; реверсивный двигатель  $M1$ ; питающий трансформатор.

Сигнал разбаланса измерительной схемы поступает на обмотки входного трансформатора усилителя  $A1$ , затем усиливается в усилителе  $A2$  и направляется в обмотку управления двигателя  $M1$ , ротор которого механически связан с движком реохорда  $R10$ , указателем отсчетного устройства  $OY$ , приводами встроенных электроконтактных преобразователей  $K1$ ,  $K2$  на базе микропереключателей и движками дополнительных реохордов  $R23$ ,  $R26$  (реохорд  $R26$  используется в системе дистанционной передачи показаний прибора, а реохорд  $R23$  — в преобразователе  $V$  сопротивления в частотно-импульсный сигнал 2 ... 4 кГц или 4 ... 8 кГц, например при интегрировании результатов взвешивания на конвейерных весах).

Ротор двигателя, вращаясь, перемещает движок реохорда  $R10$  до тех пор, пока снимаемый с него сигнал не станет равным выходному сигналу датчика, определяя тем самым положение указателя на шкале прибора, а следовательно, и значение измеряемой массы. При достижении заданных установкой преобразователей  $K1$  и  $K2$  значений массы происходит срабатывание соответствующих микропереключателей.

Цепь  $R1$ ,  $C1$  служит для ручной компенсации реактивной составляющей входного сигнала (о наличии этой составляющей сигнализирует лампа  $H1$ ); резисторами  $R19$ ,  $R20$  симметрируют измерительную схему относительно входа усилителя в трехпредельных приборах; потенциометр  $R4$  используется для регулирования верхнего значения диапазона измерения.

#### 4. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ

Среди применяемых устройств контроля крутящих моментов на валу ( $M_{кр}$ ) тензорезисторные приборы, и в том числе ТР, представляются одними из перспективных с точки зрения возможности создания простых и универсальных конструкций для измерения малых и больших  $M_{кр}$  при исследованиях и защите от перегрузок разнообразных машин и механизмов как в процессе испытаний, так и в эксплуатации в широком диапазоне температур окружающей среды при возможном воздействии вибрации и тряски.

Как и в ТР сил, в ТР крутящих моментов используется непосредственное измерение деформаций закручивания вала иссле-

дуемого механизма (см. рис. 15, *и – м*) и измерение с помощью специальных элементов, встраиваемых в линию вала или под опоры.

При наклейке тензорезисторов по варианту, представленному на рис. 15, *и*, деформации от изгиба вала, воспринимаемые тензорезисторами, меняются в зависимости от угла поворота вала и не равны по величине в каждый момент времени. По варианту, показанному на рис. 15, *к*, тензорезисторы включают в соседние плечи моста, и влияние изгиба вала практически исключается, поскольку деформации обоих тензорезисторов при изгибе вала одинаковы по знаку и величине; исключаются также погрешности от изменений температуры вала. Тензорезисторы располагают как можно ближе друг к другу. Второй упомянутый выше вариант (см. рис. 15, *к*) хуже, чем первый (см. рис. 15, *и*), в случаях, когда напряжения от изгиба не постоянны вдоль образующей вала.

Могут быть также наклеены четыре тензорезистора, включенные во все плечи моста (см. рис. 15, *л, м*). Тензорезисторы, воспринимающие деформации одного знака, наклеивают парно на диаметрально противоположные образующие вала и включают в противоположные плечи моста.

При реализации второго способа измерения  $M_{кр}$  используются встраиваемые упругие элементы в виде полых и сплошных торсионов, упругих крестообразных шарниров, ступиц с радиальными спицами, на которые наклеивают тензорезисторы. Критериями выбора характеристик встраиваемых элементов являются допускаемая нагрузка, возможность контроля переменных  $M_{кр}$ , необходимость демонтажа для обслуживания, допустимость изгибающих моментов, осевых нагрузок и т. д.

Для подключения тензорезисторов, наклеенных на вращающемся валу, к усилительно-преобразовательным и исполнительным элементам ТР могут применяться токосъемники контактного типа, например, в виде колец со щетками. Простейшие токосъемники с контактными кольцами имеют недостаток – их переходное сопротивление меняется в зависимости от температуры, загрязнений, коррозии, давления щетки на контактные кольца. Если такой токосъемник включить в потенциометрическую схему или полумост, то при использовании металлических тензорезисторов возможны погрешности порядка 10 % и выше, так как изменение контактного сопротивления накладывается на незначительное изменение сопротивления тензорезисторов. В таких случаях применение полупроводниковых тензорезисторов предпочтительнее, так как изменение их сопротивления при

деформировании вследствие более высокой тензочувствительности в 50 — 100 раз выше.

При использовании схем полного моста на вращающемся элементе конструкции токосъемники с контактными кольцами включают последовательно с внутренним сопротивлением источника питающего напряжения и с включенным в измерительную диагональ моста усилителем с высокоомным входом. Поэтому небольшие изменения переходного сопротивления контактов мало влияют на результаты измерения.

При не очень больших частотах вращения применяют серебряные контактные кольца и серебряно-графитовые щетки, медные и латунные кольца и графитовые щетки и др. Если допускается вывод соединений через конец вала, то контакт может иметь малый диаметр, а следовательно, и малую окружную скорость. Существуют устройства с платинопортуговым контактом, работающие при частотах вращения  $30\,000\text{ мин}^{-1}$  при диаметре коллектора до 1 мм.

Для уменьшения ошибок, вносимых контактными токосъемником, или ослабления предъявляемых к нему требований на вращающемся валу устанавливают усилители сигналов датчика. Их подключение к преобразующим и исполнительным цепям осуществляется бесконтактным способом при помощи емкостной, индуктивной (трансформаторной) или радиотелеметрической связи, использующей метод частотной или кодово-импульсной модуляции.

При малых помехах, небольших требуемых динамическом диапазоне и точности наиболее целесообразно, с точки зрения минимизации аппаратных затрат в условиях достижения заданной надежности, применение частотных видов модуляции, а при требовании широкого динамического диапазона, высокой точности и быстродействия — модуляции, комбинированной из широтно-импульсной и амплитудно-импульсной.

В датчике (рис. 28) с встраиваемым промежуточным элементом типа *DMW* фирмы "Johne + Reilhofer" (ФРГ) с унифицированным электрическим выходным сигналом (+ 5 В) используется частотная модуляция выходного сигнала и бесконтактный (без гальванической связи) способ передачи измерительной информации с вращающейся части (ротора) на неподвижную (статор). Питание элементов, расположенных на роторной части, осуществляется также бесконтактным способом. Датчик выполнен в виде единого узла, ротор которого опирается на два подшипника качения, установленных в статоре. В роторе размещены тензорезисторный мост *ТМ*, усилители *У*, преобразователь "напряжение — частота" *ПНЧ*, преобразователь "напряжение пере-

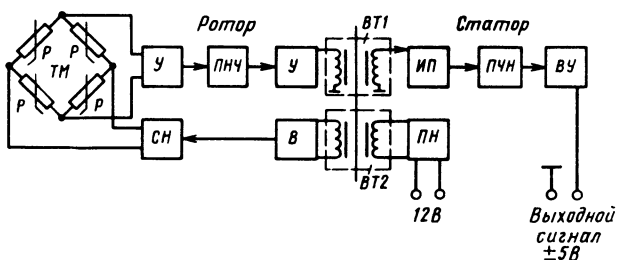


Рис. 28. Схема встраиваемого преобразователя  $M_{кр}$  типа  $DMW$  (ФРГ)

менного тока – напряжение постоянного тока” (выпрямитель) *В*, стабилизатор напряжения постоянного тока *СН*, питающего мост *ТМ*. В статоре находится импульсный преобразователь *ИП*, преобразователь ”частота – напряжение” *ПНЧ*, выходной усилитель *ВУ* с цепями температурной компенсации, преобразователь ”напряжение постоянного тока – напряжение переменного тока” *ПН*. На статоре предусмотрены два штепсельных разъема: для подключения источника постоянного тока с напряжением 12 В и для съема выходного сигнала, используемого, например, для включения исполнительного реле ТР. Связь между статором и ротором осуществляется с помощью вращающихся трансформаторов *ВТ1*, *ВТ2*. Концы вала ротора имеют шпоночные пазы или шлицы для связи с контролируруемыми механизмами.

Датчики типа *DMW* выпускают нескольких модификаций с верхним пределом преобразований  $M_{кр}$  от 2000 до 20 000 Н·м, максимальной частотой вращения от 1000 до 10 000 мин<sup>-1</sup>, погрешностью  $\pm 0,5 \%$  верхнего предела диапазона и потребляемой мощностью 6 Вт.

Фирмы "Филипс" (*Philips*) и *ESA* (ФПГ) выпускают аналогичные датчики, в которых между статором и ротором нет механической связи (зазор 1 ... 5 мм). В датчиках фирмы *ESA* для питания элементов ротора используются малогабаритные литиевые аккумуляторы, размещенные также на роторе.

В ТР на базе бесконтактного датчика НАТИ (рис. 29) связь между неподвижной и вращающейся частями датчика осуществляется с помощью антенн. На вращающемся валу размещаются тензорезисторный мост  $TM$ , усилитель сигнала разбаланса моста  $У1$ , генератор  $G$  управляемой частоты, преобразующий сигнал разбаланса моста  $TM$  в изменение частоты генерируемых колебаний, усилитель мощности  $УМ1$ , передающая антенна  $A_{\Pi}$ , источник питания  $ИП$  и стабилизатор напряжения  $СН$ . Сигнал передающей антенны  $A_{\Pi}$  датчика воспринимается приемной антенной

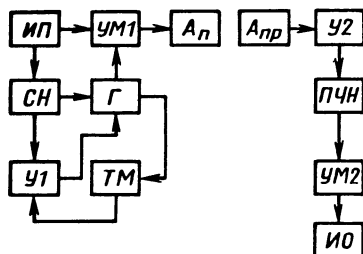


Рис. 29. Структурная схема преобразователя  $M_{кр}$  НАТИ

$A_{пр}$  неподвижной части устройства, размещаемой на расстоянии 0,5 м от датчика, усиливается в усилителе  $У2$  и направляется в преобразователь "частота — напряжение" ПЧН, а затем после усиления в усилителе мощности  $УМ2$  —

в исполнительный орган  $ИО$  (например, в обмотку магнитоуправляемого реле). Одновременно сигнал с выхода  $У2$  может использоваться для регистрации значения  $M_{кр}$  с помощью частотомера, осциллографа и др.

Датчики, встраиваемые под опоры, и электрические схемы ТР крутящих моментов с такими датчиками практически не отличаются от рассмотренных в п. 2 гл. 2.

Датчики и аппаратура, размещаемые на стационарных основаниях, в несколько раз дешевле встраиваемых в линию вала, проще в эксплуатации и при ремонте.

## 5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ ДАВЛЕНИЯ

Высокие чувствительность и точность, широкий диапазон контролируемого давления (от сотых долей и до сотен мегапаскалей), возможность использования серийно выпускаемых тензорезисторов, а иногда и упругих элементов, простота, минимальные искажения, вносимые в контролируемый процесс, надежность и технологичность конструкций датчиков характеризуют ТР давления, получивших распространение для дистанционного контроля, сигнализации, автоматического регулирования давления жидкостей и газов.

Давление в гидро- и пневмосистемах так же, как силы и крутящие моменты, контролируют тензометрированием непосредственно трубопровода или агрегата либо с помощью специальных встраиваемых промежуточных элементов.

Встраиваемые упругие элементы выполняют в виде мембран (плоских или гофрированных), сильфонов, тонкостенных гильз, конических и полусферических оболочек.

К датчикам давления, по сравнению с датчиками силы, предъявляют более жесткие требования по массе и габаритным размерам. Для удовлетворения этих требований упругие элементы выполняют минимально возможного объема с максималь-

ным использованием поверхности под установку тензорезисторов, выбирая при этом малогабаритные тензорезисторы. Другими особенностями датчиков давления ТР, которые следует учитывать при проектировании, являются следующие: более широкий диапазон возможных изменений воздействующей на тензорезисторы температуры измеряемой среды, чем диапазон изменений температуры окружающей среды; герметичное исполнение большинства датчиков давления, что снижает в некоторой степени требования по установке тензорезисторов, так как отпадает необходимость герметизации их специальными составами, однако обеспечение герметичности датчика требует решения целого комплекса задач, связанных с обезжириванием, заливкой, сваркой, проверкой герметичности и других мероприятий. В датчике низкого давления, изображенном на рис. 30, а, упругим элементом служит плоская мембрана, на которую наклеен активный тензорезистор 1. Тензорезистор 2 для температурной компенсации наклеен на поверхность прижимной гайки и не деформируется под действием контролируемого давления. Частота собственных колебаний мембраны должна в 8 — 10 раз превосходить частоту контролируемого процесса. Перемещение центра мембраны для обеспечения линейности и стабильности характеристик не должно превышать  $1/4 - 1/8$  ее толщины; отношение толщины к диаметру обычно устанавливается в пределах  $1/10 - 1/50$ . Датчики с плоской мембраной имеют значительные дополнительные погрешности от изменений окружающей температуры. Однако это несущественно для ТР, контролирующих точно фиксированные режимы.

Гофрированные мембраны отличаются от плоских большими допустимыми прогибами. Высокую чувствительность, обеспечивающую измерение весьма малых давлений, расширенный диапазон измерений давлений имеют показанные на рис. 30, б, в датчики, в которых гофрированная мембрана передает усилие от контролируемого давления на жестко связанный с ней промежуточный упругий элемент в виде балочки с тензорезисторами (или другого типа). Мембраны выполняют здесь роль разделителя сред, например, для защиты тензорезисторов от повышенной температуры контролируемой среды. Для разделения сред используются также сильфоны и мягкие (вялые) мембраны из эластичного материала, применяемые для контроля давления в диапазоне  $10^{-6} \dots 0,1$  МПа.

Датчик с цельноточеной мембраной (рис. 30, г) имеет повышенную собственную частоту и предназначен для контроля больших давлений. Прогиб центрального участка такой мембра-

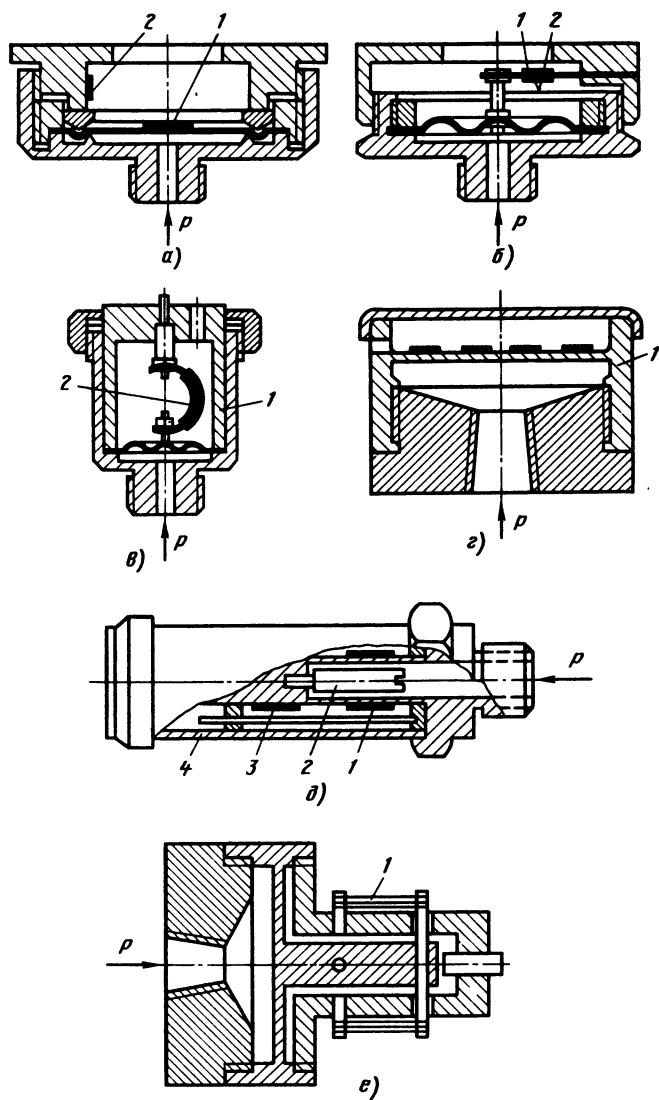


Рис. 30. Конструкция датчиков давления

ны в широком диапазоне линейно зависит от давления. Тензорезисторы, включаемые в соседние плечи измерительного моста, наклеивают на мембрану в ее центральной части и на периферии, где напряжения имеют разные знаки [9] .

Перспективны датчики с тонкопленочными тензоэлементами, наклеенными непосредственно на металлическую мембрану путем вакуумного распыления и гибридные датчики мембранного типа с полупроводниковыми тензорезисторами, в частности, серийно выпускаемые датчики, в которых к цельноточечной измерительной мембране вакуумной пайкой крепится монокристаллическая сапфировая пластинка с выращенным на ее поверхности слоем кремния, из которого сформирована тензорезисторная мостовая схема (структура КНС — "кремний на сапфире", разновидность структуры "кремний на диэлектрике"), ориентированная по наиболее тензочувствительным кристаллографическим направлениям. Монокристаллическое строение тензорезисторов и сапфировой подложки, атомарная связь между ними, высокие диэлектрические свойства и механическая прочность сапфира обеспечивают стабильность, надежность, фактическое отсутствие гистерезиса, значительный выходной сигнал.

Созданы малогабаритные датчики давления с мембранами из кремния, сапфира, и в частности монолитные датчики с мембраной и тензорезисторами на одном кристалле (структура КНК — "кремний на кремнии"), датчики со структурой МДМ — металл—диэлектрик—металл, датчики из многослойных неоднородных полупроводниковых структур (тензорезисторы) с релейными характеристиками, преобразующие набор интервалов давления в дискретный набор электрических сигналов.

В ТР давлений могут использоваться упругие элементы в виде мембран с упором, действующим при значениях давления в области установки порога срабатывания ТР.

В мембранах чувствительность прямо пропорциональна квадрату отношения продольного размера к поперечному, тогда как в других упругих элементах она обычно пропорциональна первой степени этого отношения. Поэтому мембрану выгодно применять для построения ряда ТР на различные пределы измерения. Незначительным диапазоном изменения отношения размеров можно перекрыть значительный диапазон изменения чувствительности. Достоинствами мембраны является также прямолинейность рабочих поверхностей, что делает ее технологичной в изготовлении и облегчает использование деформаций всех зон, а также значительная собственная частота по сравне-



нию с другими упругими элементами при прочих равных условиях.

Сильфонные упругие элементы по сравнению с мембранными имеют большую чувствительность и применяются в высокочувствительных датчиках.

Датчики с упругим элементом в форме цилиндра (рис. 30, д) характеризуются более низкой чувствительностью, чем мембранные, и их целесообразно применять для контроля больших давлений (свыше 5 МПа), особенно при измерениях в труднодоступных местах, где нельзя разместить мембранные датчики. Длина цилиндра должна быть по меньшей мере в 2 раза больше диаметра, чтобы деформация средней тонкостенной части, где размещаются активные тензорезисторы 1, не была уменьшена вследствие влияния повышенной жесткости основания цилиндра. Термокомпенсирующие тензорезисторы 3 помещены на жесткой части. Для лучшего выравнивания температуры элементов датчика и уменьшения его рабочего объема (что важно при контроле давления в ограниченных объемах) служит вкладыш 2. Кожух 4 предохраняет цилиндр и тензорезисторы от внешних воздействий.

Достоинством упругих элементов в виде цилиндрических колпачков и полусфер является малая тепловая инерция, а недостатком — отсутствие зон деформаций с различными знаками.

Для контроля статических и медленно меняющихся давлений от 1 до 50 МПа может использоваться датчик на базе трубки Бурдона от любого технического манометра с наклеенными на нее тензорезисторами. При этом манометр сохраняет возможность использования для визуального контроля давления и проверки датчика.

Получили распространение датчики с неприклеиваемыми (натянутыми) тензорезисторами. Конструкция одного из таких датчиков показана на рис. 30, е. Датчик состоит из двух концентрических трубок, смещающихся при деформации мембраны одна относительно другой в аксиальном направлении и удерживаемых тензорезисторными нитями 1, которые намотаны на колках, укрепленных в трубках в радиальном направлении.

Многие датчики давления снабжены встроенными усилителями сигналов в микроэлектронном исполнении. В датчике разности давления (рис. 31) применен встроенный усилитель. Цилиндрическая мембранная коробка 1 с КНС-структурой 3 закреплена на основании 7 и отделена от контролируемой среды разделительными металлическими мембранами 4, 8. Замкнутые полости между коробкой 1 и мембранами заполнены кремний-органической жидкостью. Контролируемая разность давлений

действует со стороны "плюсовой" камеры через мембраны и жидкость и вызывает прогиб мембраны и изменение сопротивления тензорезисторов 2. Электрический сигнал передается из полости рабочего давления во встроенный электронный усилитель 6 через герметичный вывод 5.

Конструкция датчика по схеме, изображенной на рис. 31, является базовой для датчиков вакуумметрического, избыточного давления—разрежения. Они отличаются от датчиков разности давлений лишь иным оформлением крышек, при котором контролируемое давление подводится к одной камере, а другая камера сообщается с окружающей атмосферой. У датчиков абсолютного давления "минусовая" камера вакуумирована и герметизирована. Датчик гидростатического давления дополнительно имеет мембранный разделительный элемент на вынесенном фланце, который установлен вместо крышки со стороны "минусовой" полости. Диапазон изменения выходного сигнала датчика может составлять 0 ... 5; 0 ... 20 или 4 ... 20 мА.

К выходу датчиков подключаются приборы типа М1730К со светоконтактными вторичными преобразователями, которые могут использоваться в релейных схемах.

Рис. 31. Конструкция датчика разности давлений типа "Сапфир"

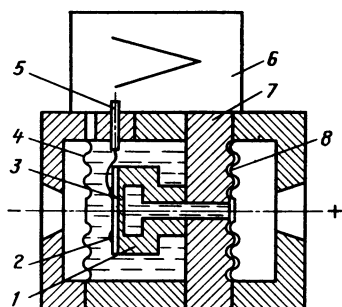
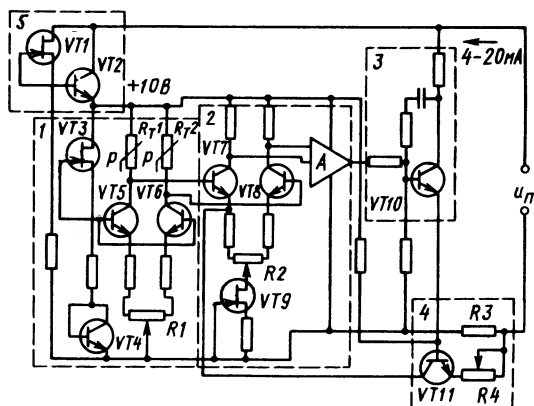


Рис. 32. Схема тензорезисторного датчика давления



Один из возможных вариантов схемы усиления и преобразования сигналов тензорезисторных датчиков давления (пригодной и для других механических величин) в ТР, в частности, датчиков с полупроводниковыми тензорезисторами, иллюстрируется схемой (рис. 32). Тензорезисторы датчика включены в коллекторные цепи транзисторов  $VT5$  и  $VT6$  дифференциального усилителя 1. При действии контролируемого давления нарушается равенство сопротивлений тензорезисторов  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$ , и на выходе усилителя 1 появляется сигнал. После усиления в усилителе постоянного тока 2 этот сигнал поступает на вход преобразователя 3 напряжения в ток. Выходной ток преобразователя, меняющийся в пределах 4 ... 20 мА в зависимости от значения контролируемого давления, создает падение напряжения на резисторе  $R3$  блока обратной связи 4.

Выходной сигнал блока 4 поступает на вход усилителя 2 в противофазе по отношению к прямому сигналу, обеспечивая линеаризацию амплитудной характеристики усилителя 2 и уменьшая зависимость чувствительности датчика от напряжения питания и сопротивления нагрузки. Потенциометр  $R1$  обеспечивает начальную балансировку усилителя 1; потенциометром  $R2$  осуществляется начальная настройка усилителя 2 (при нулевом давлении), обеспечивающая задание преобразователем 3 тока, равного 4 мА; потенциометром  $R4$  регулируется чувствительность датчика: при давлении, соответствующем верхнему пределу диапазона измерения, потенциометром  $R4$  устанавливается выходной ток преобразователя 3, равный 20 мА (при подключении к преобразователю 3 исполнительного реле ТР потенциометром  $R4$  устанавливается значение тока срабатывания реле при заданном значении контролируемого давления). Блок 5 на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  стабилизирует напряжение питания усилителей 1 и 2.

## **6. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ, ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ОБЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Тензорезисторные измерители размеров, перемещений и общих деформаций не являются прецизионными приборами и менее точны, чем оптические приборы, измерительные инструменты микрометрического или рычажно-механического типа, но в отличие от последних они пригодны для дистанционных измерений и использования в системах автоматического контроля и управления.

ТР размеров, перемещений и общих деформаций позволяют осуществлять контроль с точностью до 0,5 % и выше как в статическом, так и в динамическом режиме в диапазоне от тысячных долей до сотен миллиметров при частотах от нуля до десятков килогерц.

Тензорезисторы в ТР помещают на упругих элементах, деформация на поверхности которых пропорциональна контролируемому размеру или перемещению  $\delta$  (рис. 33). Выбор формы и размеров упругих элементов зависит от назначения и рабочего диапазона ТР. Получили распространение консольные балки равного сопротивления изгибу, отличающиеся сравнительно высокой чувствительностью (рис. 33, а). Тензорезисторы располагают ближе к заделке балки, где максимальны деформации. Многие конструкции балочных элементов на свободном конце консоли имеют наконечник, который может перемещаться в направляющей втулке (рис. 33, в). Иногда свободный конец консольной балки не крепится к точке измерения, а только прижимается.

Хорошие результаты дает применение двухконсольных упругих элементов (рис. 33, б). Для расширения диапазона измерений часто используют дополнительные упругие связи, например через плоские или цилиндрические пружины.

Для контроля размеров и линейных перемещений нашли применение упругие элементы в виде арок, в частности, П-образных (рис. 33, г, д), с цилиндрической вставкой (рис. 33, е) и с косинусоидальным выгибом (рис. 33, ж). Пределы измерений датчиков с П-образными упругими элементами в несколько раз больше, чем у консольных, при равной длине стоек и консолей, однако размеры упругих элементов у них существенно выше за счет участка, где размещаются тензорезисторы. Собственная частота при одинаковой чувствительности у П-образных элементов ниже, что ограничивает диапазон динамических

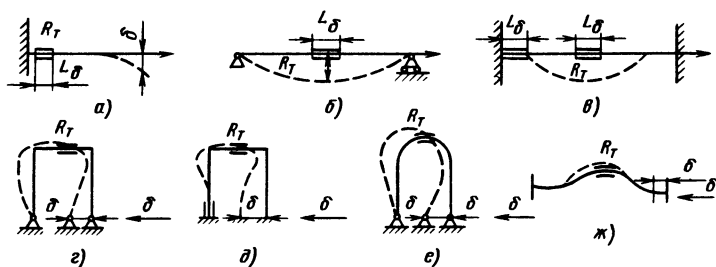


Рис. 33. Конструктивные схемы преобразователей перемещений и деформаций

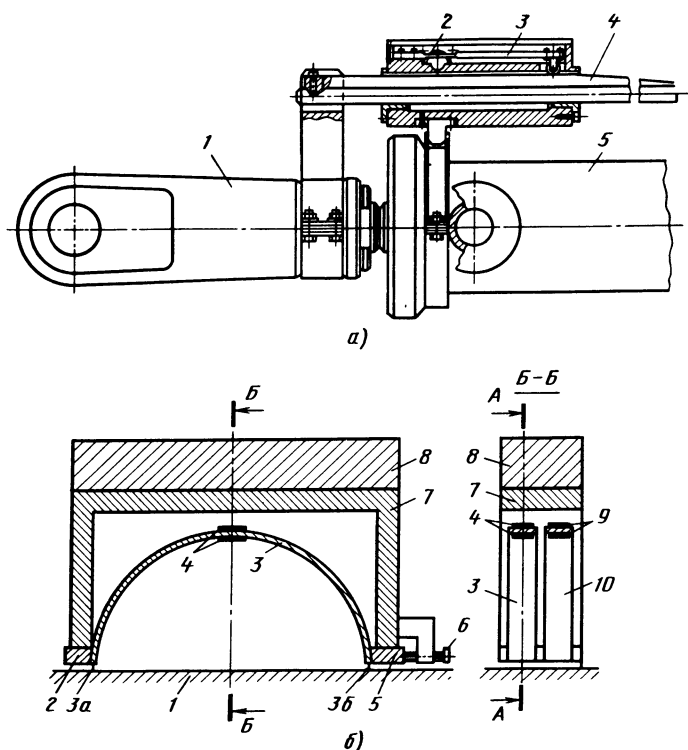


Рис. 34. Конструкции тензорезисторных датчиков общих деформаций и перемещений:

*а* — с балочным упругим элементом; *б* — с арочным упругим элементом

измерений. Особенностью арок с цилиндрической вставкой является малая жесткость в направлении горизонтальной оси и линейная зависимость между сближением концов и деформацией, воспринимаемой тензорезисторами. Пластины с косинусоидальным выгибом, имеющие высокую чувствительность, целесообразно применять для контроля малых перемещений (порядка единиц микрометров), а также для изготовления тензорезисторных тензометров (деформация на поверхности таких пластин превышает деформацию на поверхности исследуемой конструкции).

В разработанном при участии автора тензорезисторном датчике перемещений штока гидроцилиндра (рис. 34, *а*) клиновидная планка 4 жестко связана со штоком 1 цилиндра. От степени выдвижения штока зависит прогиб консольно закреплен-

ной на теле цилиндра 5 стальной балочки 3, на которую наклеены тензорезисторы 2.

В датчике, выполненном на базе арочного элемента (рис. 34, б), упругий элемент 3, в средней части которого наклеены тензорезисторы 4, устанавливается ножками а и б на поверхность 1, деформация которой контролируется. Расстояние между ножками служит измерительной базой. На концах упругого элемента имеются кулачки 2 и 5, на которые устанавливается (непосредственно или с помощью каркаса из ферромагнитного материала) постоянный магнит 8. Кулачок 2 жестко связан с каркасом 7, а кулачок 5 может свободно перемещаться относительно каркаса, для чего между ними помещаются шарики из ферромагнитного материала. Параллельно упругому элементу 3 расположен дополнительный упругий элемент 10 с компенсационными тензорезисторами 9. Балансировка моста, образованного тензорезисторами 4 и 9, осуществляется микрометрическим винтом б, который упирается в упругий элемент 10. Датчик используется при определении смещений и деформаций деталей из ферромагнитных материалов. Он удерживается на контролируемых деталях своей массой или винтами, пропускаемыми через тело каркаса.

Для контроля деформаций и перемещений до нескольких десятков миллиметров и более предложен датчик в виде спиральной пружины, вокруг витков которой намотана тензочувствительная проволока. Витки проволоки приклеены под углом  $45^\circ$  к виткам пружины. Под действием осевой нагрузки витки пружины скручиваются и меняется длина (а следовательно, и сопротивление) приклеенной к ним проволоки.

Для контроля угловых перемещений можно использовать датчики в виде профильных кулачков (например, с профилем, выполненным по спирали Архимеда), связываемых с перемещающимся контролируемым объектом и изгибающих в функции угла поворота консольную балочку с приклеенными тензорезисторами. Конструкция такого датчика подобна задатчику, показанному на рис. 7.

Для непрерывного контроля размеров, перемещений, общих деформаций автором предложено использовать в качестве одного из возможных средств отображения информации линейные газоразрядные индикаторы (ЛИГИ) (рис. 35). Тензорезисторный мост питается от генератора на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ . Максимальной высоте светящегося столба при указанных на схеме номиналах элементов соответствует деформация  $\epsilon = 30 \cdot 10^{-5}$ . Устройство с релейной характеристикой на базе подобной схемы можно построить при использовании ее в сочетании с дополни-

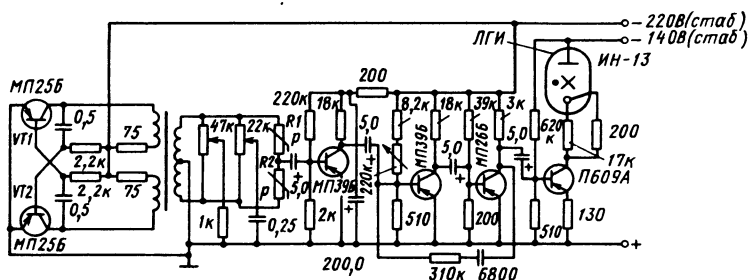


Рис. 35. Схема измерителя перемещений на базе ЛГИ

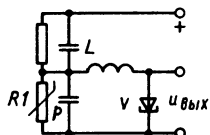


Рис. 36. Схемы измерителей деформаций и перемещений с автогенераторными преобразователями

тельным фотоэлектрическим релейным преобразователем, выдающим сигнал при заданной высоте светящегося столба ЛГИ (например, на базе фотодиода, который засвечивается светящимся столбом ЛГИ при достижении им уровня установки фотодиода), или при использовании ЛГИ с дополнительными сигнальными электродами, в цепи которых начинает протекать ток при достижении их кромкой светящегося столба.

В схеме, предназначенной для контроля динамических смещений со статической составляющей (рис. 36), используется преобразование изменений сопротивления тензорезисторов в изменении частоты. Автогенератор на туннельном диоде  $V$  генерирует колебания с частотой 64 МГц. Изменение сопротивления кремниевого тензорезистора  $R$  приводит к изменению напряжения питания диода  $V$ , а следовательно, к изменению емкости его  $p-n$ -перехода, что вызывает перестройку контура автогенератора, образованного индуктивностью  $L$  и емкостью перехода диода  $V$ .

## 7. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Диапазоны значений параметров движения, которые могут контролировать ТР, достаточно широки. Так, тензорезисторными приборами исследуются вибрации с амплитудами от сотых долей до нескольких миллиметров и выше при частотах от единиц до десятков килогерц, измеряются ускорения от десятых долей до тысяч единиц  $g = 9,8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$  (земного ускорения).

Преимуществами ТР параметров движения по сравнению, например, с распространенными индуктивными приборами этого же назначения являются сравнительно небольшие размеры и масса, высокие чувствительность и стабильность, нечувствительность к переменным магнитным полям, широкий диапазон контролируемых величин (начиная от 0 Гц), питание от низковольтного источника.

При проектировании и эксплуатации датчиков используется определяемая уравнениями динамики связь между параметрами движения (смещением, скоростью и ускорением), позволяющая из одного измеренного параметра путем дифференцирования или интегрирования получать другой.

Выбор конкретных средств для контроля параметров движения в значительной степени зависит от характера движения. Для контроля равномерного и неравномерного движений могут использоваться тензорезисторные датчики смещений относительно некоторой опорной точки, аналогичные применяемым для контроля размеров (см. п. 6 гл. 2). Подобные устройства в сочетании с дифференцирующими цепями могут контролировать скорости. Если возможность использования опорных точек отсутствует, применяются датчики инерционного типа, не требующие связи с неподвижным основанием. В соответствии с законом Ньютона инерционные силы пропорциональны движущейся массе  $m$  и испытываемому ей ускорению  $\ddot{x}$ , т. е.  $P_{ин} = m\ddot{x}$ . Таким образом, если измерить инерционную силу  $P_{ин}$ , то при известной массе  $m$  можно определить ускорение  $\ddot{x}$ , а затем скорость  $\dot{x}$  ( $\dot{x} = \int \ddot{x} dt$ ) и смещение  $x$  ( $x = \int \dot{x} dt$ ), т. е. задача контроля параметров движения сводится к измерению силы (см. п. 2 гл. 2).

Датчики инерционного типа содержат инерционную (сейсмическую) массу, соединенную упругим элементом с основанием (корпусом), и демпфер, который гасит свободные колебания массы. В моменты, когда корпус датчика испытывает ускорение, сейсмическая масса, обладающая инерцией, приходит в движение относительно корпуса; этому движению противодействует жесткость упругого элемента. Деформация последнего является мерой силы инерции, а следовательно, и контролируемого параметра движения. Собственная частота  $f_0$  датчика является функцией массы, жесткости упругого элемента и коэффициента демпфирования. От соотношения величины  $f_0$  и частоты  $f$  контролируемого процесса зависит, какой именно параметр движения измеряется датчиком. При контроле смещений и частот величина  $f_0$  должна быть значительно меньше  $f$  ( $f \geq 3f_0$ ), а



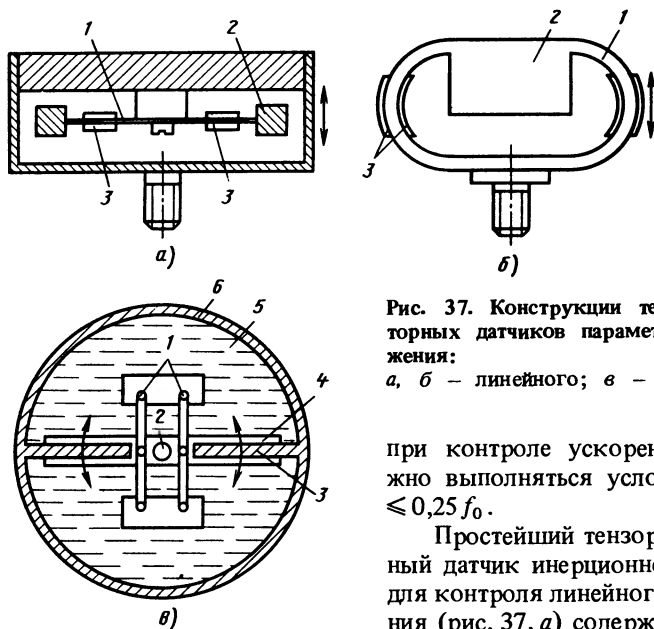


Рис. 37. Конструкции тензорезисторных датчиков параметров движения:

а, б — линейного; в — углового

при контроле ускорений должно выполняться условие  $f \leq \leq 0,25 f_0$ .

Простейший тензорезисторный датчик инерционного типа для контроля линейного движения (рис. 37, а) содержит массу 2 на конце упругой консоли

1. Тензорезисторы 3 наклеены на верхней и нижней поверхностях балочки в районе мест ее заделки. Корпус датчика заполнен демфирующей жидкостью (например, полидиметилсилоксановой). Собственная частота такого датчика и вес  $P_n$  массы, необходимой для получения деформации  $\epsilon$  у основания балочки при ускорении  $ng$ , соответственно

$$f_0 = \frac{0,61}{l} \sqrt{\frac{nh}{\epsilon}}, \quad P_n \approx \frac{\epsilon E b h^2}{6nl},$$

где  $l, h, b$  — свободная длина, толщина и ширина балочки из материала с модулем упругости  $E$ .

В датчике, показанном на рис. 37, б, упругий элемент 1 и инерционная масса 2 выполнены из одного куска металла, что обеспечивает высокую собственную частоту и достаточную упругость, необходимые для контроля ударных ускорений.

Для контроля больших ускорений получили применение датчики с призматическими или цилиндрическими (сплошными или полыми) упругими элементами, работающими на сжатие под действием инерционных сил сейсмической массы.

Для контроля вибросмещений используется ряд датчиков

с сейсмической массой, подвешенной на витой пружине, и тензорезисторами, наклеенными на дополнительной упругой пластине с цилиндрическим выгибом, а также датчики в виде маятника с сейсмической массой, который может качаться вокруг оси. Уравновешивание маятника осуществляется пружиной; тензорезисторы размещают непосредственно на основной пружине упругой подвески или на дополнительном упругом элементе, повышающем чувствительность датчика.

В датчике высокой чувствительности (рис. 37, в) используются неприклеиваемые тензорезисторы в виде нитей 1. Датчик снабжен полой крыльчаткой 4, вращающейся на оси 2 или на шарнире в виде перекрещивающихся плоских пружин и удерживаемой натянутыми нитями 1, выполняющими роль упругого элемента. Крыльчатка окружена лабиринтовой перегородкой 3. Если корпус 6 испытывает угловое ускорение относительно оси крыльчатки, то масло 5 устремляется из одной половины корпуса в другую, действуя на крыльчатку, а следовательно, и на тензорезисторные нити, с силой, пропорциональной угловому ускорению.

Принципы построения электрических систем ТР параметров движения иллюстрируются приведенной на рис. 38 схемой индикаторного устройства для контроля вибраций турбин, электрогенераторов и т. п., в котором для оценки уровня вибрации используется виброскорость. На вход устройства через потенциометр  $R1$  установки чувствительности схемы подается предварительно проинтегрированный сигнал тензорезисторного датчика перемещений или предварительно проинтегрированный сигнал тензорезисторного датчика ускорений одного из рассмотренных выше видов. Сигнал датчика дополнительно усиливается в транзисторе  $VT1$  и направляется в интегратор на транзисторе  $VT2$  с интегрирующим конденсатором  $C1$ .

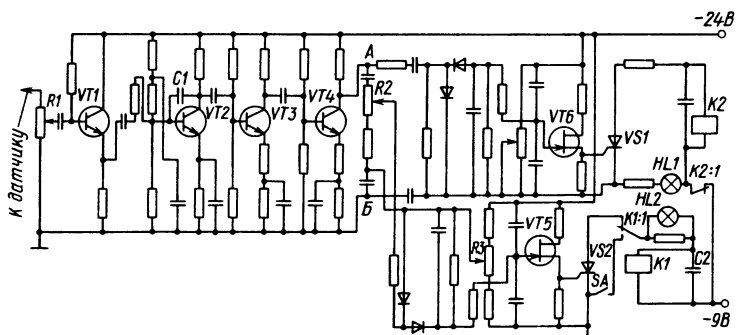


Рис. 38. Схема ТР для контроля вибраций

Напряжение на выходе интегратора пропорционально среднему квадратичному значению скорости за период в несколько секунд, благодаря чему устройство не реагирует на кратковременные повышения уровня вибрации в переходных режимах. Интегрированный сигнал после усиления транзисторами *VT3* и *VT4* поступает в каналы аварийной сигнализации и самоконтроля. Сигнал на вход канала сигнализации поступает с потенциометра *R2*. Если вибрация превысит уровень, установленный потенциометром *R3*, то возбуждается генератор на однопереходном транзисторе *VT5* и его импульсы включают тиристор *VS2*. При этом зажигается сигнальная лампа *HL2* и с задержкой, определяемой емкостью конденсатора *C2*, срабатывает реле *K1*.

Если тумблер *SA* разомкнут, то лампа выключается при уменьшении уровня вибрации до нормального; при включенном тумблере лампа *HL2* горит и после снижения уровня вибрации. Канал самоконтроля подобен каналу аварийной сигнализации. В нормальных условиях лампа *HL1* горит непрерывно. Если же напряжение на зажимах *A* и *B* падает ниже установленного уровня, то возбуждается генератор на транзисторе *VT6*, в цепи тиристора *VS1* возникают импульсы, и лампа *HL1* начинает мигать, что свидетельствует о неисправности датчика, соединительного кабеля, контролируемого объекта или самого индикаторного устройства.

## 8. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ РАСХОДОВ ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ СРЕД

На базе ТР могут быть построены сравнительно простые и надежные устройства для измерения расходов жидкостей и газов, обнаружения нарушений циркуляции среды в трубопроводах, изменений направления потока, недопустимых повышений для понижений скорости потока (объемных и массовых расходов) и т. п.

В датчике расхода газа (воздуха), показанном на рис. 39, *а*, используется упругая тонкая мембрана (толщиной 0,1 мм) с центральным отверстием, которая прогибается под действием давления контролируемого потока. При этом возникают зависящие от расхода напряжения в полупроводниковых тензорезисторах 2, размещенных на мембране в месте ее заделки в корпус датчика.

В датчике расхода (скорости потока) жидкости, показанном на рис. 39, *б*, мембрана 2 жестко закреплена в верхней части герметичной коробки 3, на дне которой имеется герметичный

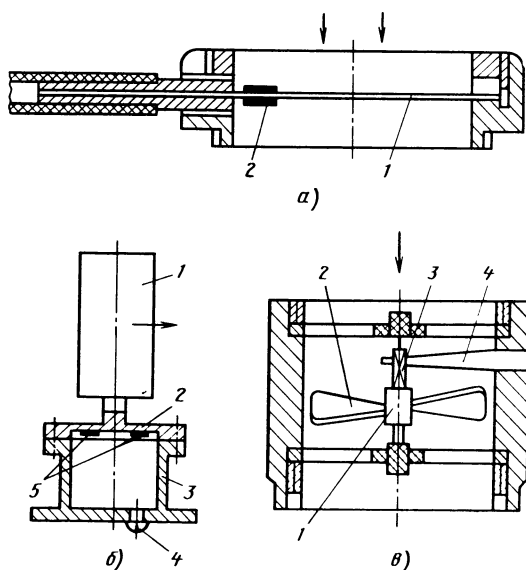


Рис. 39. Конструкции датчиков расхода

ввод 4. Усилие от воздействия потока жидкости на тело вращения 1, закрепленное в центре мембраны (сила лобового сопротивления), вызывает деформацию мембраны, которая измеряется в двух направлениях четырьмя парами тензорезисторов 5, наклеенных под углом  $90^\circ$  друг к другу на внутренней поверхности мембраны 2. По сигналам тензорезисторов можно судить о значении и направлении скорости контролируемого потока.

Известны датчики подобного типа, в которых контролируемый поток газа непосредственно действует на консольно закрепленную пластину с тензорезисторами. Используя малогабаритные полупроводниковые тензорезисторы, можно обходиться пластинами с малыми рабочими поверхностями (например,  $1,5 \times 1,5$  мм), не вносящими существенных искажений в контролируемый поток.

Связь между скоростью потока  $v$  и силой лобового сопротивления  $P_{л.с}$  определяется формулой

$$P_{л.с} = C_{л.с} \frac{\rho v^2}{2} F,$$

где  $C_{л.с}$  — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от угла между направлением скорости и длиной пластины;  $\rho$  —

плотность газа в исследуемом потоке;  $F$  — площадь рабочей части пластинки.

Датчики, показанные на рис. 39, *а*, *б*, могут использоваться в схемах ТР, аналогичных показанным на рис. 16 и 17.

В датчике с крыльчаткой (турбинный датчик) (рис. 39, *в*) измерение расхода (объема) прошедшего через него газа сводится к измерению количества импульсов, поступивших с тензорезисторного моста (валик 1 крыльчатки 2 имеет четырехгранный кулачок 3, соприкасающийся с концом балки 4, на которой наклеены тензорезисторы; за один оборот крыльчатки тензорезисторный мост выдает четыре импульса). Импульсы датчика после предварительного усиления поступают в формирующее устройство (триггер Шмитта), а затем через эмиттерный повторитель и ключ в счетчик. При использовании программных счетчиков (например, типа Ф5007) можно получать командные сигналы для включения различных исполнительных органов после поступления числа импульсов, соответствующего заданному объему газа. По частоте импульсов можно судить о скорости контролируемого потока.

ТР с турбинными датчиками отличаются широким диапазоном контролируемых расходов, незначительным перепадом давлений на датчике, малой постоянной времени; недостатком является зависимость характеристик от физических свойств контролируемой среды.

ТР расходов жидкостей и газов могут строиться на базе датчиков разности давлений, например, подобных показанному на рис. 31.

## **9. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ РАЗРУШЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

В процессе эксплуатации различных машин и сооружений, испытаний их на прочность, устойчивость, надежность, безопасность часто возникает необходимость в раннем обнаружении разрушений, обусловленных перегрузкой элементов, их изнашиванием и коррозией, усталостью материала и т. п., а также в индикации местонахождения разрушений, направления и темпов развития. Во многих случаях эти задачи успешно решаются ТР.

Создан ряд разновидностей ТР разрушений, в которых используются: а) проволочные и фольговые сигнализаторы появления трещин (повреждений) (см. п. 3 гл. 1); б) определение величин и соотношений относительных деформаций или напря-

жений в различных участках контролируемого объекта; в) определение соотношений между нагружающими воздействиями и соответствующими им деформациями контролируемого объекта; г) определение резонансных частот контролируемого объекта.

Устройства, выполненные на базе сигнализаторов повреждений, отличаются простотой при достаточной надежности.

Приклейка сигнализатора должна обеспечивать минимальный сдвиг между проволокой и ее подслоем для сведения к нулю эффективной длины участка проволоки, который должен разрушиться из-за трещины.

Усталостная прочность материала сигнализатора должна быть выше, чем у материала детали, на которую его наклеивают. Если нужно получить предупредительный сигнал несколько раньше, чем образуется трещина, материал сигнализатора выбирают с более низкой усталостной прочностью. Для этих же целей используют предварительное циклическое нагружение сигнализаторов, уменьшающее их ресурс, повышение уровня напряжений в сигнализаторе путем использования промежуточных элементов (подложек) в виде металлических пластин с концентраторами напряжений или за счет применения сигнализаторов с большим модулем упругости, чем у материала контролируемой детали.

Сигнализаторы позволяют обнаруживать трещины с раскрытием 3 — 4 мкм (в ненагруженном состоянии контролируемой детали).

Для индикации срабатывания сигнализаторов их непосредственно, через усилители (рис. 40, а), ключевые и подобные схемы подключают к электромагнитным реле или другим исполнительным органам. К одному исполнительному органу иногда подключают несколько соединенных последовательно сигнализаторов. Для определения сигнализатора, поврежденного трещиной, используются опросные устройства на бесконтактных элементах, например, на транзисторных и тиристорных многофазных мультивибраторах и ключах. При создании многоканальных опросных устройств целесообразно использовать микроЭВМ, позволяющие осуществлять ручной адресный опрос подключаемых сигнализаторов, автоматический циклический непрерывный опрос всех сигнализаторов с выдачей сигналов на исполнительные органы, занесением в память и индикацией номера сработавших сигнализаторов и количеств циклов нагружения (эксплуатационных или испытательных) до разрушения, с исключением из числа опрашиваемых уже сработавших и зарегистрированных сигнализаторов.

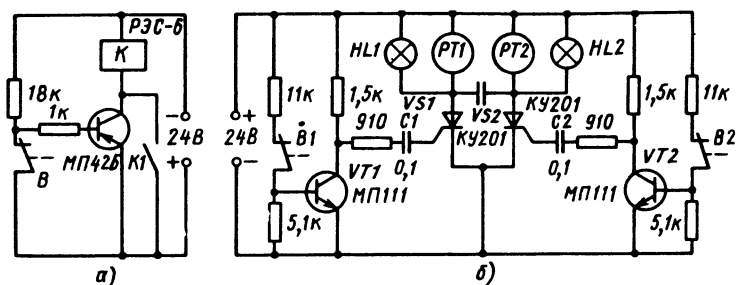


Рис. 40. Устройства с сигнализаторами трещин:  
 а – схема подключения сигнализатора к исполнительному реле; б – схема устройства для определения последовательности разрушений

Для выявления характера и обстоятельств эксплуатационных разрушений иногда возникает необходимость в определении последовательности разрушений элементов конструкций. Устройство (рис. 40, б), предложенное автором для решения подобных задач, представляет собой триггер на тиристорах  $VS1$  и  $VS2$ , переключаемый по командам пороговых схем на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , которые управляют соответственно сигнализаторами трещин  $B1$  и  $B2$ . До появления разрушения тиристоры заперты, измерители времени  $PT1$  и  $PT2$  (например, электросекундомеры) и сигнальные лампы  $HL1$  и  $HL2$  отключены.

Если первым разрушается элемент, на который наклеен сигнализатор  $B1$ , то при срабатывании последнего напряжение на коллекторе транзистора  $VT1$  скачком увеличивается, и через дифференцирующий конденсатор  $C1$  на управляющий электрод тиристора  $VS1$  поступает положительный импульс. При этом тиристор  $VS1$  включается, зажигается лампа  $HL1$  и запускается измеритель времени  $PT1$ . После того как происходит второе разрушение и срабатывает сигнализатор  $B2$ , через конденсатор  $C2$  поступает положительный импульс, переключающий триггер. При этом тиристор  $VS2$  включается, тиристор  $VS1$  запирается, и измеритель времени  $PT1$  останавливается, отсчитав время между двумя разрушениями. Если первым разрушается элемент, на котором наклеен сигнализатор  $B2$ , то время между разрушениями показывает измеритель  $PT2$ . Таким образом, по показаниям измерителей времени и состоянию сигнальных ламп после второго разрушения можно судить о том, какое из двух разрушений было первичным.

Эффективно применение проволочных и фольговых сигнализаторов для контроля за развитием трещин. Для этих целей

используют решетки из параллельных проводников, располагаемых перпендикулярно к предполагаемому направлению развития трещины. Решетки с различным шагом и числом проводников любых конфигураций, приспособленных для использования применительно к типовым конструктивным элементам, особенно удобно изготовлять из фольги.

Для регистрации процесса развития повреждений (в частности, усталостных трещин в процессе испытаний на выносливость) при участии автора разработан прибор (рис. 41) (А.с. 777434 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 D 21/02). Сигнализаторы 1 соединяются последовательно. Каждый из них шунтируется резистором 2 с заданным сопротивлением, а группы сигнализаторов зашунтированы дополнительно конденсатором 3 определенной емкости (для увеличения числа одновременно подключаемых к прибору сигнализаторов). Номиналы резисторов 2 и конденсаторов 3 должны соответствовать условию: сумма нескольких номиналов не совпадает с номиналами ни одного из отдельных резисторов 2 или конденсаторов 3 (например, номиналы выбираются из ряда 1, 2, 5, 10, 20, 50 и т. д.).

Последовательную цепь сигнализаторов 1 подключают к входу цифрового прибора (например, типа Р5016), измеряющего активную и емкостную составляющие сопротивления. Когда все сигнализаторы целы, прибор 6 измеряет значения сопротивления и емкости подводящих проводов и сигнализаторов. При разрыве хотя бы одного из сигнализаторов скачком меняется сопротивление их цепи, и это приводит к скачкообразному изменению напряжения, приложенного от прибора 6 к цепи сигнализаторов 1. В формирователе 7 скачок напряжения дифференцируется, и из него после усиления формируется командный сиг-

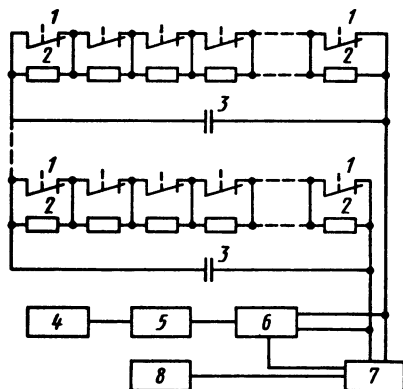


Рис. 41. Схема прибора для контроля развития трещин



нал, воздействующий на цепи внешнего запуска прибора 6, преобразователя 5 сигналов и цифропечатающего устройства 4. Этот же сигнал можно использовать для действия на исполнительный орган 8 системы управления и др. Анализируя результаты измерений прибора 6 или запись цифропечатающего устройства 4, можно определить, какой из сигнализаторов 1 сработал.

Для контроля раскрытия трещин используются датчики по типу показанного на рис. 34 при установке его ножек *a* и *б* на различных берегах трещины. Тензорезисторы таких датчиков включают в схемы, подобные приведенным на рис. 16 и 17.

Для обнаружения разрушений закрытых мест конструкции, в которых непосредственно нельзя наклеить сигнализаторы разрушений или тензорезисторы, предложен метод статистической тензометрии [6]. Его сущность заключается в том, что вблизи предполагаемых, но недоступных мест разрушения контролируемой конструкции устанавливают группы тензорезисторов и производят серии измерений через определенные промежутки времени (после определенного числа циклов нагружения). Если согласно критерию, используемому, например, распределение Стьюдента, средние значения измеряемого параметра для *i*-й и (*i* + 1)-й выборки существенно не изменились, то не изменилось и напряженное состояние конструкции. В противном случае можно говорить об обнаружении разрушения. Иллюстрацией метода могут служить результаты контроля деформаций в процессе усталостных испытаний обшивки фюзеляжа самолета в районе стыковки листов обшивки, где были наклеены тензорезисторы 1 – 7 (рис. 42, *a*). Через каждые 2000 – 5000 программных блоков нагружения, каждый из которых соответствует одному типовому полету, цифровым тензометрическим мостом типа ЦТМ-3 выполнялись измерения, их результаты подвергались статистической обработке на ЭВМ. При появлении трещин в обшивке в процессе испытаний, подтвержденном рентгеноскопией, наблюдалось (рис. 42, *б*) изменение относительной деформации  $\epsilon$ , зарегистрированное тензорезисторами (номера графиков на рис. 42, *б* соответствуют номерам тензорезисторов, показанных на рис. 42, *a*).

ТР разрушений, использующие метод статистической тензометрии, выполняются на базе логических анализаторов. Принцип их работы состоит в измерении сопротивлений тензорезисторов с заданной периодичностью (например, по командам программных устройств после отсчета заданных интервалов времени или количеств циклов нагружения контролируемого объекта) и выдаче сигналов для исполнительных органов ТР при совпадении получаемых данных с одной из комбинаций, записан-

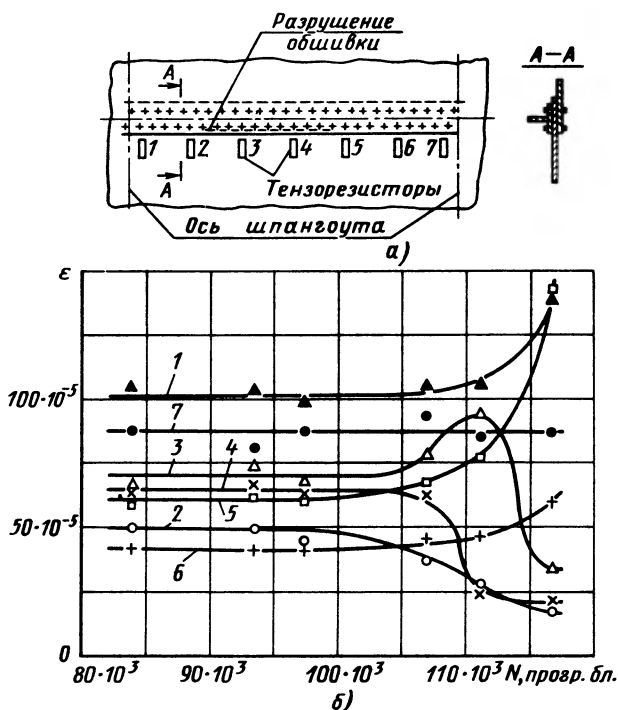


Рис. 42. Контроль деформаций фюзеляжа самолета в процессе усталостных испытаний:

*а* — размещение тензорезисторов; *б* — графики изменений деформаций в функции числа программных блоков нагружения

ных в памяти набором из цифр, соответствующих признакам разрушений.

Появление усталостных и иных повреждений (например, износа сочленений, ослабления соединений и т. п.) приводит к нарушению пропорциональности между действующими нагрузками (усилиями, моментами, давлениями) и вызываемыми ими деформациями элементов контролируемых объектов, что можно обнаружить по появлению отличной от нуля разности между предварительно нормированными сигналами датчиков нагрузок и деформаций (А.с. 947697 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 N 3/32). Значение разностного сигнала при этом может служить для оценки размеров повреждений.

В одном из возможных вариантов ТР, разработанных автором и реализующих подобный метод (рис. 43), используются тензорезисторные датчики прикладываемых к контролируемому

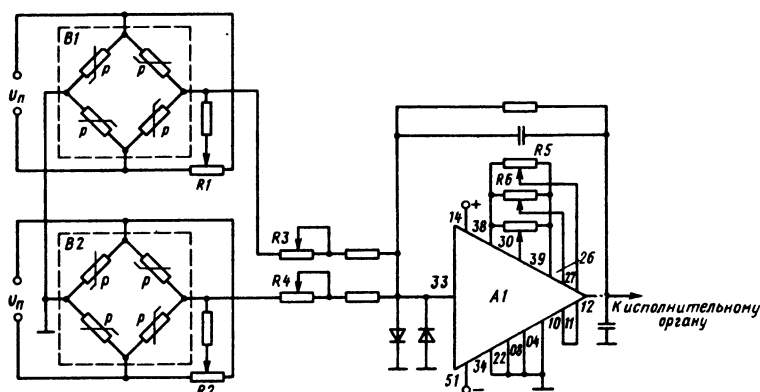


Рис. 43. Схема ТР соотношения нагрузок и обусловленных ими деформаций

му объекту нагрузок и деформаций *B1* и *B2*. Сигналы датчиков нормируются с помощью переменных резисторов *R3* и *R4* и вычитаются в суммирующем усилителе на базе микросборки *A1*. К выходу усилителя подключается измерительный прибор (например, миллиамперметр) и компаратор, включающий исполнительный орган ТР при достижении разностью сигналов датчиков *B1* и *B2* уровня, который соответствует определенному значению размеров повреждений. Тензорезисторные мосты балансируются резисторами *R1* и *R2*. Порог чувствительности ТР составляет  $\epsilon = (3 \div 5) \cdot 10^{-5}$ .

ТР, выполненные по схеме, подобной рис. 43, применимы для обнаружения разрушений и по изменению соотношений величин относительных деформаций в элементах контролируемого объекта. В этом случае в качестве датчиков *B1* и *B2* используются тензорезисторы, наклеиваемые на элементы контролируемого объекта, в которых при возникновении разрушений изменения деформаций имеют различные знаки, например, тензорезисторы 2 и 5 (см. рис. 42) при контроле разрушения обшивки фюзеляжа.

Автором предложен прибор (рис. 44) для контроля развития разрушений по изменению резонансных частот контролируемого объекта. Принцип работы прибора основан на контроле изменений частоты в резонансном автоколебательном контуре, включающем в себя контролируемый объект 1, возбудитель 2 колебаний объекта, тензорезисторный датчик 3 параметров колебаний (вибрационных смещений, скоростей или ускорений), осуществляющий положительную обратную связь от

**Рис. 44.** Структурная схема прибора для контроля разрушений по изменению резонансной частоты контролируемого объекта

объекта к возбудителю колебаний, полосовой частотный фильтр 4, пропускающий сигналы с частотами в области изменений одной из собственных частот объекта (при контроле многорезонансных объектов), фазовращатель 5 для настройки оптимальных фазовых соотношений в контуре, усилитель мощности 6. Фазовращатель настраивается

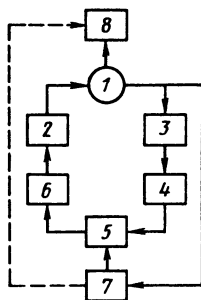
автоматически с помощью экстремального регулятора 7, поддерживающего максимальное значение амплитуды колебаний, которой соответствуют колебания на резонансной частоте объекта.

Резонансные колебания в зависимости от соотношений параметров элементов контура возбуждаются либо самопроизвольно при замыкании контура (мягкий режим), либо при действии начального толчка (жесткий режим), причем автоматически отслеживаются изменения резонансной частоты (условия возбуждения и особенности резонансных автоколебательных систем рассматриваются в п. 3 гл. 3).

Для контроля частоты автоколебаний используется частотомер 8, получающий сигналы от датчика 3, или усилителя 6. Для получения сигналов при достижении определенных стадий разрушения, сопровождающихся соответствующими изменениями резонансной частоты контролируемого объекта 1, можно использовать встроенные в частотомер электро- или светоконтактные преобразователи (промышленностью выпускаются частотомеры типов Э393, Э394, Ц1736 и др. с подобными преобразователями). Чувствительность прибора зависит от характеристик регулятора 7 и частотомера 8.

Реализация метода контроля разрушений по изменению резонансных частот объекта особенно удобна при контроле конструкций, испытываемых на устойчивость или прочность на автоколебательных резонансных установках (см. п. 3 гл. 3).

Наряду с рассмотренными устройствами для обнаружения разрушений конструкций применимы ТР, использующие косвенные проявления разрушений. Так, разрушения некоторых конструкций можно обнаружить по нарушению их герметичности, вызывающему утечку жидкости, которая оценивается до деформации накопителя жидкости, например, в виде мембраны с наклеенными на ее нижнюю поверхность тензорезисторами.



## ГЛАВА 3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ РЕЛЕ

### 1. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ

ТР широко используются в автоматических регуляторах сил, моментов, давлений и других величин, для преобразования которых в электрический сигнал целесообразно применение тензорезисторных датчиков.

Простейшие автоматические релейные регуляторы позиционного действия строятся на базе однопороговых (двух- и трехпозиционных) и многопороговых ТР, настройка которых определяет предельные уровни регулируемого параметра (например, ТР по схемам рис. 16).

При участии автора разработан (рис. 45) трехпозиционный релейный регулятор на базе однопорогового трехпозиционного ТР, обладающего повышенными устойчивостью и точностью за счет введения широтно-импульсной модуляции и обеспечения подхода к положению равновесия всегда с одной стороны (А.с. 453669 СССР, МКИ<sup>4</sup> G05b 11/28). Для обратной связи служит датчик с полупроводниковыми тензорезисторами  $R1$  и  $R2$ , изменения сопротивлений которых при изменениях регулируемого параметра имеют противоположные знаки. Задатчиком служит потенциометр  $R3$ .

При реализации многоступенчатых программ используется несколько задающих потенциометров (по числу ступеней реализуемой программы), включаемых в схему по сигналам программного устройства. При реализации программ, предусматривающих аналоговое изменение регулируемого параметра, в качестве задатчика можно использовать выходной потенциометр программного устройства, например, устройства с фотоэлектрическим считыванием программ, задаваемых в виде рисованных графиков, и т. п. При следящем регулировании задатчиком служит потенциометрический или тензорезисторный датчик ведущего параметра. Датчик  $B$  с задатчиком включены в мостовую схему сравнения, в измерительную диагональ которой, где формируется сигнал рассогласования регулятора, включено поляризованное бесконтактное реле на транзисторах  $VT1 - VT4$ .

Для минимизации зоны нечувствительности к входу поляризованного реле подключен выход модулирующего автоколебательного мультивибратора на транзисторах  $VT5, VT6$ . Импульсы от мультивибратора подаются на базы транзисторов  $VT1$  и  $VT4$

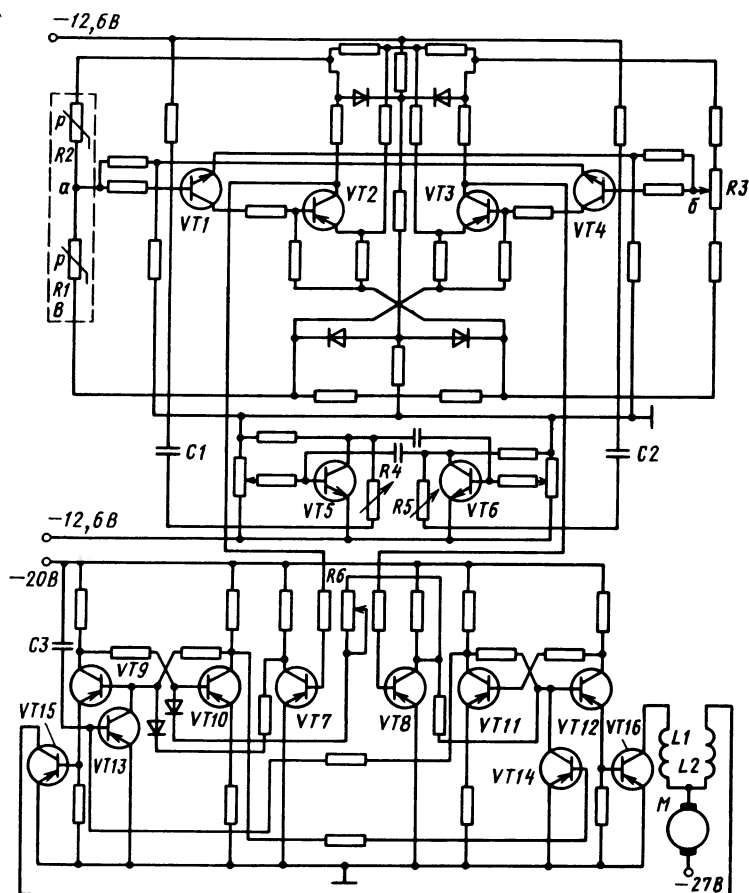


Рис. 45. Схема релейного регулятора на базе однопорогового трехпозиционного ТР

параллельно сигналу рассогласования. Резисторами  $R4$  и  $R5$  амплитуда импульсов устанавливается такой величины, что при отсутствии сигнала рассогласования разность потенциалов между базой и эмиттером транзисторов  $VT1$ ,  $VT4$ , обусловленная тем, что импульсы на базы этих транзисторов подаются в противофазе, не достигнет порогового значения. Таким образом обеспечивается предельно малая ширина зоны нечувствительности поляризованного реле.

Выходные сигналы поляризованного реле через инверторы

на транзисторах *VT7* и *VT8* действуют на пороговые элементы, выполненные в виде триггеров на транзисторах *VT9*, *VT10* и *VT11*, *VT12*. Первый из них управляется по двум входам. В исходном состоянии (т. е. при отсутствии управляющих сигналов на входах триггера) транзистор *VT9* закрыт, а транзистор *VT10* открыт. По сигналу на входе (база транзистора *VT9*) триггер устанавливается в рабочее положение (транзистор *VT9* открыт, а транзистор *VT10* закрыт), по сигналу на втором входе (база транзистора *VT10*) — в исходное. Для автоматической установки триггера в исходное состояние после подачи питания применена схема из конденсатора *C3* и транзистора *VT13*, одновременно являющегося (как и транзистор *VT14*) усилителем сигнала обратной связи.

Триггер на транзисторах *VT11*, *VT12* выполнен одностабильным (за счет подбора сопротивлений резисторов в эмиттерных цепях транзисторов), так что при отсутствии сигнала на входе (база транзистора *VT12*) он всегда находится в исходном состоянии (транзистор *VT11* открыт, а транзистор *VT12* закрыт). Триггеры управляют работой усилителей мощности на транзисторах *VT15*, *VT16*, нагрузками которых являются обмотки *L1* и *L2* исполнительного электродвигателя постоянного тока *M*.

Резистор *R6* служит для регулирования значения сброса при работе системы подхода к положению равновесия всегда с одной стороны. Эта система предназначена для сведения к минимуму гистерезиса статической характеристики регулятора, вызываемого влиянием люфтов в элементах исполнительных, регулирующих органов и др.

Регулятор работает следующим образом. Разность потенциалов, создаваемая импульсами мультивибратора на входе поляризованного реле, при отсутствии разбаланса моста сравнения недостаточна для срабатывания реле, и оно находится в "нейтральном" состоянии, которому соответствует высокий отрицательный потенциал на коллекторах транзисторов *VT2*, *VT3*. Этим потенциалом инверторы на транзисторах *VT7*, *VT8* удерживаются в открытом состоянии, и на триггеры не поступают управляющие сигналы, т. е. они находятся в исходном состоянии.

Триггер, выполненный на транзисторах *VT9*, *VT10*, устанавливается в исходное состояние за счет кратковременного соединения базы транзистора *VT9* с шиной "+" питания через переход коллектор—эмиттер транзистора *VT13*, открывающегося при включении питания током заряда конденсатора *C3*. Одностабильный триггер, построенный на транзисторах *VT11*, *VT12*, при отсутствии входного сигнала всегда находится в исходном

состоянии. В исходном состоянии обоих триггеров усилители на транзисторах  $VT15$ ,  $VT16$  закрыты, и обе обмотки двигателя  $M$  обесточены. При появлении сигнала рассогласования (разбаланса моста сравнения) он суммируется с импульсами мультивибратора, и в зависимости от полярности сигнала рассогласования на коллекторе одного из транзисторов  $VT2$ ,  $VT3$  появляется импульсный сигнал с частотой, задаваемой мультивибратором, и длительностью, определяемой значением разбаланса.

С увеличением разбаланса длительность импульсов растет, так как при увеличении постоянной составляющей импульсного сигнала на входе реле срабатывает раньше и отпускает позже, т. е. имеет место широтно-импульсная модуляция. Наконец, при определенном значении разбаланса на соответствующем выходе поляризованного реле будет низкий отрицательный потенциал (что обуславливается увеличением входного сопротивления транзистора реле), и дальнейший рост разбаланса не приводит к изменению сигнала на выходе поляризованного реле.

При большом положительном разбалансе моста сравнения (когда  $v_6 > v_a$ , где  $v_a$ ,  $v_6$  — потенциалы в точках  $a$  и  $b$ ) на коллекторе транзистора  $VT3$  низкий отрицательный потенциал, недостаточный для отпираания инвертора на транзисторе  $VT8$ . Высокий отрицательный потенциал на его коллекторе перебрасывает триггер на транзисторах  $VT11$ ,  $VT12$  в рабочее состояние, и подается питание в обмотку  $L1$  двигателя  $M$ . Двигатель начинает обрабатывать рассогласование между фактическим и заданным значениями регулируемого параметра.

По мере подхода к заданному значению параметра сопротивления тензорезисторов  $R1$  и  $R2$  датчика  $B$  меняются так, что разбаланс моста сравнения уменьшается и на коллекторе транзистора  $VT3$  появляется импульсный сигнал с частотой, задаваемой мультивибратором, и длительностью, убывающей по мере подхода к положению равновесия. Этот сигнал через инвертор на транзисторе  $VT8$ , триггер на транзисторах  $VT11$ ,  $VT12$  и усилитель  $VT16$  управляет работой двигателя, обеспечивая подход к положению равновесия с шагом, длительность которого убывает по мере приближения к положению равновесия, что сводит к минимуму возможность возникновения автоколебаний и переуправливания.

При отрицательном разбалансе ( $v_a > v_6$ ) моста сравнения появляется сигнал на коллекторе транзистора  $VT2$ . Независимо от амплитуды отрицательного разбаланса, а следовательно, и от вида сигнала на коллекторе транзистора  $VT2$  (как и сигнал на коллекторе транзистора  $VT3$ , он может быть в виде постоянного низкого отрицательного потенциала или в виде импульсов час-



тоты, задаваемой мультивибратором) сигнал инвертора на транзисторе *VT7* перебрасывает в рабочее состояние триггер на транзисторах *VT9*, *VT10*. При этом на базу транзистора *VT15* подается отпирающий сигнал и запитывается обмотка *L2* двигателя *M*.

После перехода триггера в рабочее состояние никакие изменения сигнала на коллекторе транзистора *VT2* не влияют на состояние триггера; поэтому в процессе отработки рассогласования двигатель с номинальной скоростью пройдет положение равновесия, после чего на измерительной диагонали моста сравнения появится положительное напряжение. При этом возникает импульсный сигнал на коллекторе транзистора *VT3*, а следовательно, и на коллекторе транзистора *VT8*. При достижении сигналом на транзисторе *VT8* определенного уровня триггер на транзисторах *VT9*, *VT10* перебрасывается в исходное состояние сигналом, поступающим на второй вход. Теперь подход к равновесию происходит со стороны положительных значений рассогласования.

Значение заброса через положение равновесия устанавливается резистором *R6*. Для исключения возможности одновременной подачи питания в обе обмотки двигателя *M* применена перекрестная обратная связь с триггера на триггер, препятствующая переводу одного из триггеров в рабочее состояние, если второй триггер уже находится в рабочем состоянии.

Усилителями сигналов в цепях обратной связи служат транзисторы *VT13*, *VT14*. Сигналы на базы этих транзисторов подаются соответственно с коллекторов транзисторов *VT1* и *VT10*. Высокий отрицательный потенциал на коллекторах этих транзисторов появляется только в рабочем состоянии соответствующего триггера. Этим потенциалом открывается усилитель обратной связи. Через переход коллектор—эмиттер транзистора усилителя, имеющий малое сопротивление в открытом состоянии, база транзистора *VT9* или *VT12* соединяется с шиной “+” питания, что не позволяет установить триггер в рабочее состояние даже при наличии сигналов на его входе. Рассмотренный процесс повторяется каждый раз после появления рассогласования вследствие внешних возмущений или при изменениях сигнала задания.

Подобный регулятор при использовании в качестве исполнительного органа электродвигательного механизма типа МП-100МТ с поступательным движением выходного штока обеспечивает точность отработки перемещений  $\pm 0,005$  мм при максимальном ходе штока 50 — 80 мм.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор с тензорезисторным датчиком обратной связи



(рис. 46) может работать как в аналоговом, так и в релейном режиме (в зависимости от характеристик используемого исполнительного органа).

Сигнал датчика (например, динамометрического) после усиления в нормирующем усилителе на микромодуле *A1* с выходным сигналом в диапазоне  $-10\text{ В} \dots 0 \dots +10\text{ В}$  направляется на инвертирующий вход суммирующего операционного усилителя *A2*, выполняющего роль схемы сравнения (грубая и точная начальная балансировка тензорезисторного моста датчика *B* производится соответственно резисторами *R1* и *R2*; установка усиления усилителя осуществляется резистором *R3*). На неинвертирующий вход усилителя подается сигнал от задатчика. С выхода схемы сравнения сигнал рассогласования, определяемый разностью сигналов задания и обратной связи, поступает на входы пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего корректирующих звеньев на операционных усилителях *A3*, *A4*, *A5* соответственно. Переменными резисторами *R4*, *R5* и *R6* устанавливаются коэффициенты усиления корректирующих звеньев. Для установки постоянных времени интегрирования и дифференцирования в *И*- и *Д*-звеньях предусмотрены переключатели *s1* и *s2*, коммутирующие конденсаторы различной емкости.

Сигналы с выходов ПИД-звеньев поступают на суммирующий усилитель (микросхема *A6*). Резистором *R7* при отсутствии рассогласования устанавливается нуль на входе сумматора. С выхода *A6* сигнал поступает на усилитель мощности, первый каскад которого на микросхеме *A7* усиливает его по напряжению; второй каскад — парафазный усилитель напряжения на транзисторах *VT1* и *VT2*; третий каскад — усилитель тока — построен по схеме двухтактного эмиттерного повторителя на транзисторах *VT3* и *VT4*. Усилитель мощности охвачен жесткой отрицательной обратной связью; усиление регулируется резистором *R8*. С выхода усилителя снимается управляющий сигнал для исполнительного органа (например, сервоклапана).

Подобный регулятор, использовавшийся для программного управления гидравлическими силовозбудителями в машинах для прочностных испытаний образцов материалов, обеспечивал точность воспроизведения заданных нагрузок порядка  $\pm (0,8 \dots 1) \%$  от верхнего предела диапазона регулирования.

## 2. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

На базе ТР строятся разнообразные устройства автоматической защиты, предохраняющие технологическое, энергетическое, испытательное оборудование от опасных режимов. Основными достоинствами ТР по сравнению с другими типами реле механических величин применительно к системам защиты являются их быстродействие, позволяющее без запаздывания реагировать на аварийные ситуации, универсальность применения, небольшое обратное влияние на контролируемый объект, что создает возможность легко и быстро приспособливать ТР даже к уже действующим объектам (если необходимость в защите обнаруживается уже после начала эксплуатации, испытания и т. п.). В ряде случаев ТР практически вообще незаменимы для защиты (например, для обнаружения усталостных и иных повреждений и контроля за их развитием).

Практически каждое из ТР, рассмотренных в гл. 2, может использоваться для решения задач, связанных с противоаварийной защитой, в частности, таких, как контроль процессов, протекающих в объекте, формирование сигналов в критических ситуациях, использование этих сигналов для предотвращения аварий путем отключения источников энергии, остановки оборудования или переключения режима его работы, вызов обслуживающего персонала и выдача ему информации о причинах и обстоятельствах возникновения отклонений от нормального функционирования.

Для иллюстрации принципов построения устройств аварийной защиты на базе ТР рассмотрим систему защиты трубопроводов высокого давления. Тензорезисторы  $R1$  и  $R2$  двухпорогового ТР (рис. 47) размещаются в местах возможного появления трещин — на участках сварного шва приварных V-образных компенсаторов, которые вводятся для уменьшения температурных напряжений между прямыми участками трубопроводов, соединяющих различные части турбин (активные тензорезисторы ориентируются поперек шва, а термокомпенсационные — параллельно шву). Выходные сигналы моста, в плечи которого включены тензорезисторы  $R1$  и  $R2$  и резисторы начальной балансировки, через фильтр на резисторах  $R3 - R6$  и конденсаторе  $C1$  подаются на операционный усилитель  $A1$  с обратной связью на резисторе  $R7$  и потенциометром  $R8$  регулировки компенсации дрейфа нуля.

Усилитель  $A1$  соединен с двумя компараторами на базе дифференциальных усилителей  $A2$  и  $A3$ , имеющими по два входа;

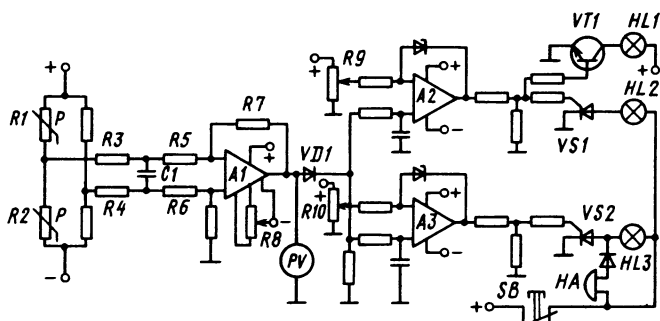


Рис. 47. Схема двухпорогового ТР системы защиты трубопровода

один из входов каждого усилителя через развязывающий диод *VD1* соединен с выходом усилителя *A1*, а другой — с источником напряжения и потенциометром (*R9*, *R10*) задания пороговых значений деформации. Один компаратор при достижении некоторого нижнего уровня деформации служит для получения сигналов раннего предупреждения о появлении мелких трещин в сварном шве, еще не требующих аварийного выключения турбины, а только напоминающих о необходимости профилактического осмотра трубопроводов. Второй компаратор служит для включения аварийной сигнализации при достижении высокого уровня деформации. Сигнал компаратора нижнего уровня деформации воздействует на два пороговых элемента (на тиристоре *VS1* и транзисторе *VT1*), связанных с сигнальными лампами *HL1* и *HL2*. Лампа *HL1* гаснет, если сигнал нижнего уровня вызван случайными причинами; лампа *HL2* остается включенной и в этом случае. Компаратор высокого уровня, действующий на пороговый элемент на тиристоре *VS2*, работает аналогично, но он включает одновременно лампу *HL3* и звуковой сигнализатор *HA*. Кнопка *SB* служит для отключения выходных элементов и подготовки ТР к дальнейшей работе после устранения причины его срабатывания. По цифровому вольтметру *PV* судят о процессе развития повреждений.

Для обеспечения контроля сложных разветвленных трубопроводов (причем не только колен, но и промежуточных участков сварных трубопроводов) система содержит несколько каналов, подобных рассмотренному.

Во многих ТР для систем защиты строят с использованием элементов систем управления и контроля защищаемых объектов. Так, для включения исполнительных органов систем защиты объектов, снабженных тензорезисторными измерительными

приборами контроля рабочих параметров, могут использоваться сигналы электро- или светоконтактных преобразователей, встраиваемых в стрелочные или иные указатели и срабатывающих при достижении этими параметрами критических значений.

В устройствах регулирования сигналы тензорезисторного датчика регулируемой величины цепи обратной связи могут одновременно использоваться в устройствах защиты от недопустимого изменения регулируемой величины и роста рассогласования в контуре регулирования (подобные изменения могут иметь место при различных отказах в системе, случайных внешних воздействиях, неправильных действиях обслуживающего персонала).

Подобное устройство защиты по превышению сигнала рассогласования применено в стенде прочностных испытаний конструкций для системы регулирования нагрузок (рис. 48). Схема сравнения на усилителе *A1* формирует сигнал рассогласования контролируемой системы регулирования, пропорциональный разности сигнала задания, поступающего от задатчика нагрузок на неинвертируемый вход, и сигнала обратной связи, поступающего от тензорезисторного датчика возбуждаемой нагрузки на инвертируемый вход (используя непосредственно сигнал рассогласования контура регулирования, в устройстве защиты можно обойтись без применения дополнительной схемы сравнения).

Выход усилителя *A1* соединен с одним из входов каждого из компараторов на дифференциальных усилителях *A2* и *A3*. Вторые входы этих усилителей соединены с источником напряжения и потенциометрами *R1* и *R2* задания пороговых значений отрицательного и положительного рассогласований. Если рассогласование одного из знаков превышает установленное значение, то с выхода соответствующего компаратора в цепь

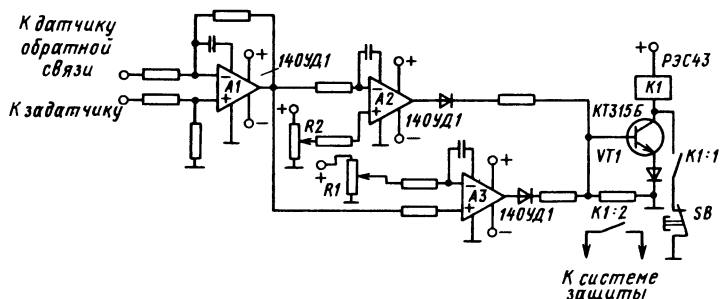


Рис. 48. Схема защиты от превышения рассогласования в регуляторе нагрузок исполнительного стенда

базы транзистора *VT1* поступает сигнал, открывающий транзистор и включающий реле *K1*, которое воздействует на исполнительный орган системы защиты (например, открывает электроуправляемый сливной кран в магистрали питания гидравлического силовозбудителя).

Через свои контакты *K1 : 1* реле *K1* становится на самоблокировку (для исключения возможности многократного включения и отклонения ТР вблизи заданного предельного значения рассогласования). После устранения причины срабатывания защиты устройство приводится в исходное состояние кратковременным нажатием кнопки *SB*.

На базе тензорезисторного датчика силы системы регулирования усилия прокатки в прокатных станах путем подключения к нему (непосредственно или через развязывающее устройство) компаратора и порогового устройства, подобных примененным в схеме, приведенной на рис. 48, можно сделать устройство защиты прокатных валков от перегрузок.

В системах защиты сложных объектов может предусматриваться несколько вариантов противоаварийных режимов (например, замораживание нагрузок, управляемая и неуправляемая разгрузка в стендах для прочностных испытаний), причем эффективность того или иного режима зависит от многих факторов, которые трудно заранее учесть с полнотой, необходимой для составления жесткой программы управления. В этом случае для автоматизации процесса выбора эффективного противоаварийного режима может быть применена, например, предложенная автором для испытательных стендов схема ТР (рис. 49). После срабатывания по той или иной причине системы защиты СЗ стенда, контролирующей отсутствие разрушений испытуемого объекта и режимы нагружения, и включения одного из защитных (противоаварийных) режимов (например, замораживания) производится анализ состояния испытуемого объекта *ИО* и при необходимости автоматически корректируется воздействие на систему нагружения (включается другой противоаварийный режим).

Для этого в ТР введены следующие элементы: компаратор *K*, который сравнивает значение нагрузок, воспринимаемых датчиком *ДС* в текущий момент времени, со значением нагрузки в момент срабатывания системы защиты, зафиксированным запоминающим устройством (элементом памяти) *ЗУ* (например, на базе высококачественного конденсатора); пороговый элемент *ПЭ*, подключающийся с определенной периодичностью, которая задается реле времени (или генератором тактовых сигналов) *РВ*, к блоку исполнительных органов *БИО* силовозбуди-

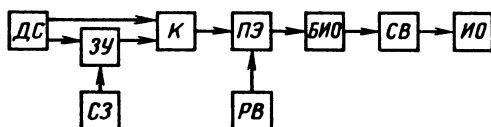


Рис. 49. Структурная схема ТР для испытательных стендов, обеспечивающая анализ состояния испытуемого объекта после срабатывания защиты

теля СВ и переключающий его с режима замораживания в режим разгрузки в случае, если разность между начальным (после включения блоком БИО замораживания) и текущим значениями нагрузки становится больше установленного предельного значения, т. е. при низкой эффективности замораживания (например, при разрушении испытуемой конструкции, когда она не "держит" нагрузку).

### 3. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Одним из распространенных экспериментальных методов оценки усталостных характеристик, прочности, надежности различных конструкций являются испытания под действием переменных нагрузок. Переменные нагрузки нужны также во многих технологических установках (например, в установках вибрационного упрочнения деталей). Перспективными для возбуждения таких нагрузок являются автоколебательные системы, в которых переменные воздействия создаются за счет возбуждения автоколебаний в замкнутом контуре, содержащем нагружаемый объект, и зависят от характера движения самой системы. По сравнению с системами с вынужденным режимом работы, в которых переменные нагрузки создаются путем воздействия внешних периодических возмущений, автоколебательные системы обладают такими преимуществами, как сравнительная простота, стабильность в работе, экономичность.

В практике испытаний получили применение два вида автоколебательных систем: резонансные (АРС) с возбуждением колебаний, близких к гармоническим, и релаксационные (РАС).

В АРС используется положительная обратная связь от испытуемого объекта к силовозбудителю (вибровозбудителю), осуществляемая обычно с помощью тензорезисторного датчика силы или какого-либо иного из параметров колебаний и стиму-

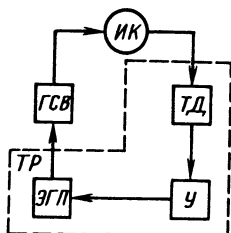


лирующая колебания испытуемой конструкции на собственной (резонансной) частоте. Кроме перечисленных выше общих преимуществ автоколебательных систем, АРС в устройствах возбуждения резонансных колебаний обладают также такими достоинствами, как автоматическая настройка на резонансную частоту и слежение за ее изменениями в процессе испытаний, что исключает необходимость применения характерных для систем с вынужденным режимом работы задающих генераторов и специальных систем стабилизации частотного режима нагружения, возможность раннего обнаружения разрушений нагружаемых конструкций по изменению резонансной частоты (см. п. 9 гл. 2), автоматическая разгрузка конструкции в начальных стадиях ее разрушения.

В АРС применяются электродинамические, электромагнитные, магнитострикционные, гидравлические силовозбудители. В АРС, выполненной по схеме, которая приведена на рис. 50, замкнутый контур содержит гидравлический силовозбудитель (гидроцилиндр) ГСВ, действующий на испытуемую конструкцию ИК, и тензорезисторное реле ТР.

В рассматриваемых испытательных установках, непрерывно работающих в течение длительных периодов (до нескольких месяцев и даже лет), из известных реле механических величин практически только ТР могут удовлетворить требованиям по долговечности и безотказности. Кроме того, благодаря минимальному влиянию на испытуемый объект тензорезисторные датчики ТР не меняют его динамические характеристики и без искажений воспроизводят колебания, характерные для эксплуатационных режимов, что повышает достоверность результатов испытаний.

Используемое в АРС ТР содержит тензорезисторный датчик ТД, воспринимающий колебания испытуемой конструкции и осуществляющий положительную обратную связь в контуре, усилитель У сигналов датчика и электрогидравлический преобразователь ЭГП, выполняющий роль исполнительного органа ТР [в качестве ЭГП в ТР применимы агрегаты управления



(сервоклапаны) с электромеханическими преобразователями и гидроусилителями, например, типов АУ38, УЭГ.С, ПЭГ, двух- и трехпозиционные краны с электромагнитным управлением, например, типов ГА86, ГА192 и др.]. Усилитель У

Рис. 50. Структурная схема АРС с гидравлическим силовозбудителем

снабжается фазовращателем для установки оптимальных фазовых соотношений между воздействием силовозбудителя и колебаниями испытуемого объекта. В контур могут также включаться частотные фильтры, используемые при выборе частоты возбуждаемых колебаний в случае испытаний многорезонансных конструкций.

Для определения условий возбуждения резонансных автоколебаний в АРС и зависимостей амплитуды, частоты и фазы создаваемых нагрузок от параметров АРС необходимо составить характеристическое уравнение системы, предварительно определив передаточные функции ее элементов. Полагаем при этом, что все элементы замкнутого контура АРС по схеме рис. 50 линейны, кроме преобразователя ЭП, и направленного действия (т. е. отсутствует влияние нагрузки выходной цепи элемента на режим входной цепи).

Уравнение испытуемого объекта, приводимого по возбуждаемой форме колебаний к системе с одной степенью свободы, имеет вид

$$m \frac{d^2 x'}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + cx = P, \quad (25)$$

где  $x$  — координата приведенной системы с массой  $m$ , жесткостью  $C$  и коэффициентом  $f$  вязкого сопротивления;  $t$  — время;  $P$  — действующая (возмущающая) сила.

Это уравнение справедливо при следующих допущениях: масса опоры для испытательной установки настолько велика, что влиянием на нее колеблющихся элементов испытуемого объекта можно пренебречь; в пределах возможных колебаний сила упругости пропорциональна деформации пружины с жесткостью  $C$  и массой, пренебрежимо малой по сравнению с  $m$ ; значения  $m$ ,  $C$  и  $f$  не меняются в течение рассматриваемого времени.

Полагая, что

$$P = Cl, \quad (26)$$

где  $l$  — перемещение поршня силовозбудителя, жестко связываемого с испытуемым объектом, из (25) получим передаточную функцию испытуемого объекта

$$W_{ик}(s) = \frac{x(s)}{l(s)} = \frac{1}{T_m^2 s^2 + T_f s + 1}, \quad (27)$$

где  $x(s)$  и  $l(s)$  — изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях соответственно функций  $x(t)$  и  $l(t)$ ;  $s$  — комплексная переменная;  $T_m = 1/\omega_0 = \sqrt{m/c}$ ;  $T_f = f/c$ .

Из уравнения (25) следует, что колебания нагружаемого объекта с собственной частотой  $\omega_0$  и постоянной амплитудой могут иметь место, если приток энергии в систему за счет действия силы  $P$  в любой момент компенсирует потери, обусловленные неупругим сопротивлением. Для этого необходимо, чтобы сила  $P$ , зависящая от сигнала обратной связи, была функцией производной  $dx/dt$ . В рассматриваемой системе выполнение этого условия можно обеспечить при использовании в цепи обратной связи тензорезисторного датчика ускорения с передаточной функцией

$$W_d(s) = \frac{u(s)}{x(s)} = k_d s^2, \quad (28)$$

где  $u(s)$  — изображение по Лапласу при нулевых начальных условиях напряжения на входе датчика;  $k_d$  — коэффициент преобразования, зависящий от конструктивного и схемного исполнения датчика.

В предположении, что усилитель  $U$  работает в линейной области статической характеристики, его передаточная функция

$$W_y(s) = \frac{i(s)}{u(s)} = k_y, \quad (29)$$

где  $i(s)$  — изображение по Лапласу при нулевых начальных условиях выходного тока усилителя, направляемого в обмотку управления ЭПП;  $k_y$  — постоянный коэффициент, зависящий от исполнения и настройки усилителя.

Силовозбудитель в режиме, близком к холостому ходу, можно рассматривать как интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W_{св}(s) = \frac{l(s)}{Q(s)} = \frac{k_{св}}{s}, \quad (30)$$

где  $Q(s)$  — изображение по Лапласу при нулевых начальных условиях расхода жидкости через рабочую полость силовозбудителя, равного расходу через ЭПП;  $k_{св}$  — постоянный коэффициент, определяемый площадью  $F_{\Pi}$  поршня силовозбудителя ( $k_{св} = 1/F_{\Pi}$ ).

При принятых допущениях уравнение преобразователя ЭГП  $Q = \Phi(i)$ , где  $\Phi$  — нелинейная функция. Для линеаризации функции  $\Phi(i)$ , необходимой при определении передаточной функции ЭГП и составлении характеристического уравнения системы, применим простой и достаточно точный для инженерных расчетов метод гармонического баланса. Сущность метода заключается в предположении, что решение нелинейного уравнения замкнутой системы достаточно близко к решению

$$i = I_a \sin \omega t \quad (31)$$

некоторого линейного уравнения, получаемого из исходного заменой нелинейной функции  $\Phi(i)$  первой гармоникой ее разложения в ряд Фурье, т. е. выражением

$$Q = qi + \frac{q'}{\omega} \frac{di}{dt}, \quad (32)$$

где  $q, q'$  — коэффициенты Фурье для первой гармоники разложения;  $I_a, \omega$  — амплитуда и круговая частота колебаний тока  $i$ .

Применение метода гармонического баланса для рассматриваемой системы допустимо, так как ее линейная часть с передаточной функцией  $W_{\text{л}}(s) = W_{\text{ик}}(s) W_{\text{д}}(s) W_{\text{у}}(s) W_{\text{св}}(s)$  обладает свойствами фильтра высших гармоник и погрешность, обуслов-

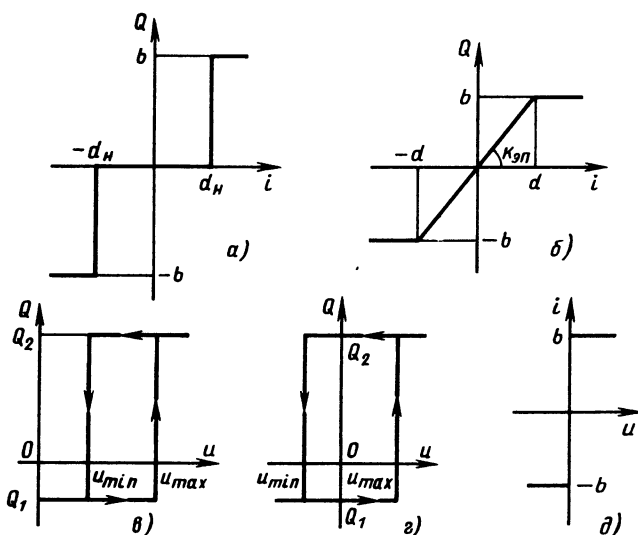


Рис. 51. Статические характеристики нелинейных элементов АРС и РАС

ленная отбрасыванием высших гармоник нелинейной функции, невелика [это следует из анализа амплитудно-частотной характеристики  $W_n(s)$ , получаемой из выражений (27) — (30)].

При использовании в качестве ЭГП кранов с позиционным электромагнитным управлением, представляющих собой релейное звено с зоной нечувствительности (см. статическую характеристику на рис. 51, а),

$$q(I_a) = \frac{4b}{\pi I_a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{I_a^2}}, \quad q' = 0. \quad (33)$$

Для ЭГП в виде сервоклапанов, которые можно рассматривать как ограниченно линейные звенья с насыщением (см. статическую характеристику на рис. 51, б),

$$\left. \begin{aligned} q(I_a) &= \frac{2k_{\text{ЭП}}}{\pi} \left( \arcsin \frac{d}{I_a} + \frac{d}{I_a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{I_a^2}} \right) \\ \text{при } I_a &\geq b, \\ q(I_a) &= k_{\text{ЭП}} \text{ при } I_a \leq b, \\ q' &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где  $k_{\text{ЭП}} = b/d$ .

Приближенная передаточная функция ЭГП определяется из (32) при  $q' = 0$ :

$$W_{\text{ЭП}}(s) = \frac{Q(s)}{i(s)} \approx q. \quad (35)$$

Характеристическое уравнение системы с положительной обратной связью выражается через передаточные функции  $W_i(s)$  элементов в соответствии с формулой

$$1 - \prod_i W_i(s) = 0$$

и при значениях  $W_i(s)$ , определяемых из (27) — (30) и (35), имеет вид

$$T_m^2 s^2 + [T_f - k_{\text{св}} k_d k_y q(I_a)] s + 1 = 0. \quad (36)$$

Признаком существования периодического решения с частотой  $\omega_{\Pi}$  и амплитудой  $I_{\text{ап}}$  является наличие мнимых корней  $s = j\tilde{\omega}$  уравнения (36). (Знак  $\sim$  введен для отличия текущего параметра  $\tilde{\omega}$  от частоты  $\omega$ , входящей в выражение гармонической линеаризации нелинейности.)

При подстановке в (36)  $s = j\tilde{\omega}$  можно получить в левой части комплексное выражение, вещественная и мнимая части которого соответственно равны

$$x(\tilde{\omega}) = 1 - T_m^2 \tilde{\omega}^2 ; \quad (37a)$$

$$Y(\tilde{\omega}) = T_f - k_{\text{св}} k_{\text{д}} k_y q(I_a). \quad (37б)$$

Приравняв нулю  $x(\tilde{\omega})$  и  $Y(\tilde{\omega})$  при подстановке  $\tilde{\omega} = \omega_{\Pi}$  и  $I_a = I_{\text{ап}}$ , получим:

$$1 - T_m^2 \omega_{\Pi}^2 = 0; \quad (38a)$$

$$T_f - k_{\text{св}} k_{\text{д}} k_y q(I_{\text{ап}}) = 0. \quad (38б)$$

Из выражения (38a) можно определить значение частоты периодического решения

$$\omega_{\Pi} = 1/T_m ,$$

совпадающее с собственной частотой  $\omega_0$  испытуемого объекта, а подставив в (38б) значение  $q$  из (33) или (34), получим уравнение для определения  $I_{\text{ап}}$ . При использовании ЭП со статической характеристикой, приведенной на рис. 51, б, это уравнение имеет вид

$$\frac{2 k k_{\text{эп}}}{\pi} \left( \arcsin \frac{d}{I_{\text{ап}}} + \frac{d}{I_{\text{ап}}} \sqrt{1 - \frac{d^2}{I_{\text{ап}}^2}} \right) = T_f , \quad (39)$$

где  $k = k_{\text{св}} k_{\text{д}} k_y$ .

Амплитуда  $P_{\text{ап}}$  возбуждаемой переменной нагрузки определяется по следующей формуле, получаемой из (26), (30) и (35) с учетом (31) и (38б):

$$P_{\text{ап}} = \frac{I_{\text{ап}} T_f C}{k_{\text{д}} k_y \omega_{\Pi}} . \quad (40)$$

Проверим на устойчивость найденное периодическое решение, так как только устойчивое периодическое решение соответствует автоколебаниям. Для этого используем приближенный критерий, согласно которому периодическое решение уравнения 2-го порядка устойчиво, если положительны коэффициенты двух крайних членов характеристического уравнения и выполняется условие

$$\left(\frac{\partial x}{\partial I_a}\right)^* \left(\frac{\partial Y}{\partial \tilde{\omega}}\right)^* - \left(\frac{\partial x}{\partial \tilde{\omega}}\right)^* \left(\frac{\partial Y}{\partial I_a}\right) > 0, \quad (41)$$

где звездочки означают, что в частные производные подставляются значения  $I_a = I_{ап}$  и  $\tilde{\omega} = \omega_{п}$  для исследуемого периодического решения.

Первое требование выполняется во всей области существования периодического решения. Подставляя в (41) найденные из (37) значения производных, получим второе условие устойчивости в виде неравенства  $\partial q / \partial I_a < 0$ , которое выполняется при  $I_a > \sqrt{2} d_n$  для случая использования ЭГП в виде релейного звена с зоной нечувствительности и при  $I_a > d$  для случая использования ЭГП в виде ограниченного звена с насыщением.

На рис. 52 приведены графики зависимостей  $P_{ап}(k)$  и  $P_{ап}(\omega_{п})$ , построенные по формулам (39) и (40) при  $T_m = T_f = 0,01$  с,  $C = 5 \cdot 10^5$  Н/см,  $d = 0,05$  А,  $k_{эп} = 10^4$  см<sup>3</sup>/(с · А);  $k_d k_y = 10^{-4}$  с<sup>2</sup> · А/см.

Корректируя фазовые соотношения в контуре фазовращателем, можно обеспечить в рассматриваемой системе возбуждение резонансных колебаний ( $\omega_{п} = \omega_0$ ) в случаях, когда режим работы силовозбудителя существенно отличается от холостого хода и зависит от нагрузки (т. е. когда силовозбудитель нельзя рассматривать как элемент направленного действия), а также при использовании в контуре для положительной обратной связи не только тензорезисторных датчиков ускорений, но также тензорезисторных (и других типов) датчиков скоростей и перемещений (или деформаций) элементов испытуемого объекта.

На АРС с электродинамическим вибровозбудителем типа ВЭ-20/5000 и тензорезисторным датчиком деформаций в цепи обратной связи автором проводились испытания на вибропрочность отсеков крыла самолета. Автоколебания возбуждались на одной из резонансных частот отсека. Система надежно и стабильно работала при изменении в процессе испытаний собственной частоты конструкции (за счет уменьшения жесткости), на

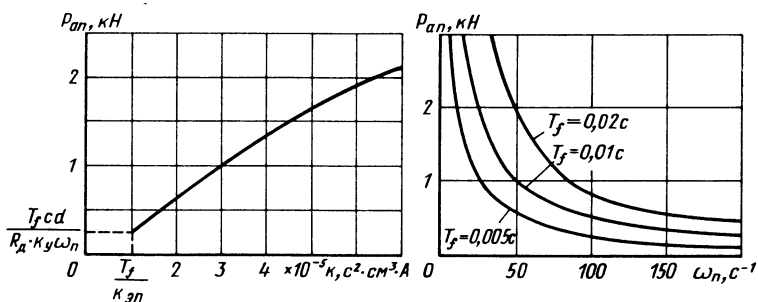


Рис. 52. Графики зависимости  $P_{ан}(k)$  и  $P_{ан}(\omega_n)$  для АРС с гидравлическим силовым возбудителем

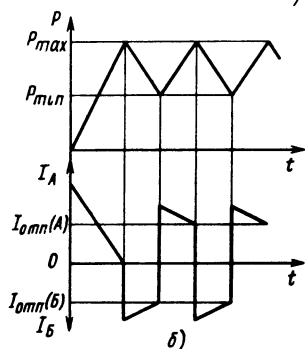
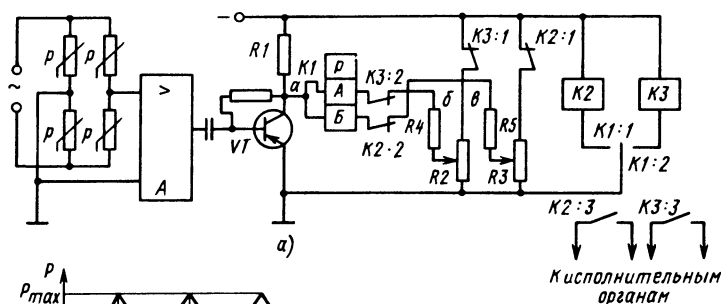
которой возбуждались автоколебания, от 69 до 62 Гц. Необходимость в ручной подстройке частоты при этом полностью отсутствовала, а коррекция амплитуды колебаний проводилась в несколько раз реже, чем при подобных испытаниях в случае вынужденного режима возбуждения колебаний.

РАС, в отличие от АРС, используют для создания нагрузок с частотами, значительно меньшими, чем собственные частоты испытуемого объекта. Если в АРС колебательный режим определяется в основном энергоемкими параметрами системы (массами, жесткостями), то в РАС, имеющей практически один накопитель энергии — деформируемую жесткость (при низких частотах, характерных для РАС, накопление энергии движущейся массой незначительно), колебательный режим определяется и диссипативными элементами системы (сопротивлениями), а также другими факторами, не связанными непосредственно с величинами энергоемких параметров, в частности, характеристиками порогового устройства, управляющего процессами накопления и разрядки энергии.

При достижении минимального и максимального уровней энергии, соответствующих предельным нагрузкам цикла, пороговое устройство, которое имеет два фиксированных состояния, по сигналам датчика, осуществляющего обратную связь от силового возбудителя или нагружаемого объекта, поочередно устанавливается в состояния, соответствующие нагружению и разгрузке (в РАС тензорезисторное пороговое устройство представляет собой ТР в виде триггера с двумя устойчивыми состояниями, управляемого тензорезисторным датчиком). Колебания в РАС имеют несинусоидальную форму, обусловленную скачкообразным характером работы пороговых устройств.

В РАС с пороговым устройством (рис. 53) на базе ТР дефор-





**Рис. 53. РАС с пороговым элементом на ТР деформаций, перемещений или силы:**  
*а* — схема; *б* — диаграмма работы

мации, перемещения или силы, подобного показанному на рис. 16, *a* потенциометры  $R2$  и  $R3$  для настройки соответственно максимального и минимального значений нагрузок цикла возбуждаемой переменной нагрузки ( $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ )

с транзистором  $VT$  оконечного каскада усилителя и резистором  $R1$  образуют два выходных моста. Переменным плечом этих мостов является сопротивление между коллектором и эмиттером транзистора  $VT$ , зависящее от разбаланса моста тензорезисторного датчика на входе усилителя.

При достижении нагрузки  $P_{\max}$ , когда выполняется условие  $I_A = I_{\text{отп}}$ , контакты  $K1 : 1$  размыкаются. Так как при этом  $|P_{\min} - P| > |P_{\max} - P|$ , то  $|u_{ab}| < |u_{ав}|$ ,  $|I_A| < |I_B|$  и замыкаются контакты  $K1 : 2$ . При этом через контакты  $K3 : 2$  включающегося реле  $K3$  исполнительный орган переключается в положение, обеспечивающее разгрузку; одновременно отключаются обмотка  $A$  реле  $K1$  и потенциометр  $R2$ . Нагрузка убывает до значения  $P_{\min}$ , при котором  $I_B = I_{\text{отп}}$ ; после этого цикл повторяется. Резисторы  $R4$  и  $R5$  расширяют возможности программирования предельных значений нагрузок цикла, в частности, в случаях, когда реализуются циклы с близкими значениями  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ , которые трудно задавать потенциометрами  $R2$  и  $R3$ .

Для определения условий возбуждения автоколебаний в РАС используется тот же метод, что и при рассмотрении АРС. Проведем исследование на примере системы со схемой, подобной приведенной на рис. 50 и состоящей из испытуемой конструкции, гидравлического силовозбудителя, тензорезисторного датчика силы, усилителя с пороговым устройством и электрогидравлического преобразователя (например, крана позиционного действия). Полагаем при этом, что все элементы замкнутого контура РАС линейны, кроме усилителя с пороговым устройством и электрогидравлического преобразователя, которые для удобства исследований будем рассматривать как единый нелинейный элемент.

При низких частотах создаваемых нагрузок, характерных для РАС, в уравнении (25) можно пренебречь первыми двумя членами в левой части, и с учетом (26) для испытуемой конструкции передаточная функция

$$W_{\text{ик}}(s) = \frac{P(s)}{I(s)} \approx C. \quad (42)$$

Полагая, что силовозбудитель работает в режиме, отличающемся от холостого, его передаточную функцию можно представить в виде

$$W_{\text{св}}(s) = \frac{I(s)}{Q(s)} = \frac{k_{\text{св}}}{T_{\text{св}} s^2 + s + r}, \quad (43)$$

где  $T_{\text{св}}$ ,  $k_{\text{св}}$ ,  $r$  — параметры, зависящие от характеристик испытуемой конструкции, площади поршня цилиндра, гидравлической проводимости магистралей, коэффициента эластичности

нагрузочной характеристики электрогидравлического преобразователя.

Для датчика, рассматриваемого как апериодическое звено 1-го порядка,

$$W_d(s) = \frac{u(s)}{P(s)} = \frac{k_d}{T_d s + 1}, \quad (44)$$

где  $T_d$  и  $k_d$  — соответственно постоянная времени и коэффициент преобразования датчика.

Уравнение нелинейного элемента

$$Q = \Phi\left(u, \frac{du}{dt}\right), \quad (45)$$

где  $\Phi$  — нелинейная функция, типовые статические характеристики которой приведены на рис. 51, в, г.

В общем случае характеристики нелинейных элементов не-симметричны относительно осей  $u$  и  $Q$  и уравнение (45) можно представить в виде

$$Q = Q_0 - \Phi' \left[ u - u_0, \frac{d(u - u_0)}{dt} \right], \quad (46)$$

где  $Q_0 = 0,5(Q_1 + Q_2)$ ;  $Q_1, Q_2$  — расходы жидкости через выходной элемент электрогидравлического преобразователя соответственно при  $du/dt > 0$  и  $du/dt < 0$ ;  $\Phi'$  — нелинейная функция, симметричная относительно осей  $u - u_0$  и  $Q - Q_0$ ;  $u_0 = 0,5(u_{\min} + u_{\max})$ ;  $u_{\min}, u_{\max}$  — значения выходного сигнала датчика, соответствующие уровням срабатывания порогового устройства.

Для линеаризации функции (45), как и при исследовании АРС, применим метод гармонической линеаризации. Передаточная функция линейной части системы с учетом (42) — (44)

$$\begin{aligned} W_{\text{л}}(s) &= \frac{u(s)}{Q(s)} = W_{\text{ик}}(s) W_{\text{св}}(s) W_d(s) = \\ &= \frac{C k_{\text{св}} k_d}{(T_d s + 1)(T_{\text{св}} s^2 + s + r)}. \end{aligned} \quad (47)$$

Ее амплитудная частотная характеристика убывает с ростом  $\omega$ , что свидетельствует о наличии свойств фильтра высших гар-

моник у линейной части системы и применимости метода гармонической линеаризации. Полагаем, что  $u - u_0 = u_a \sin \omega t$ , где  $u_0$  — координата центра колебаний;  $u_0, \omega$  — соответственно амплитуда и частота колебаний напряжения  $u$ . Тогда после линеаризации (46)

$$Q = Q_0 + q(u - u_0) + \frac{q'}{\omega} \frac{d(u - u_0)}{dt}, \quad (48)$$

где  $Q_0$  — постоянная составляющая разложения  $Q$  в ряд Фурье.

Для линейного элемента с релейной характеристикой при значениях  $u_0$  и  $Q_0$ , приведенных выше,

$$q = \frac{4b}{\pi u_0} \sqrt{1 - \frac{d^2}{u_a^2}} \geq 0, \quad q' = -\frac{4b}{\pi u_a^2} \leq 0, \quad (49)$$

где  $b = 0,5 (Q_1 - Q_2)$ ,  $d = 0,5 (u_{\max} - u_{\min})$ .

Характеристическое уравнение системы, получаемое из (47) и (48), имеет вид

$$T_{\text{св}} T_{\text{д}} s^3 + (T_{\text{св}} + T_{\text{д}}) s^2 + (1 + r T_{\text{д}} + \frac{k q'}{\omega}) s + r + k q = 0, \quad (50)$$

где  $k = C k_{\text{св}} k_{\text{д}}$ .

Подставляя  $s = j \tilde{\omega}$  и поделив уравнение (50) на  $T_{\text{св}} T_{\text{д}}$ , в левой части получим комплексное число  $X(\tilde{\omega}) + j Y(\tilde{\omega})$ , где

$$X(\tilde{\omega}) = \frac{r + k q}{T_{\text{св}} T_{\text{д}}} - \frac{T_{\text{св}} + T_{\text{д}}}{T_{\text{св}} T_{\text{д}}} \tilde{\omega}^2; \\ Y(\tilde{\omega}) = \frac{1}{T_{\text{св}} T_{\text{д}}} \left( \frac{k q'}{\omega} + r T_{\text{д}} + 1 \right) \tilde{\omega} - \omega^3. \quad (51)$$

Приравняв нулю  $X(\tilde{\omega})$  и  $Y(\tilde{\omega})$  при  $\tilde{\omega} = \omega_{\text{п}}$ , найдем условие существования периодического решения в виде:

$$\left. \begin{aligned} (T_{\text{св}} + T_{\text{д}}) \omega_{\text{п}}^2 - r - k q &= 0, \\ T_{\text{св}} T_{\text{д}} \omega_{\text{п}}^2 - (1 + r T_{\text{д}}) \omega_{\text{п}} - k q' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

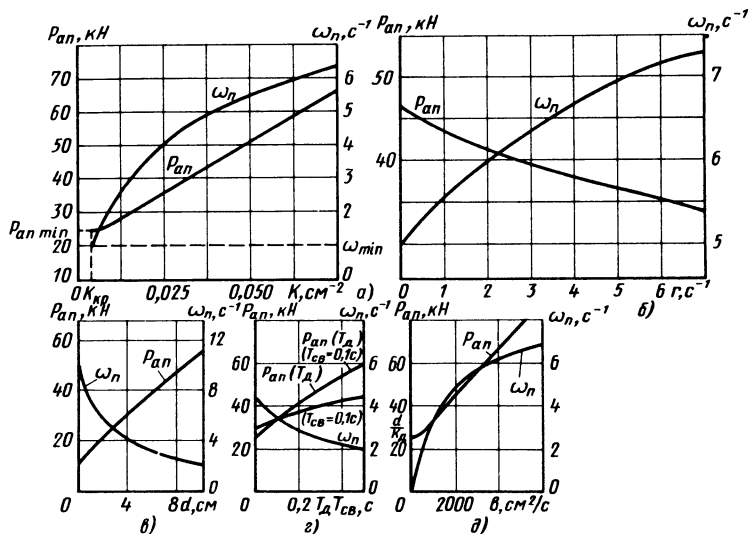


Рис. 54. Графики зависимостей амплитуд и частот автоколебаний в РАС от параметров системы:

$a - T_d = T_{св} = 0,1 \text{ с}; r = 0,2 \text{ с}^{-1}; d = 5 \text{ см}; b = 10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}; K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{Н}^{-1};$   
 $b - T_d = T_{св} = 0,1 \text{ с}; K = 0,04 \text{ см}^{-2}; d = 5 \text{ см}; b = 10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}; K_d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{Н}^{-1};$   
 $в - b = 10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}; r = 0; K = 0,02 \text{ см}^{-2}; K_d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{Н}^{-1}; T_d = T_{св} = 0,1 \text{ с};$   
 $г - K = 0,02 \text{ см}^{-2}; b = 10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}; K_d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{Н}^{-1}; d = 5 \text{ см}; z = 0;$   
 $д - K = 0,02 \text{ см}^{-2}; T_d = T_{св} = 0,1 \text{ с}; r = 0; d = 5 \text{ см}; K_d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{Н}^{-1}$

Условие устойчивости периодического решения, получаемое из (41), (51) и (52) в виде неравенства

$$2 [T_{св} + T_d (1 + r T_d)] \left(1 - \frac{d^2}{u^2 a}\right) > T_{св} \times$$

$$\times T_d [(T_{св} + T_d) \omega_n^2 - r], \quad (53)$$

выполняется во всей области существования периодического решения, в чем можно убедиться, подставив в (53) максимально возможное значение  $\omega_n$ , определяемое из (52).

Из уравнений (52) можно найти амплитуды и частоты автоколебаний для конкретных значений параметров РАС. На рис. 54 представлены графики, полученные из (52) при значениях  $q$  и  $q'$ , которые определены из (49).

РАС с гидравлическими силовозбудителями и пороговым

устройством, аналогичным показанному на рис. 53, созданные при участии автора, использовались для проведения повторно-статических испытаний авиационных конструкций, в частности, крыла и шасси самолета.

#### 4. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В УСИЛИТЕЛЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В системах с вынужденным режимом работы, применяемых для возбуждения колебаний в технологических и испытательных установках, получение заданных амплитуд колебаний часто достигается за счет использования динамического усиления колебательной системы, определяемого резонансными свойствами объекта, колебания которого возбуждаются. Однако динамическое усиление во многих случаях ограничивается высокими значениями сил сопротивления, которые в реальных системах приводят к существенным энергетическим затратам. В ряде случаев силовозбудителями, имеющими ограниченную мощность, невозможно возбудить колебания с амплитудами, достигающими заданного значения, в связи с чем возникает необходимость в дополнительном усилении механических колебаний.

Автором предложен усилитель механических колебаний (рис. 55), состоящий из силовозбудителя (например, электродинамического) *СВ*, тензорезисторного датчика *ТД* одного из параметров усиливаемых колебаний, осуществляющего положительную обратную связь от колеблющегося объекта *КО* к силовозбудителю, усилителя *У* сигнала датчика, источника энергии *ИЭ*, полосового фильтра и ограничителя сигнала *ФП*. Усилению подвергаются колебания объекта *КО*, обусловленные действием возмущающей (внешней) силы  $P_v$ .

Силовозбудитель, датчик и усилитель сигнала датчика вместе с объектом *КО* образуют автоколебательный контур. Для исключения возможности возникновения автоколебаний в системе на собственной частоте объекта *КО*, искажающих усиливаемые колебания, служат полосовой фильтр и ограничитель сигнала, которые ослабляют положительную обратную связь на частотах, близких к резонансной частоте объекта, обеспечивая этим недовозбужденный режим

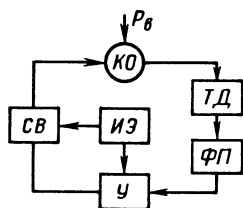


Рис. 55. Структурная схема усилителя механических колебаний

системы в диапазоне рабочих частот усиливаемых колебаний.

Тензорезисторный датчик *ТД*, фильтр *ФП*, усилитель *У* и силовозбудитель *СВ* можно рассматривать как частотно-зависимое ТР. При использовании гидравлического силовозбудителя (гидроцилиндра) к выходу усилителя *У* необходимо подключить позиционный гидравлический кран с электромагнитным приводом или электрогидравлический сервоклапан, управляющий гидроцилиндром.

Целесообразность применения в усилителе колебаний ТР, а не других типов реле механических величин обусловлена их высокой надежностью (обеспечивающей безотказную работу в характерных для усилителей механических колебаний условиях длительной непрерывной эксплуатации), быстродействием (существенно расширяющим диапазон частот усиливаемых колебаний), минимальным обратным влиянием на колеблющийся объект (позволяющим осуществлять усиление без искажений усиливаемых колебаний).

Усилитель колебаний работает следующим образом. При колебаниях объекта *КО* под действием силы  $P_{\text{в}}$  на выходе датчика *ТД* появляется сигнал, зависящий от параметров усиливаемых колебаний. После усиления этот сигнал поступает в управляющую цепь силовозбудителя *СВ*, который, воздействуя на *КО*, создает дополнительную силу  $P_{\text{у}}$ . Последняя обеспечивает усиление колебаний, вызванных силой  $P_{\text{в}}$ . Для оптимизации фазовых соотношений между суммирующими силами  $P_{\text{у}}$  и  $P_{\text{в}}$  усилитель *У* снабжается фазовращателем.

Возможны схемы, где сила  $P_{\text{в}}$  создается силовозбудителем усилителя. При этом эффект усиления механических колебаний обеспечивается за счет частичного возврата энергии от колеблющегося объекта по цепи положительной обратной связи, что эквивалентно уменьшению сил сопротивления и энергетических потерь в колебательной системе, а следовательно, увеличению динамического усиления системы.

Подтверждение наличия усилительных свойств и их количественная оценка могут быть получены из уравнения динамики усилителя. Для составления уравнения рассматриваем усилитель как потенциально автоколебательную систему, совершающую вынужденные колебания под действием силы

$$P_{\text{в}}(t) = P_{\text{ва}} \sin \omega_{\text{в}} t, \quad (54)$$

где  $P_{\text{ва}}$ ,  $\omega_{\text{в}}$  — соответственно амплитуда и круговая частота возмущающего воздействия.

Положим, что колеблющийся объект может быть приведен к системе с одной степенью свободы, передаточная функция которой в соответствии с (26) и (27)

$$W_{ик}(s) = \frac{X(s)}{P(s)} = \frac{1}{C(T_m^2 s^2 + T_f s + 1)}, \quad (55)$$

а датчик *ТД* и силовозбудитель *СВ* имеют соответственно передаточные функции

$$W_{д}(s) = \frac{u(s)}{x(s)} = k_{д} s; \quad (56)$$

$$W_{св}(s) = \frac{P(s)}{i(s)} = k_{св}, \quad (57)$$

где  $u$  — напряжение на выходе датчика;  $i$  — ток на входе силового возбудителя (выходной ток усилителя сигнала датчика);  $k_{д}$ ,  $k_{св}$  — коэффициенты преобразования датчика и силовозбудителя ( $k_{д} = \text{const}$ ,  $k_{св} = \text{const}$ ).

Функция (56) соответствует датчику скорости перемещений, а функция (57) — электродинамическому силовозбудителю.

Если уравнение усилителя  $Y i = \Phi(u, \frac{du}{dt}) u$ , где  $\Phi$  — нелинейная функция, то, с учетом соотношений (55) — (57) и  $P = P_y + P_b$  уравнение системы в операторной форме

$$(T_m^2 s^2 + T_f s + 1) u - \frac{k_{д} k_{св}}{C} s i = \frac{k_{д}}{C} s P_b. \quad (58)$$

Для систем, в которых сила  $P_b$  создается силовозбудителем усилителя механических колебаний, в уравнение (58) и последующие соотношения вместо  $P_b$  следует подставлять получаемое из (57) выражение:  $P_b = i_b k_{св}$ , где  $i_b = i_{ба} \sin \omega_b t$  — ток задающего устройства, изменяющийся по синусоидальному закону с амплитудой  $i_{ба}$ .

Если предположить, что частота  $\omega_b$  такого же порядка, как и собственная частота  $\omega_0$  объекта *КО*, что выполняются определяемые ниже условия, при которых обеспечивается срыв автоколебаний в системе, и имеют место простые вынужденные колебания с частотой  $\omega_b$  (условия захватывания), то решение уравне-



ния (58) для установившихся вынужденных колебаний переменной  $u$  можно искать в виде

$$u = u_a \sin(\omega_B t + \varphi_u), \quad (59)$$

где амплитуда  $u_a$  и фазовый сдвиг  $\varphi_u$  — неизвестные постоянные величины.

Если выражение (54) представить в виде

$$P_B(t) = P_{Ba} \sin[(\omega_B t + \varphi_u) - \varphi_u] = P_{Ba} \cos \varphi_u \times \\ \times \sin(\omega_B t + \varphi_u) - P_{Ba} \sin \varphi_u \cos(\omega_B t + \varphi_u)$$

и  $\sin(\omega_B t + \varphi_u)$  выразить через  $u$  из (59), а  $\cos(\omega_B t + \varphi_u)$  через  $du/dt$ , то

$$P_B(t) = \frac{P_{Ba}}{u_a} \left( \cos \varphi_u - \frac{\sin \varphi_u}{\omega_B} \bar{S} \right) u. \quad (60)$$

При использовании выражения (60) неоднородное уравнение (58) сводится к однородному уравнению

$$(T_m^2 s^2 + T_f s + 1) u_a - k_{\text{д}} s \frac{P_{Ba}}{u_a} (\cos \varphi_u - \\ - \frac{\sin \varphi_u}{\omega_B} s) u = 0, \quad (61)$$

где  $k = (k_{\text{д}} k_{\text{св}})/C$ .

Линейная часть системы обладает свойствами фильтра высших гармоник (что следует из рассмотрения ее амплитудно-частотной характеристики), и для определения вынужденных колебаний допустима гармоническая линеаризация уравнения (61), осуществляемая заменой в нем нелинейной функции  $i$  выражением

$$i = qu + \frac{q'}{\omega_B} su, \quad (62)$$

где  $q, q'$  — коэффициенты гармонической линеаризации.

Уравнение линеаризированной системы, получаемое из (62),

после подстановки в него  $s = j\omega_B$ , соответствующей периодическому решению для определения вынужденных колебаний, имеет вид

$$u_a - \frac{-T_m^2 \omega_B^2 + kq' \omega_B + 1 + j\omega_B (T_f - kq)}{j\omega} = \frac{k_D}{C} P_{Ba} e^{-j\varphi u}. \quad (63)$$

Из равенства модулей обеих частей уравнения (63) определяется амплитуда вынужденных колебаний.

В качестве примера рассмотрим систему, использующую усилитель сигнала датчика со статической характеристикой, приведенной на рис. 51, д, для которого

$$q = \frac{4b}{\pi u_a}, \quad q' = 0.$$

Выражение для определения амплитуды  $u_a$  в этом случае

$$u_a^2 [(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + \omega_B^2 (T_f^2 - \frac{8kT_f b}{\pi u_a} + \frac{16k^2 b^2}{\pi^2 u_a^2})] = \frac{k_D^2}{C^2} \omega_B^2 P_{Ba}^2. \quad (64)$$

Отсюда

$$u_a = \frac{\frac{4kT_f b \omega_B^2}{\pi} \pm \sqrt{[T_f^2 \omega_B^2 + (1 - T_m^2 \omega_B^2)^2] \frac{k_D^2 P_{Ba}^2}{C^2}}}{(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + \frac{-(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 \frac{16k^2 b^2}{\pi^2}}{+ T_f^2 \omega_B^2}}. \quad (65)$$

Уравнение (64) имеет хотя бы одно положительное решение, если подкоренное выражение в (65) неотрицательно, т. е. если

$$[T_f^2 \omega_B^2 + (1 - T_m^2 \omega_B^2)] \frac{k_D^2 P_{Ba}^2}{C^2} - \\ - (1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 \frac{16k^2 b^2}{\pi^2} > 0. \quad (66)$$

Неравенство (66) представляет собой условие захватывания для рассматриваемой системы. Решая его, можно найти предельные значения  $P_{Ba}$  и других параметров системы, при которых имеют место одночастотные вынужденные колебания.

Закону (59) изменения переменной  $u$  соответствует аналогичный закон изменения координаты  $x$ :  $x = x_a \sin(\omega_B t + \varphi_x)$ , причем согласно (56) амплитуда координаты  $x$  связана с величиной  $u_a$  соотношением

$$x_a = u_a / (\omega_B k_D). \quad (67)$$

Подставляя значение  $u_a$  из (67) в (65), можно получить выражение для  $x_a$  в виде

$$x_a = x_{ст} k_{д.у} \frac{\frac{4k_{CB} b T_f \omega_B}{\pi P_{Ba}} \pm \sqrt{T_f^2 \omega_B^2 +}}{\sqrt{(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + T_f^2 \omega_B^2}} \dots \rightarrow \\ \leftarrow \dots \frac{16k_{CB}^2 b^2}{\pi^2 P_{Ba}^2} (1 - T_m^2 \omega_B^2) \\ \dots \rightarrow \frac{16k_{CB}^2 b^2}{\pi^2 P_{Ba}^2} (1 - T_m^2 \omega_B^2) \frac{1}{\sqrt{(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + T_f^2 \omega_B^2}}, \quad (68)$$

где  $x_{ст} = P_{Ba}/C$  — статическое отклонение координаты  $x$ ;  $k_{д.у} = 1 / \sqrt{(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + T_f^2 \omega_B^2}$  — коэффициент динамического усиления колеблющегося объекта (при разомкнутом контуре усилителя колебаний).

В выражении (68) множитель при  $x_{ст} k_{д.у}$  представляет

собой коэффициент усиления усилителя механических колебаний:

$$k_y = \frac{\alpha T_f \omega_B \pm \sqrt{T_f^2 \omega_B^2 + (1 - \alpha^2)(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2}}{\sqrt{(1 - T_m^2 \omega_B^2)^2 + T_f^2 \omega_B^2}}, \quad (69)$$

где  $\alpha = \frac{4k_{св}b}{\pi P_{в.а}} > 0$ .

При выполнении условия (66) коэффициент  $k_y$  может иметь положительные значения.

При  $T_m \omega_B = 1$ , т. е. в случае резонанса  $k_y = \alpha \pm 1$ . Отсюда следует, что в области резонанса всегда можно обеспечить выполнение условия

$$k_y > 1, \quad (70)$$

т. е. действительно рассматриваемая система способна усиливать механические колебания.

Из выражения (69) и графиков (рис. 56), построенных по нему, следует, что функция  $k_y(\omega_B/\omega_0)$  имеет максимум при резонансе и условие (70) выполняется в тем более широкой области значений  $\omega_B/\omega_0$ , чем меньше значение  $T_f \omega_B$  (рис. 56, а); с увеличением  $\alpha$  коэффициент  $k_y$  растет (рис. 56, б).

Подбором характеристик полосового фильтра и ограничителя сигнала обратной связи обеспечивается (в случае необходимости) одинаковое усиление в рабочей области частот усиливаемых колебаний.

Усилитель механических колебаний может быть построен, например, на базе стандартных электродинамических вибростен-

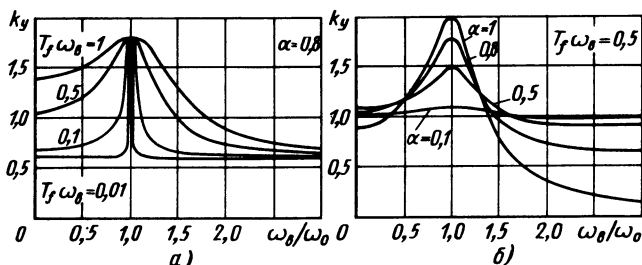


Рис. 56. Графики зависимости коэффициента усиления усилителей механических колебаний от частоты

дов путем отключения от них задающих генераторов и подключения вместо них тензорезисторного датчика параметров колебаний, установленного на колеблющемся объекте, усилителя сигналов датчика и частотного фильтра.

## **5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ**

Тензорезисторные устройства, и в частности ТР, являются одними из основных элементов стендов для испытаний конструкций на прочность, в значительной степени определяя выполнение таких требований к современному испытательному оборудованию, как полнота и высокая точность воспроизведения при испытаниях факторов реальной эксплуатации испытуемой конструкции для обеспечения достоверности результатов испытаний; своевременная и полная информация о состоянии испытуемой конструкции; раннее обнаружение отклонений испытательных режимов, искажающих результаты исследований; безопасность и сохранение испытуемых конструкций (часто дорогостоящих) при повреждении отдельных их элементов, неисправностях испытательных систем и т. д.

Стенд включает следующие системы: сбора, регистрации и переработки информации об эксплуатационных воздействиях на испытуемый объект (нагруженность, влияние среды) и ввода внешней информации в цепи управления испытаниями; воспроизведения заданных испытательных воздействий; аварийной защиты и сигнализации; регистрации и обработки результатов испытаний с целью получения данных в форме, пригодной и удобной для оценки определяемых характеристик.

К исследуемым объектам часто приходится одновременно прикладывать нагрузки, создаваемые несколькими силовозбудителями (вследствие значительных габаритных размеров исследуемых объектов, необходимости создания сложных напряженных состояний, соответствующих эксплуатационным). Поэтому система воспроизведения заданных нагрузок состоит обычно из нескольких одинаковых или разнотипных каналов нагружения, получающих команды от общего программного устройства.

В каждой из перечисленных систем стенда, как правило, используются тензорезисторные устройства. Так, в системе сбора, регистрации и переработки информации об эксплуатационных воздействиях применяются тензорезисторные счетчики напряжений; в системе воспроизведения заданных параметров нагружен-

ности с вынужденным режимом работы или автоколебательного типа ТР применяются для возбуждения переменных нагрузок, программного управления нагружением, усиления механических колебаний, контроля и регистрации создаваемых нагрузок, учета числа циклов нагружения (см. пп. 1, 3, 4 гл. 3); в системах защиты ТР позволяют обнаруживать такие аварийные режимы, как недопустимые отклонения амплитуд и частот создаваемых нагрузок от заданных значений, перегрузки, рост рассогласования в контурах регулирования нагрузок, нарушения синхронности нагружения в многоканальных системах (см. п. 2 гл. 3); в системах регистрации и обработки результатов испытаний ТР используются для контроля за состоянием испытуемого объекта, обнаружения его повреждений, записи процесса развития разрушений и т. д.

Принципы использования ТР в испытательной технике иллюстрируются на приведенных ниже примерах, разработанных при участии автора стендов.

Электрогидравлический стенд (рис. 57) для испытаний натурных конструкций на усталость с вынужденным режимом возбуждения переменных нагрузок содержит один или несколько каналов нагружения с замкнутыми контурами регулирования (на рис. 57 показан один канал).

Каждый канал, получающий команды от общего программного устройства, выполнен с двумя замкнутыми контурами регулирования — основным (аналоговым) и вспомогательным (позиционным). Оба контура имеют общие: гидравлический силовозбудитель *СВ*; датчик нагрузки *ЗН*; тензорезисторный датчик *Д* возбуждаемой нагрузки, используемый в цепи обратной связи; устройство *УС*, сравнивающее сигналы датчика *Д* (предварительно усиленные и масштабированные в нормирующем усилителе-преобразователе *НП*) и датчика *ЗН* и вырабатывающее сигнал рассогласования. Основной контур включает в себя дополнительно формирователь сигналов управления *ФСУ*, усилитель мощности *УМ* и исполнительный орган в виде сервоклапана *СК*.

Управляющий сигнал после усиления воздействует на *СК* так, чтобы развиваемое силовозбудителем усилие становилось равным заданному значению и рассогласование убывало до нуля. Вспомогательный контур включается и работает только при больших рассогласованиях (т. е. при неисправностях основного контура или в случаях, когда последний не справляется с задачами регулирования, например, при значительных скоростях изменения параметров задающего сигнала). Для этого вводится знакочувствительное двухпороговое устройство *УП* с двумя

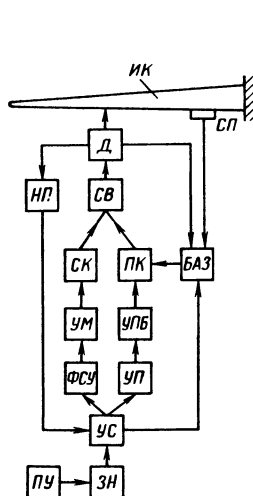


Рис. 57. Структурная схема испытательного стенда с вынужденным режимом возбуждения переменных нагрузок и резервированием контуров регулирования нагрузок

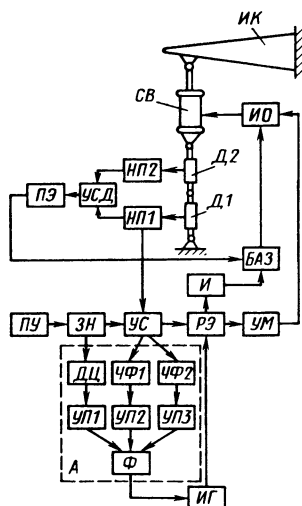


Рис. 58. Структурная схема испытательного стенда с вынужденным режимом возбуждения переменных нагрузок и импульсной коррекцией в контуре регулирования

выходами, срабатывающее при росте сигнала рассогласования на выходе *УС* и выдающее сигнал по одному из выходов при больших положительных рассогласованиях (этот выход соединяется с входом исполнительного электроуправляемого трехпозиционного крана *ПК* вспомогательного контура, обеспечивающим увеличение нагрузки), а по другому выходу — при больших отрицательных рассогласованиях (этот выход соединяется с входом крана *ПК*, обеспечивающим уменьшение нагрузки). Блок *УПБ* во вспомогательном контуре усиливает и преобразует сигналы *УП*.

Вспомогательный контур отрабатывает задание с меньшей точностью, чем основной, однако благодаря своей простоте обладает повышенной надежностью. Так, в частности, он надежнее работает по сравнению с основным контуром при загрязнении рабочей жидкости. Еще одним достоинством вспомогательного контура, использующего позиционный кран, имеющий по сравнению с сервоклапаном меньшие энергетические потери, является повышение экономичности стенда в целом.

Точность стенда в целом достаточно высока, так как отра-

ботка малых сигналов рассогласования вблизи состояний равновесия осуществляется высокоточным основным контуром.

Стенд снабжен блоком аварийной защиты *БАЗ* для контроля состояния испытуемого объекта (с помощью сигнализаторов повреждений *СП*), режима нагружения (по сигналам от датчика *Д* при превышении максимально допустимых значений возбуждаемых нагрузок), исправности системы управления нагружением (по сигналам о недопустимом росте рассогласования на выходе *УС*). Выход *БАЗ* соединен с входом крана *ПК*, обеспечивающим разгрузку испытуемой конструкции *ИК*.

В электрогидравлическом испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 58, как и в рассмотренном выше стенде (см. рис. 57), используется вынужденный режим нагружения, и каждый из контуров регулирования нагрузок содержит гидравлический силовозбудитель *СВ*, задатчик нагрузки *ЗН*, тензорезисторный датчик силы *Д1* с нормирующим усилителем-преобразователем *НП1*, устройство сравнения *УС*, усилитель мощности *УМ* и исполнительный орган (например, сервоклапан) *ИО*.

Особенностями стенда являются повышенные точность и устойчивость системы регулирования нагрузок, достигаемые за счет введения импульсной коррекции, благодаря которым *ИО* при наличии рассогласования между заданным и фактическим значениями регулируемой нагрузки включается не постоянно, а импульсно (как в регуляторе на рис. 45), причем частота и длительность периодов включения и пауз должны устанавливаться в зависимости от заданной скорости изменения нагрузки, постоянных времени, временных запаздываний и других параметров испытуемого объекта *ИК* и контура регулирования (А.с. 737920 СССР, МКИ<sup>4</sup> G05B 19/02). Во время пауз завершаются переходные процессы от предыдущего импульса сигнала регулирования, что позволяет избегать перерегулирования и автоколебаний.

Система импульсной коррекции включает в себя релейный элемент *РЭ*, прерывающий сигнал рассогласования, направляемый из *УС* к *ИО*; импульсный генератор *ИГ*, управляющий релейным элементом *РЭ* и определяющий режим прерывания сигнала рассогласования; анализатор *А* сигналов задания и рассогласования, формирующий воздействия для автоматической настройки генератора *ИГ* в соответствии с алгоритмом, который обеспечивает необходимое качество регулирования нагрузок. Анализатор *А* содержит: дифференцирующую цепь *ДЦ*, связанную с выходом задатчика *ЗН* и вырабатывающую сигнал, пропорциональный скорости изменения определяемой задатчиком

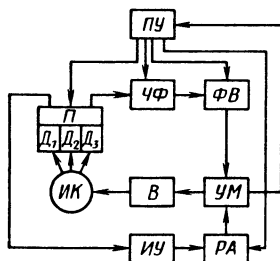


нагрузки; подключенные к *УС* частотные фильтры *ЧФ1* и *ЧФ2*, которые позволяют выделить медленно меняющуюся (низкочастотную) составляющую сигнала рассогласования, определяемую статической ошибкой системы регулирования, и периодическую (высокочастотную) составляющую сигнала рассогласования, определяемую динамической ошибкой регулирования и обусловленную автоколебаниями при нарушении устойчивости процесса регулирования; элементы *УП1*, *УП2*, *УП3*, усиливающие и преобразующие сигналы *ДЦ*, *ЧФ1* и *ЧФ2* к виду, пригодному для воздействия на цепи настройки генератора *ИГ*; формирователь *Ф*, вырабатывающий из сигналов элементов *УП1*, *УП2*, *УП3* в соответствии с принятым алгоритмом сигналы управления частотой, скважностью и другими параметрами выходных импульсов генератора *ИГ*.

С элементом *РЭ* связан индикатор *И*, контролирующий настройку частоты и скважности импульсов генератора, которая зависит от состояния испытуемого объекта. Электро- или светоконтактный преобразователь, который встраивается в индикатор, воздействует на *БАЗ* при достижении критических значений контролируемого параметра.

Для исключения ошибок регулирования, связанных с недопустимым ростом погрешностей или повреждением датчика *Д1* или усилителя *НП1*, введены дополнительный тензорезисторный датчик нагрузки *Д2* с нормирующим услителем-преобразователем *НП2*. В качестве *Д2* используется датчик, подобный *Д1* и включенный последовательно с ним в силовую цепь силового возбудителя, либо отличающийся от него, например, тензорезисторный датчик давления в рабочей полости силового возбудителя *СВ*. Это давление пропорционально создаваемой нагрузке. Выходы *НП1* и *НП2* подключены к устройству *УСД*, сравнивающему их сигналы. Выход *УСД* через пороговый элемент *ПЭ*, срабатывающий при превышении разностью сравниваемых сигналов установленного предельного значения, соединен с входом *БАЗ*.

В стенде для испытаний многорезонансных конструкций



на собственных частотах, схема которого представлена на рис. 59, возбуждение переменных нагрузок осуществляется АРС, аналогичной рассмотренной в п. 3 гл. 3 (А.с. 945704 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M 7/00).

Рис. 59. Структурная схема стенда с АРС для испытаний многорезонансных конструкций

Автоколебательный контур содержит силовозбудитель *В* (например, электродинамический), усилитель мощности сигнала *УМ*, управляющего силовозбудителем, фазовращатель *ФВ*, полосо-вой частотный фильтр *ЧФ*, тензорезисторные датчики *Д* одного из параметров возбуждаемого колебательного процесса (например, датчики сил, деформаций, перемещений, скоростей или ускорений), устанавливаемые на различных элементах испытуемой конструкции *ИК*. Датчики *Д* одновременно используются в контуре регулирования амплитуды возбуждаемых автоколебаний, для чего они через интегрирующее устройство *ИУ*, выделяющее огибающую выходного сигнала, включены в цепь отрицательной обратной связи регулятора амплитуды (собранного, например, по схеме рис. 46), исполнительный орган которого связан с элементом установки усиления усилителя *УМ*.

Фильтр *ЧФ*, фазовращатель *ФВ* и регулятор *РА* имеют по несколько переключаемых цепочек фиксированной настройки соответственно полосы пропускания и фазовых сдвигов, определяющих частоту возбуждаемых автоколебаний, и усиления усилителя *УМ*, определяющего амплитуды автоколебаний. При реализации многоступенчатых программ испытаний переходы с одной резонансной частоты на другую переключением цепей настройки фазовращателей возможны и удобны для близких частот, а перестройкой или переключением частотных фильтров — для существенно отличающихся частот. Программирование переключением датчиков *Д* целесообразно при переходах на различные частоты, связанные с местными резонансами удаленных друг от друга элементов конструкции (в сигналах датчиков *АРС* преобладают составляющие с частотами, соответствующими резонансам, которые обусловлены расположенными вблизи от датчиков элементами).

С переключателем *П* датчиков *Д* и цепями настройки фильтра, фазовращателя и регулятора амплитуды связано программное устройство *ПУ*. Причем переход от этапа к этапу программы, осуществляемый в функции числа циклов нагружения, времени или состояния испытуемой конструкции (например, по командам счетно-импульсного устройства, реле времени или сигнализаторов повреждений), в зависимости от характера варьируемых параметров нагрузок и величины их изменений может осуществляться как одновременным переключением всех перечисленных цепей, так и воздействием только на некоторые из них.

В стендах с многоканальным нагружением, где каналы должны работать синхронно, можно использовать один ведущий

канал, аналогичный показанным на рис. 57, 58 или 59, и ряд ведомых каналов, в которых силовозбудители управляются от построенных по схеме рис. 55 усилителей механических колебаний, возбуждаемых ведущим каналом.

В процессе испытаний контролируются и регистрируются: число циклов нагружения, возбуждаемые нагрузки, напряжения и деформации испытываемой конструкции, ее перемещения, возникновение и развитие повреждений.

Для учета числа циклов нагружения обычно применяются электромеханические или электронные счетчики, получающие импульсы от ТР сил или деформаций, срабатывающих при достижении предельных (или близких к ним) значений нагрузок цикла. При реализации сложных испытательных программ с помощью ТР может осуществляться дифференцированный учет циклов различных амплитуд, а также циклов нагрузок, прилагаемых к разным элементам испытываемого объекта. Одновременно эти же ТР можно использовать в системе защиты, если выполнить их двухпороговыми и настроить второй порог в соответствии с уровнем предельно допустимых нагрузок.

Для непрерывного контроля формы возбуждаемых при испытаниях колебаний со значительными частотами по результатам измерений деформаций или напряжений в нескольких сечениях испытываемой конструкции целесообразно использовать многоканальный прибор на базе нескольких измерителей по схеме, приведенной на рис. 36, с расположением линейных газоразрядных индикаторов на информационном табло в соответствии с расположением датчиков на испытываемом объекте.

При испытаниях на прочность важно точное воспроизведение заданных предельных значений циклических нагрузок. Однако во многих случаях разброс значений нагрузок сложнее уменьшить, чем учесть при определении усталостной прочности по результатам испытаний. Для учета этого разброса при обработке результатов необходимо в процессе испытаний регистрировать (непрерывно или периодически) максимальные и минимальные значения нагрузок цикла. Непрерывная запись процесса нагружения регистрирующим прибором компенсационного типа или осциллографом неудобна и громоздка. Для решения подобных задач создан специальный многоканальный автомат записи нагрузок (АЗН), работающий от разных видов тензорезисторных датчиков и позволяющий получать данные в удобной для обработки на ЭВМ форме.

Для уменьшения объема получаемой для обработки информации регистрация контролируемого параметра проводится не непрерывно, а только в области достижения предельных значе-

ний цикла. С этой целью для управления работой регистратора (его включения и отключения) вводятся сигналы от системы управления нагрузением. В частности, в стендах на базе РАС для включения регистратора нагрузок можно использовать сигналы порогового элемента, по которым переключается силовозбудитель с режима нагружения на режим разгрузки и обратно; при этом необходимо учитывать, что моменты достижения предельных значений нагрузок за счет инерционности элементов системы управления нагрузением всегда отстают от момента подачи управляющего сигнала (не только в РАС, но и в системах с вынужденным режимом работы). Так, из уравнений (44), (49) и (52) для РАС, рассматриваемой в п. 3 гл. 3, можно получить выражение для амплитуды возбуждаемой нагрузки  $P_a$ , откуда следует, что  $P_a > (u_{\max} - u_{\min})/2$ , т. е. амплитуда  $P_a$  превышает значение, соответствующее полуразности сигналов управления  $u_{\max}$  и  $u_{\min}$ .

АЗН (рис. 60) содержит тензорезисторные датчики  $D$ , коммутатор  $K$ , усилитель  $У$ , аналого-цифровой преобразователь  $АЦП$ , логическую схему  $ЛС$ , формирователь служебных сигналов  $ФСС$ , устройство управления нагрузением (автомат нагружения)  $АН$  на базе РАС с пороговым устройством  $УП$ , генератор  $Г$ , блок управления  $БУ$ , перфоратор  $П$ . Сигналы датчиков  $D$ , установленных на испытуемой конструкции  $ИК$ , поступают на вход усилителя  $У$  через коммутатор  $K$ . Интервал измерения устанавливается реле времени блока  $БУ$ , которое включается при поступлении сигналов с  $УП$ . Во время работы реле времени  $БУ$  выдает сигналы запуска на  $АЦП$ . Выходной аналоговый сигнал усилителя  $У$  преобразуется  $АЦП$  в двоично-десятичный код и регистрируется перфоратором  $П$ .

После окончания реализации регистрируемого программного блока нагрузок с  $АН$  поступает сигнал в блок  $БУ$ , который запускает формирователь  $ФСС$ . Логическая схема  $ЛС$  по командам  $БУ$  подключает перфоратор или к  $АЦП$  для регистрации измерительной информации, или к  $ФСС$  для регистрации служебной информации. Полученная информация обрабатывается на ЭВМ, причем программа обработки предусматривает определение

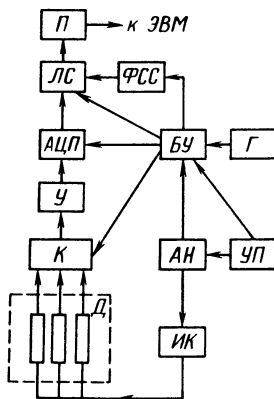


Рис. 60. Структурная схема автомата записи нагрузок

всех экстремальных значений нагрузок за период регистрации, сравнение их с заданными значениями и вывод на цифрочный отклонений фактических значений от заданных.

Для регистрации процесса развития трещин могут применяться устройства на базе ТР, описанных в п. 9 гл. 2, в частности ТР по схеме, приведенной на рис. 43, при подключении к выходу его усилителя на базе микромодуля *A* регистрирующего прибора, например, автокомпенсационного типа. Для включения прибора только после появления начального разрушения можно использовать сигнал с выхода исполнительного органа этого же ТР, вырабатываемый при достижении разности сигналов датчиков *B1* и *B2* соответствующего уровня. Для обеспечения записи процесса развития повреждений в функции числа циклов нагружения следует в регистрирующем приборе применить лентопротяжный механизм с шаговым приводом, получающим сигналы от датчика циклов нагружения (выполненным, например, в виде ТР, срабатывающего каждый раз при достижении максимального значения нагрузки цикла).

## **6. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Измерительные приборы и датчики, применяемые в системах контроля и управления (в том числе тензорезисторные, и в частности ТР), нуждаются в регулярном техническом обслуживании и систематической поверке метрологических характеристик, особенно при использовании в тяжелых производственных условиях. При большом числе находящихся в эксплуатации приборов и датчиков, значительной трудоемкости поверки, регламентированной обычно государственными стандартами и предусматривающей определение многочисленных характеристик, возникает проблема создания высокопроизводительных автоматизированных поверочных стендов.

При автоматизации систем (стендов) для метрологического обеспечения тензорезисторные реле могут использоваться: для воспроизведения и приложения к поверяемому прибору меняющихся по заданному закону значений механической величины, измеряемой поверяемым прибором; снятия показаний поверяемого и образцового приборов при определенных значениях воспроизводимой величины (в реперных точках); сопоставления показаний поверяемого и образцового приборов; управления

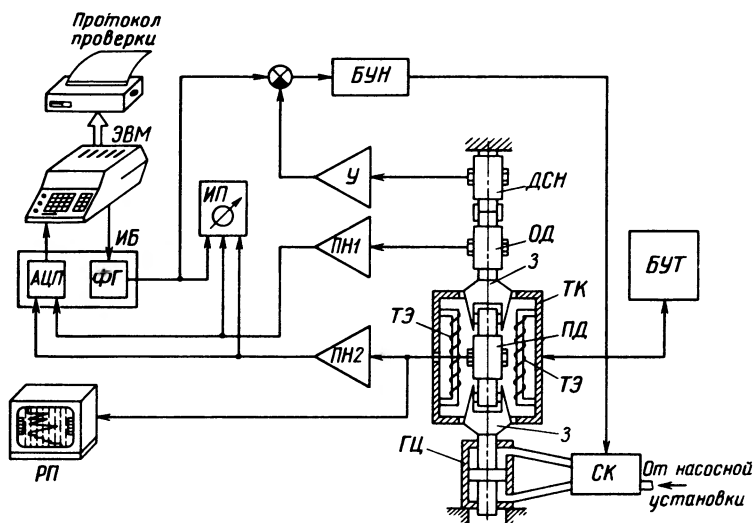


Рис. 61. Структурная схема стенда для метрологического обеспечения тензорезисторных датчиков сил и ТР сил в целом

процессом обработки результатов измерений; защиты стенда при недопустимых изменениях воспроизводимых величин, неисправностях поверяемых приборов и систем управления поверкой.

Для иллюстрации принципов построения систем метрологического обеспечения с использованием ТР на рис. 61 показана структурная схема созданного при участии автора автоматизированного стенда для метрологического контроля тензорезисторных датчиков сил (тензодинамометров) (А.с. 1053577 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L 25/00). Стенд обеспечивает: плавное многократное нагружение поверяемого датчика ПД последовательно от одной реперной точки к другой до номинальной нагрузки и обратно с контролем прохождения реперных точек по образцовому датчику ОД, причем для исключения влияния гистерезиса датчика на этот процесс предусмотрен подход к заданным значениям нагрузок без перегулирования всегда с одной стороны (снизу — при нагружении, сверху — при разгрузке); поддержание заданной нагрузки во время съема показаний ПД в реперных точках, а также при исследовании дрейфа выходного сигнала; нагрев ПД до заданной температуры и поддержание ее во время исследования температурного влияния на показания; закрепление ПД под фиксированными углами к направлению действия силы для исследования влияния эксцентриситета; обработку полученных

результатов для вычисления метрологических показателей (систематической и случайной погрешности, гистерезиса, нелинейности статической характеристики и др.) и определения по ним класса точности *ПД*; распечатку протокола поверки.

В состав стенда входят: силонагружающее устройство, системы управления нагружением и измерения показаний датчиков. Силонагружающее устройство представляет собой гидроцилиндр *ГЦ*, связанный с закрепленной на раме силовой цепочкой, которая содержит соединенные последовательно тензорезисторные датчики: образцовый датчик *ОД*, датчик системы управления нагружением *ДСН* и поверяемый датчик *ПД*, устанавливаемый в универсальных захватах *З*. Рама имеет подвижную верхнюю траверсу для обеспечения поверки датчиков различных размеров. В качестве силонагружающего устройства можно использовать стандартную машину для прочностных испытаний образцов материалов.

Для управления нагружением применена система с блоком *БУН*, который формирует сигнал управления исполнительным органом (сервоклапаном) *СК* гидроцилиндра *ГЦ* по разности сигналов задания и обратной связи. Сигнал задания определяется цифровым кодом микроЭВМ, который преобразуется в функциональном генераторе *ФГ* интерфейсного блока *ИБ* в аналоговый сигнал заданной амплитуды и скорости изменения. Отрицательная обратная связь в контуре управления осуществляется датчиком *ДСН*, соединенным с *БУН* через усилитель *У* (в качестве источника сигнала обратной связи может использоваться и *ОД*).

Система измерений включает в себя два идентичных высокостабильных нормирующих усилителя-преобразователя *ПН1* и *ПН2*, через которые сигналы образцового и поверяемого датчиков подаются на *АЦП*, а затем в виде цифрового кода поступают в ЭВМ для обработки. Для контроля процесса нагружения сигналы задания, обратной связи и с выходов усилителей *ПН* поступают на цифровой измерительный прибор *ИП*. При градуировке регистрирующих приборов *РП*, которая может совмещаться с поверкой, используется дополнительный выход *ПД*.

Для исследования температурного влияния на показания *ПД* применяют термокамеру *ТК* с электронагревательными элементами *ТЭ*, в которую помещают *ПД*. Для управления нагревом служит блок *БУТ*, содержащий терморегулятор с импульсной коррекцией, принцип действия которого подобен использованному в регуляторе нагрузок, схема которого приведена на рис. 58.

Управление от ЭВМ обеспечивает полную автоматизацию

нагружения *ПД* и обработки их показаний. При этом программными средствами достигается выполнение всех метрологических требований, и в частности требования нагружения до реперных точек без перерегулирования. Нагрузки в реперных точках  $P_i = (P_N/n)i$ , где  $P_N$  — номинальная нагрузка *ПД*;  $n$  — общее число реперных точек;  $i$  — порядковый номер точки из области  $i = \{1, n\}$ . При увеличении нагрузки от точки  $i - 1$  до  $i$  задается нагрузка  $0,95 P_i$ . Далее последовательным увеличением сигнала задания шагами до  $0,001 P_N$  добиваются уменьшения разности  $\Delta = P_i - P_{\text{од}}$  ( $P_{\text{од}}$  — нагрузка по показаниям *ОД*) до уровня  $\Delta \leq \delta_{\text{од}}$ , где  $\delta_{\text{од}}$  — основная погрешность *ОД*. При этом на каждом шаге  $k$  контролируется плавность нагружения по соотношению  $\Delta_k < \Delta_{k-1}$  (по мере приближения к заданной нагрузке показания *ОД* должны все меньше отличаться от  $P_i$ ). Если это соотношение не выполняется, то программные средства защиты фиксируют сбой в работе системы нагружения и останавливают процесс поверки. По аналогичному алгоритму работает система при убывании нагрузки, с той лишь разницей, что начальное значение задается равным  $1,05 P_i$ , а далее уменьшается по  $0,001 P_N$ .

При попадании  $\Delta_k$  в доверительный интервал  $\pm \delta_{\text{од}}$  по командам ЭВМ производится измерение показаний *ПД*, которые усредняются по трем повторениям для каждой ступени и используются для определения погрешностей по расчетным формулам, взятым в соответствии с ГОСТ 15077—78.

Совокупность *ОД* и *ПН1* совместно с ЭВМ и *ИБ* можно рассматривать как ТР силы с программно изменяемыми уровнями срабатывания, соответствующими реперным точкам (здесь ЭВМ выполняет функции программного задатчика и устройства сравнения). По командам этого ТР при достижении с необходимой точностью реперных точек производится замер показаний *ПД*.

Сравнивая получаемые значения погрешностей с их нормированными значениями для различных категорий точности, ЭВМ определяет класс точности *ПД*.

Стенд позволяет определять также ряд дополнительных характеристик: дрейф показаний при длительной нагрузке, абсолютные значения отклонений показаний *ПД* в реперных точках от расчетных и другие.

Завершается процесс поверки *ПД* распечаткой протокола установленной формы, в котором указываются параметры датчика, условия аттестации (дата, температура, режим поверки), все полученные погрешности и класс точности.

Рассмотренный стенд может быть применен для поверки ТР сил в целом. В этом случае метрологические характеристики ТР



определяются по разности показаний *ПД* и *ОД* в моменты срабатывания и отпускания ТР.

Аналогично могут быть построены автоматизированные стенды для метрологического обеспечения тензорезисторных датчиков и ТР давлений, моментов и других величин.

## 7. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ РЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На базе ТР строят надежные, быстродействующие, точные, простые в эксплуатации системы контроля, сигнализации, регулирования параметров для разнообразных технологических установок. Широкое применение такие системы нашли в металлургической, горно-добывающей, обрабатывающей, бумажной, химической и других отраслях промышленности.

В различных отраслях промышленности возникает задача контроля и регулирования натяжения ленты: в металлургии — контроль и регулирование натяжения полосы в листопрокатном стане, проволоки в волочильном станке; в бумажной промышленности — контроль и регулирование натяжения бумажного полотна при управлении различными транспортными лентами (оптимальное натяжение ленты увеличивает ресурс машин).

В одном из устройств, предназначенных для подобных целей (рис. 62, *а, б*), для обеспечения достаточной точности измерения использованы два тензорезисторных датчика сил *1, 2*, установленных под измерительный валик *3*. От выбора угла охвата лентой валика *3* зависит соотношение между силой, воспринимаемой датчиком, и натяжением ленты. Сигналы датчиков *1* и *2*, пропорциональные воспринимаемым силам  $P_1$  и  $P_2$ , после суммирования и усиления (при необходимости) направляются в прибор *6* для визуального контроля силы  $P = P_1 + P_2$ . Встроенные в прибор электроконтактные преобразователи, срабатывающие при достижении предельных значений контролируемого натяжения, служат для включения аварийной сигнализации *7* (например, при обрыве ленты) и воздействия на регулятор натяжения *8* (в соответствии с сигналом *9*, подаваемым на колодочный тормоз *4* меняется сила торможения). Определяя дополнительно разность сигналов датчиков *1* и *2* (например, с помощью дифференциального ТР по схеме, приведенной на рис. 43), можно контролировать симметричность натяжения ленты.

Для сигнализации о недопустимых значениях натяжения

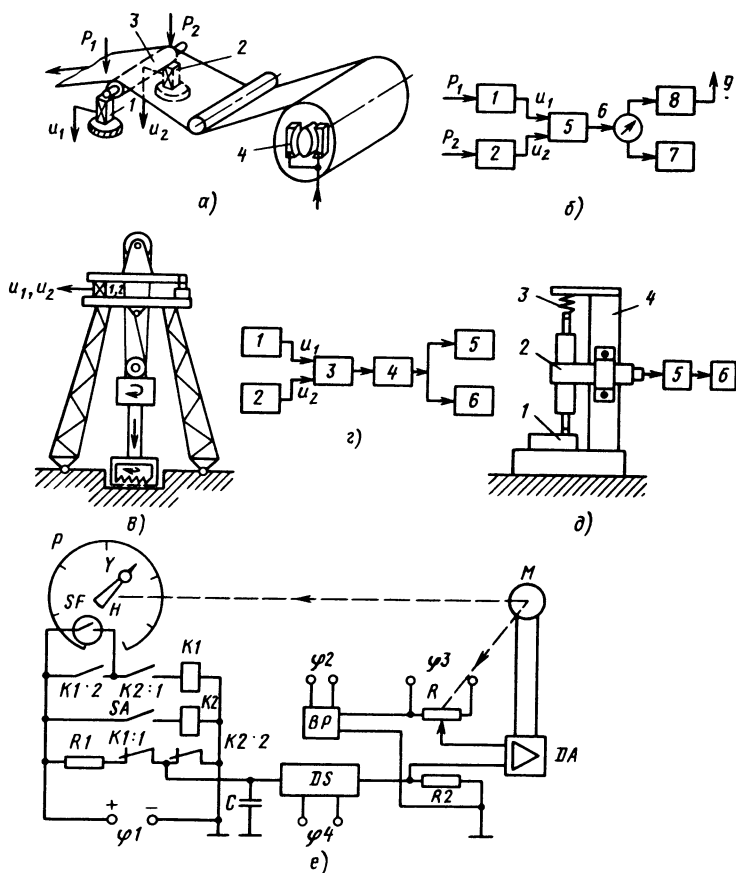


Рис. 62. Устройства на базе ТР для автоматизации технологических процессов:

а, б – конструкция и структурная схема устройства для контроля и регулирования натяжения ленты; в, г – конструкция и структурная схема устройства для контроля и регулирования силы подачи бура в бурильных установках; д – конструкция устройства для контроля геометрических размеров деталей в процессе их обработки; е – схема устройства для дозирования жидкого чугуна

и регулирования натяжения применимо двухпороговое ТР, подобное показанному на рис. 47.

Аналогично строят устройства контроля и регулирования сил на валках клетей прокатных станов, применяемых для предохранения от перегрузок и поддержания оптимальных сил прокатки. Тензорезисторные датчики размещают в узлах

установки валков, на силовых элементах клетки, на предохранителе (в виде чугунного валка), который при определенном давлении разрушается и обеспечивает падение давления на рабочих валках до нуля.

Для контроля усилий при штамповке, от которых зависит качество изготавливаемых деталей, применимы ТР с тензорезисторами. Их клеят на раму пресса, причем с целью обеспечения максимально возможной чувствительности выбирают ту часть рамы, где суммируются растягивающая и изгибающая составляющие.

В устройстве для контроля и регулирования силы подачи бура (рис. 62, в, з) в буровой установке сигналы от двух тензорезисторных датчиков сил 1 и 2 после суммирования в блоке 3 и усиления в блоке 4 направляются в регистрирующий прибор 5 и регулятор 6, выполненный, например, по одной из схем, приведенных в п. 1 гл. 3.

Для контроля крутящих моментов двигателей целесообразно применять ТР с датчиками сил, установленными в опорах самого двигателя или промежуточных механизмов и воспринимающими реактивный момент.

ТР нашли применение в устройствах контроля и сигнализации опасных давлений грунта в горных породах в процессе строительства (и после него) подземных сооружений, например туннелей. Датчик одного из таких устройств, который устанавливается на цементе между наружной поверхностью облицовки секции туннеля и породой, имеет упругий элемент в форме перевернутого блюда сферической формы. Внешний край элемента опирается на основание, а его центр соприкасается с плитой. Пространство между плитой и упругим элементом заполняется легко деформируемым материалом (силиконовой резиной). Тензорезисторы устанавливают на внутренней поверхности элемента и на основании симметрично относительно центральной оси датчика. Мост, в плечи которого включены тензорезисторы, подключают к измерительному прибору и схеме, например, аналогичной показанной на рис. 32. Характеристики упругого элемента выбирают так, чтобы он терял устойчивость и включал сигнал при достижении опасного уровня напряжений в стенках туннеля.

В тензорезисторном устройстве для контроля геометрических размеров деталей при серийном производстве (рис. 62, д) тензорезисторный датчик перемещений 2 со штифтовым толкателем, построенный по принципам, рассмотренным в п. 6 гл. 2, крепится на неподвижном штативе 4. Пружина 3 поджимает толкатель к контролируемой детали 1. При номинальном раз-

мере детали толкатель находится примерно в среднем положении. Пропорциональное контролируемому размеру напряжение с выхода датчика после усиления в блоке 5 используется для контроля, например, с помощью цифрового вольтметра 6, и (или) для приведения в действие сортировочного устройства.

На базе ТР массы выполняются разнообразные дозирующие устройства. Так, на базе тензорезисторных весов с измерителем компенсационного типа, в который встроен светоконтактный преобразователь положения стрелки указателя, создана система управления стопорным механизмом разливочного ковша для жидкой стали. Процесс дозирования начинается с момента подъема стопора. После уменьшения массы ковша при выдаче заданной порции металла флажок указателя прибора прерывает световой луч осветителя светоконтактного преобразователя, что обеспечивает срабатывание стопорного механизма.

Во ВНИКТИ трубной промышленности разработано устройство (рис. 62, е) для дозирования жидкого чугуна при центробежной отливке стали.

При заполнении металлом дозирочного ковша, опирающегося на массоизмерительный тензорезисторный датчик *BP*, измерительная автокомпенсационная система с реохордом *R*, усилителем *DA*, реверсивным двигателем *M* и отсчетным устройством *P* отслеживает переменную массу ковша, и стрелка *H* по шкале прибора в каждый момент времени показывает текущее значение массы порции металла. При повороте ковша для слива отмеренной порции датчик *BP* разгружается, и стрелка *H* перемещается к нулю, проходит нуль и устанавливается ниже нуля на упоре.

После слива металла ковш возвращается в исходное положение, замыкая выключатель *SA*, который, в свою очередь, включает реле *K2*, замыкающее контакты *K2 : 1* и размыкающее контакты *K2 : 2* ( $\varphi 1 - \varphi 4$  — источники питания). С этого момента через резистор *R1* начинается заряд накопительного конденсатора *C* запоминающего устройства *DS* на базе операционного усилителя с большим входным сопротивлением.

По мере заряда конденсатора *C* на выходе *DS* появляется напряжение, которое подается на компенсирующий резистор *R2*, где сравнивается с сигналом начального разбаланса датчика *BP*. Разностный сигнал подается на вход усилителя *DA*, заставляя стрелку *H* перемещаться к нулевой отметке шкалы прибора, т. е. осуществляется автоматическая установка нуля. На конце стрелки *H* закреплен постоянный магнит *Y*, который при прохождении нулевой отметки замыкает магнитоуправляемый контакт *SF*. При этом срабатывает реле *K1*, замыкая контакты

$K1 : 2$  и размыкая  $K1 : 1$ . Заряд конденсатора  $C$  прекращается, и стрелка  $H$  устанавливается на нулевой отметке шкалы прибора. С этого момента начинается заливка новой порции металла. Отсчет каждой порции по шкале ведется от нулевой отметки.

ТР массы являются основным элементом многих смесительных установок, например, используемых для шихтования. Процесс смешивания осуществляется либо путем дозированной выдачи компонентов из соответствующих взвешиваемых отдельно емкостей, либо путем последовательно следующих друг за другом подач компонентов во взвешиваемую смесительную емкость. Для подобного процесса характерным является, наряду с собственно взвешиванием, ввод исходных данных в задатчик ТР о различных номинальных значениях компонентов и сигнализация о достижении уровней, заданных в соответствии с требуемым составом смеси.

Для автоматизации технологических процессов, связанных с многократным приложением нагрузок (например, процесса тренировки упругих элементов динамометров), целесообразно использовать тензорезисторные счетчики циклов нагружения на базе ТР (например, по схемам, приведенным в п. 1 гл. 2, с подключением на выходе счетных исполнительных органов) для автоматического отключения нагружающих устройств или переключения их режимов работы после отсчета заданного числа циклов нагружения.

Принимая во внимание постоянный рост качества выпускаемых промышленностью тензорезисторов, совершенствование принципов построения и элементной базы усилительно-преобразовательной аппаратуры для тензорезисторных датчиков, эффективность уже реализованных разнообразных применений тензорезисторных устройств, и в частности ТР, потенциальные возможности дальнейшего повышения их точности и надежности, можно сделать вывод о том, что их удельный вес в различных отраслях науки и техники, и в том числе в системах автоматизации производственных процессов, будет непрерывно возрастать.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауманн Э. Изменение сил электрическими методами/Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 430 с.
2. Измерение силы. Современные методы и средства: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Новосибирск: 1986. 76 с.
3. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В.В Ключева. М.: Машиностроение, 1982. Кн. 2. 560 с.
4. Логинов В.И. Электрические измерения механических величин. М.: Энергия, 1976. 104 с.
5. Макаров Р.А. Средства технической диагностики машин. М.: Машиностроение, 1981. 223 с.
6. Методы и средства тензометрии и их использование в народном хозяйстве / Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Кишинев: 1976. 65 с.
7. Осипович Л.А. Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979. 179 с.
8. Полупроводниковые датчики механических величин (тематическая подборка) // Приборы и системы управления. 1985. № 8. С. 14 – 26.
9. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
10. Тензометрия в машиностроении: Справочник / Под ред. Р.А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975. 287 с.
11. Электротензометрия (тематическая подборка) // Приборы и системы управления. 1976. № 1. С. 17 – 33.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Глава 1. Принципы построения, основные характеристики и методы расчета тензорезисторных реле .....	5
1. Принципы построения тензорезисторных реле .....	5
2. Характеристики тензорезисторных реле и требования, предъявляемые к ним .....	9
3. Составные элементы тензорезисторных реле .....	17
4. Особенности проектирования и расчета тензорезисторных реле .....	39
5. Классификация тензорезисторных реле .....	55
Глава 2. Основные виды тензорезисторных реле .....	56
1. Тензорезисторные реле относительных деформаций и меха- нических напряжений .....	56
2. Тензорезисторные реле сил .....	63
3. Тензорезисторные реле массы .....	74
4. Тензорезисторные реле крутящих моментов .....	80
5. Тензорезисторные реле давления .....	84
6. Тензорезисторные реле геометрических размеров, относи- тельных перемещений и общих деформаций .....	90
7. Тензорезисторные реле параметров движения .....	94
8. Тензорезисторные реле расходов газообразных и жидких сред .....	98
9. Тензорезисторные реле разрушений элементов конструк- ций .....	100
Глава 3. Примеры применения тензорезисторных реле .....	108
1. Тензорезисторные реле в автоматических регуляторах ....	108
2. Тензорезисторные реле в системах аварийной защиты ....	115
3. Тензорезисторные реле в автоколебательных системах воз- буждения переменных механических нагрузок .....	119
4. Тензорезисторные реле в усилителях механических коле- баний .....	133
5. Тензорезисторные реле в системах автоматизации стендовых испытаний конструкций на прочность .....	140
6. Тензорезисторные реле в автоматизированных системах метрологического обеспечения приборов для измерения меха- нических величин .....	148
7. Тензорезисторные реле в системах автоматизации техноло- гических процессов .....	152
Список литературы .....	157

## **ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ**

**Литвак Виктор Израилевич**

**ТЕНЗОРЕЛЕ.**

**РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ**

Редактор *А.В. Лысенко*

Художественный редактор *А.С. Вершинкин*

Технический редактор *Н.В. Михайлова*

Корректор *Л.Я. Шабашова*

Оператор *Е.Ю. Зорина*

**ИБ № 4973**

---

Сдано в набор 28.07.88.	Подписано в печать 13.01.89.	Т – 07714.
Формат 84×108 1/32.	Бумага офсетная № 1.	Гарнитура Пресс Роман.
Печать офсетная.	Усл. печ. л. 8,4.	Усл. кр.-отт. 8.61.
Уч.-изд. л. 8,45.	Тираж 9850 экз.	Заказ 68. Цена 45 к.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Машиностроение",  
107076, Москва, Стромывский пер., 4

---

Отпечатано в московской типографии № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли,  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24,  
с оригинала-макета, изготовленного в издательстве "Машиностроение"  
на наборно-пишущих машинах



## **УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!**

**Издательство "Машиностроение"**  
выпустит в 1990 году  
следующие книги из серии  
"Библиотека приборостроителя":

**Головченко А. Н.** Пневморезисторные преобразователи измерительных систем. — М.: Машиностроение, 1990. — 10 л.: ил. — (в обл.): 50 к.

Изложены основные принципы построения пневморезисторных преобразователей. Предложены новые пневморезисторные элементы, представлен их теоретический расчет и результаты экспериментального исследования. Указаны пути получения высокостабильных измерительных преобразователей. Рассмотрены принципы действия и конструкции новых типов пневмопреобразователей. Даны примеры использования пневморезисторных преобразователей для контроля параметров различных промышленных объектов.

Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией средств измерительной техники.

**Каледин Б. Ф.** Крепление оптических деталей эластичными материалами. — М.: Машиностроение, 1990. — 11 л.: ил. — (в обл.): 55 к.

Рассмотрены особенности крепления оптических деталей эластичными материалами. Приведены характеристики применяемых для этой цели эластичных материалов. Предложены технологические процессы эластичного крепления, различные методы испытания образцов. Даны рекомендации по конструктивному оформлению крепления деталей.

Для инженерно-технических работников конструкторских бюро и предприятий оптического приборостроения, занимающихся проектированием, изготовлением, модернизацией и ремонтом оптических приборов.

