

ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ, ФИЗИКО_ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СОСТАВА ЖИЖКОСТЕЙ И ГАЗОВ

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ВИБРАЦИИ.
2. ДАТЧИКИ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВИБРОСКОРОСТИ, ВИБРОУСКОРЕНИЯ.
3. СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИИ АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ.
4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ.
5. КОНТРОЛЬ СОСТАВА ГАЗА.
6. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗА.
7. ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ И ВЛАЖНОСТИ.

Общие сведения об измерении вибрации

Механические колебания тела носят название *вибрация*. Как известно, простейшим видом колебаний являются гармонические колебания, характеризующиеся *частотой, амплитуда смещения, амплитуда скорости и амплитуда ускорения*. В промышленности же наиболее распространенным видом колебаний являются негармонические колебания, возникающие в результате сложения ряда простых колебаний с самыми различными амплитудно-частотными характеристиками. Механические колебания (вибрация) в большинстве случаев представляют собой нежелательные явления, часто накладывающиеся на закономерные процессы движения.

Для механизмов роторного типа (электродвигатели, насосы, вентиляторы, турбины, генераторы и т. д.) контроль параметров вибрации очень распространен

В зависимости от того, в какой размерности измеряет вибрацию, их подразделяют на **три основных типа**, различающиеся по конструкции и особенностям применения:

- 1) датчики, измеряющие вибрацию в размерности виброперемещения (вибросмещения);
- 2) датчики, измеряющие вибрацию в размерности виброскорости;
- 3) наиболее распространенные в настоящее время датчики, измеряющие вибрацию в размерности виброускорения.



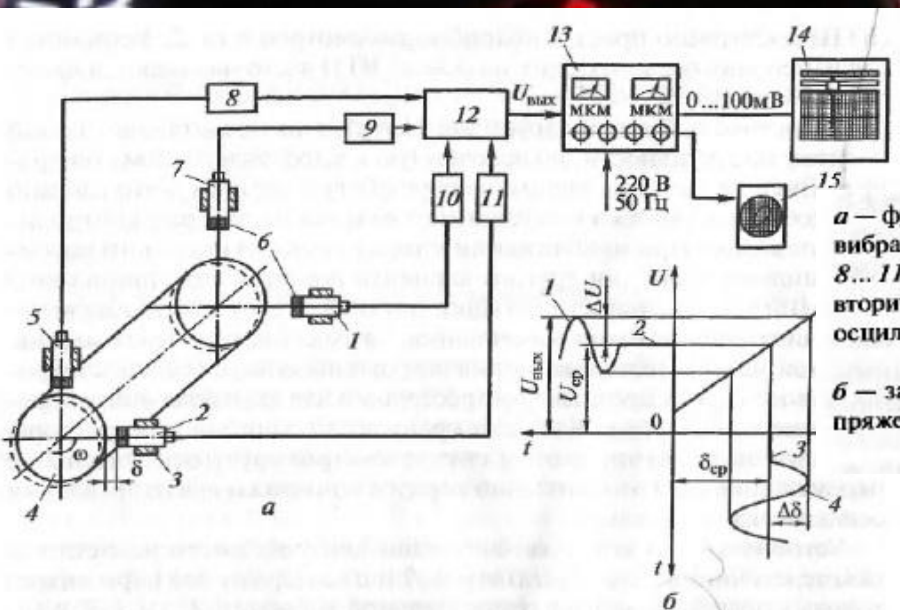
Датчики виброперемещения (вибросмещения)

В качестве датчиков виброперемещения и осевого сдвига в настоящее время преимущественно используются *вихретоковые* датчики. Устройства для измерения осевого сдвига на основе ВТП часто называются *проксиметрами*.

Вихретоковый вибродатчик конструктивно представляет собой катушку индуктивности, подключенную к высокочастотному генератору. Внешне катушка напоминает резьбовую шпильку, что сделано для удобства установки необходимого начального зазора с контролируемым валом. При приближении к торцу катушки стального массива, например вала или другого элемента конструкции, происходит изменение индуктивности катушки-датчика за счет изменения величины вихревых потоков рассеивания, замыкающихся через массив. Такие датчики в настоящее время широко используются для контроля осевого сдвига мощных компрессоров и для контроля виброперемещения валов в них. Катушка крепится на корпусе компрессора. Вихретоковый датчик в этом случае контролирует относительное перемещение вала относительно корпуса компрессора в направлении оси датчика — шпильки.



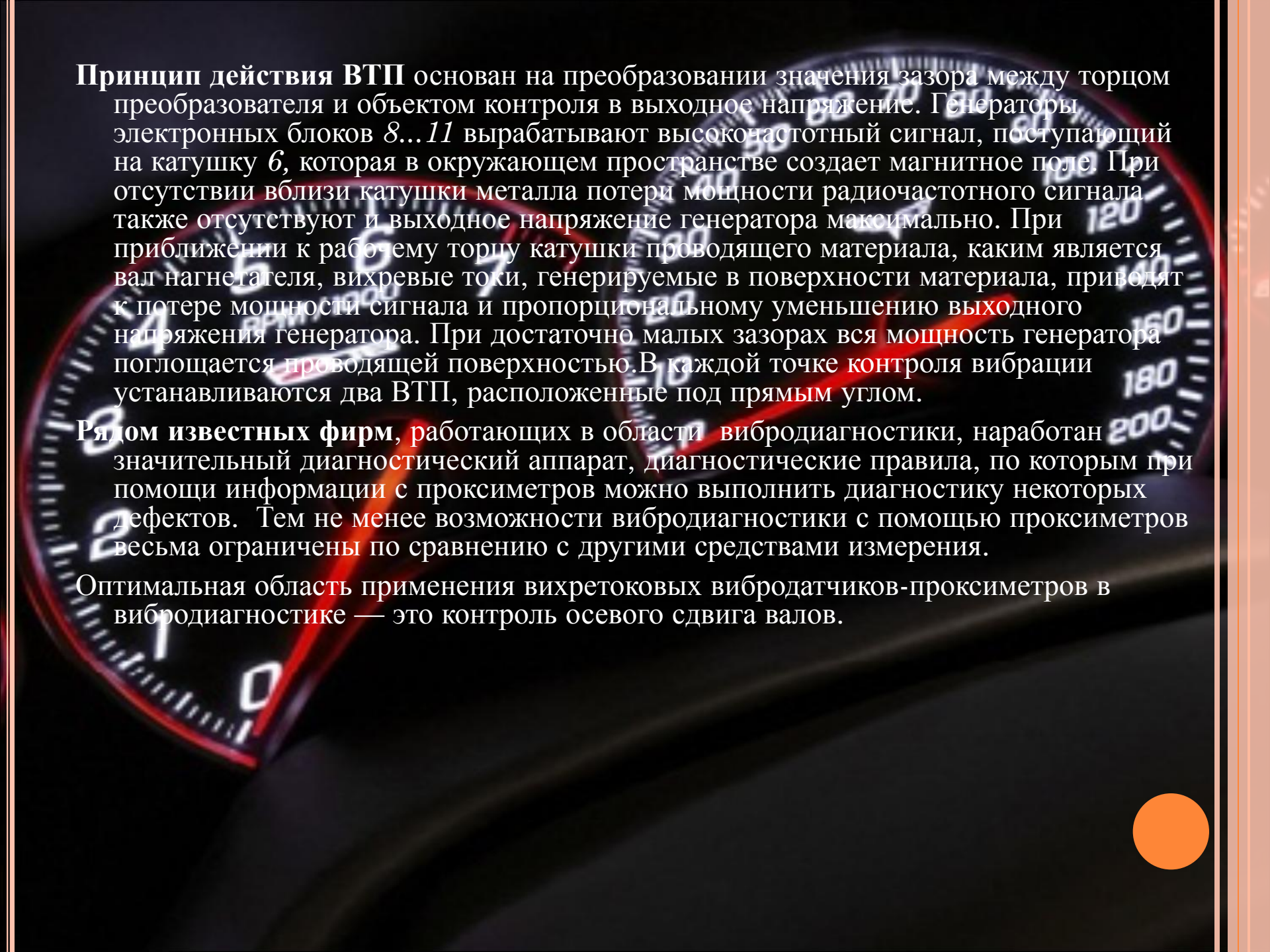
- Устройство для контроля вибрации центробежного нагнетателя** газоперекачивающего агрегата (рис. 7.1, *a*) содержит две пары вихретоковых преобразователей относительной вибрации 2, 5 и 7, 7, установленных в теле корпусов подшипников 3 вала 4 нагнетателя; электронные блоки 8, 9, Юта 11, соединенные с ВТП; блок обработки сигналов 12, многоканальный вторичный электронный прибор 13; регистратор вибрации 14; электронный осциллографический индикатор формы колебаний вала 15. В торцах ВТП расположены плоские катушки 6, намотанные тонким проводом и питаемые напряжением высокой частоты (1... 1,5 МГц) от электронных блоков 8... 11.



a — функциональная схема: 1, 2, 5, 7 — вихретоковые преобразователи относительной вибрации; 3 — тело корпуса подшипников; 4 — вал нагнетателя; 6 — плоские катушки; 8... 11 — электронные блоки; 12 — блок обработки сигналов; 13 — многоканальный вторичный электронный прибор; 14 — регистратор вибрации; 15 — электронный осциллографический индикатор формы колебаний вала; ω — циклическая скорость вращения; δ — контролируемый зазор;

b — зависимость выходного сигнала от зазора для одного датчика: 1 — выходное напряжение электронного блока; 2, 3 — напряжение U_{cp} , соответствующее среднему значению зазора δ_{cp} ; 4 — изменение зазора $\Delta\delta$

Рис. 7.1. Устройство для контроля вибрации центробежного нагнетателя на основе вихретоковых датчиков:



Принцип действия ВТП основан на преобразовании значения зазора между торцом преобразователя и объектом контроля в выходное напряжение. Генераторы электронных блоков 8...11 вырабатывают высокочастотный сигнал, поступающий на катушку 6, которая в окружающем пространстве создает магнитное поле. При отсутствии вблизи катушки металла потери мощности радиочастотного сигнала также отсутствуют и выходное напряжение генератора максимально. При приближении к рабочему торцу катушки проводящего материала, каким является вал нагнетателя, вихревые токи, генерируемые в поверхности материала, приводят к потере мощности сигнала и пропорциональному уменьшению выходного напряжения генератора. При достаточно малых зазорах вся мощность генератора поглощается проводящей поверхностью. В каждой точке контроля вибрации устанавливаются два ВТП, расположенные под прямым углом.

Рядом известных фирм, работающих в области вибродиагностики, наработан значительный диагностический аппарат, диагностические правила, по которым при помощи информации с проксиметров можно выполнить диагностику некоторых дефектов. Тем не менее возможности вибродиагностики с помощью проксиметров весьма ограничены по сравнению с другими средствами измерения.

Оптимальная область применения вихретоковых вибродатчиков-проксиметров в вибродиагностике — это контроль осевого сдвига валов.



Датчики виброскорости

Это достаточно узкий в настоящее время класс вибродатчиков.

Классический магнитоиндукционный датчик виброскорости представляет собой сильный кольцевой магнит, в зазоре которого перемещается катушка, связанная с инерционной массой. По закону электромагнитной индукции при перемещении конструкции оборудования, на которой установлен датчик, в катушке будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС), по величине всегда прямо пропорциональная скорости перемещения катушки в магнитном поле.

К достоинствам этого датчика можно отнести его простоту и хорошую стабильность основных параметров. Конструктивно эти преобразователи выполнены так, что их можно использовать для измерения как абсолютной, так и относительной виброскорости.

Применение дополнительного электронного интегрирования или дифференцирования измерительного напряжения позволяет использовать датчики абсолютной виброскорости для измерения виброперемещений и виброускорений.

Недостатком является ограниченный диапазон частот, от 10 до 1 000 Гц), а также большая масса постоянного магнита, существенно затрудняющая крепление датчика.



Принцип действия оптического (лазерного) датчика виброскорости основан на измерении сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимся со скоростью объектом (эффект Доплера), и заключается в сложении отраженного от объекта оптического сигнала, несущего информацию о колебательной скорости объекта, с излучаемым оптическим гетеродином сигналом.

Этот датчик предназначен для измерения продольной к лучу лазера проекции виброскорости поверхности исследуемого объекта. Поверхность исследуемого объекта может быть любая и не требует специальной подготовки. В состав датчика (рис. 7.2) входят измерительная головка 1, электронный блок 2 и соединительный кабель 3. Сигнал от измерительной головки 1 поступает на электронный блок 2, имеющий индикатор качества измеряемого сигнала, и далее на цифровой анализатор.

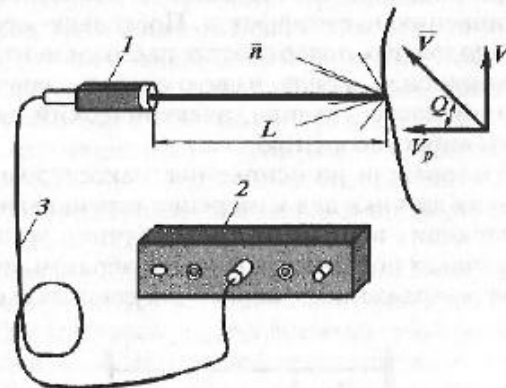
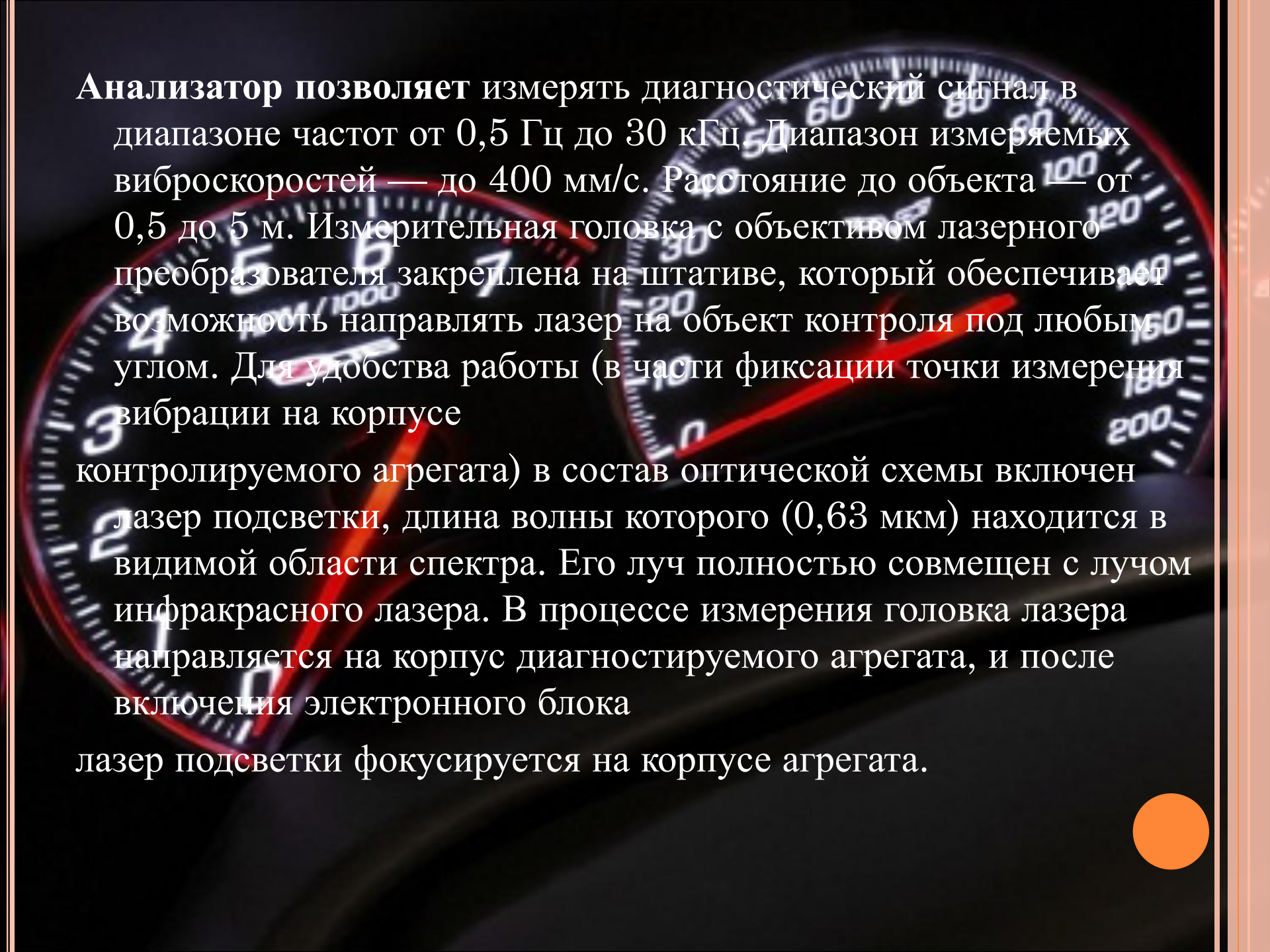


Рис. 7.2. Оптический (лазерный) преобразователь виброскорости:
1 — измерительная головка с объективом; 2 — электронный блок; 3 — соединительный кабель; \vec{V} — вектор колебательной скорости объекта; \vec{n} — направление лазерного луча; Q — угол между \vec{V} и \vec{n} ; V_p — проекция вектора колебательной скорости на направление луча лазера; V_n — проекция вектора колебательной скорости на ось, перпендикулярную направлению луча лазера



Анализатор позволяет измерять диагностический сигнал в диапазоне частот от 0,5 Гц до 30 кГц. Диапазон измеряемых виброскоростей — до 400 мм/с. Расстояние до объекта — от 0,5 до 5 м. Измерительная головка с объективом лазерного преобразователя закреплена на штативе, который обеспечивает возможность направлять лазер на объект контроля под любым углом. Для удобства работы (в части фиксации точки измерения вибрации на корпусе контролируемого агрегата) в состав оптической схемы включен лазер подсветки, длина волны которого (0,63 мкм) находится в видимой области спектра. Его луч полностью совмещен с лучом инфракрасного лазера. В процессе измерения головка лазера направляется на корпус диагностируемого агрегата, и после включения электронного блока лазер подсветки фокусируется на корпусе агрегата.



Датчики виброускорения

Это наиболее распространенный в настоящее время вид вибродатчиков. Датчики этого типа очень просты по своему устройству, надежны, имеют небольшую массу и габариты.

Пьезоакселерометр конструктивно представляет собой пьезокристалл с укрепленной сверху небольшой фиксированной массой. Вибрации оборудования передаются на корпус датчика, он перемещается вместе с кристаллом. Масса, укрепленная на кристалле, воздействует при этом на кристалл с силой, пропорциональной произведению ускорения на величину этой массы. На поверхности кристалла в результате пьезоэффекта возникает заряд, также пропорциональный ускорению контролируемой точки.

Схема такого вибродатчика представлена на рис. 7.3.

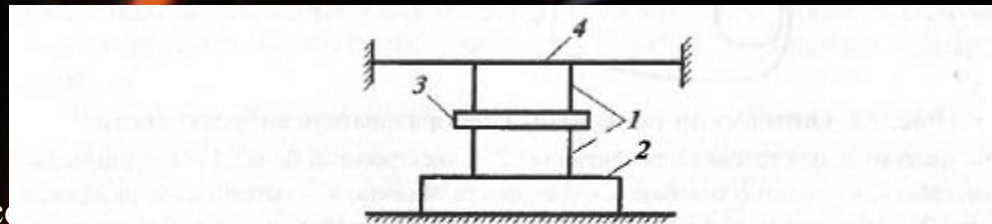


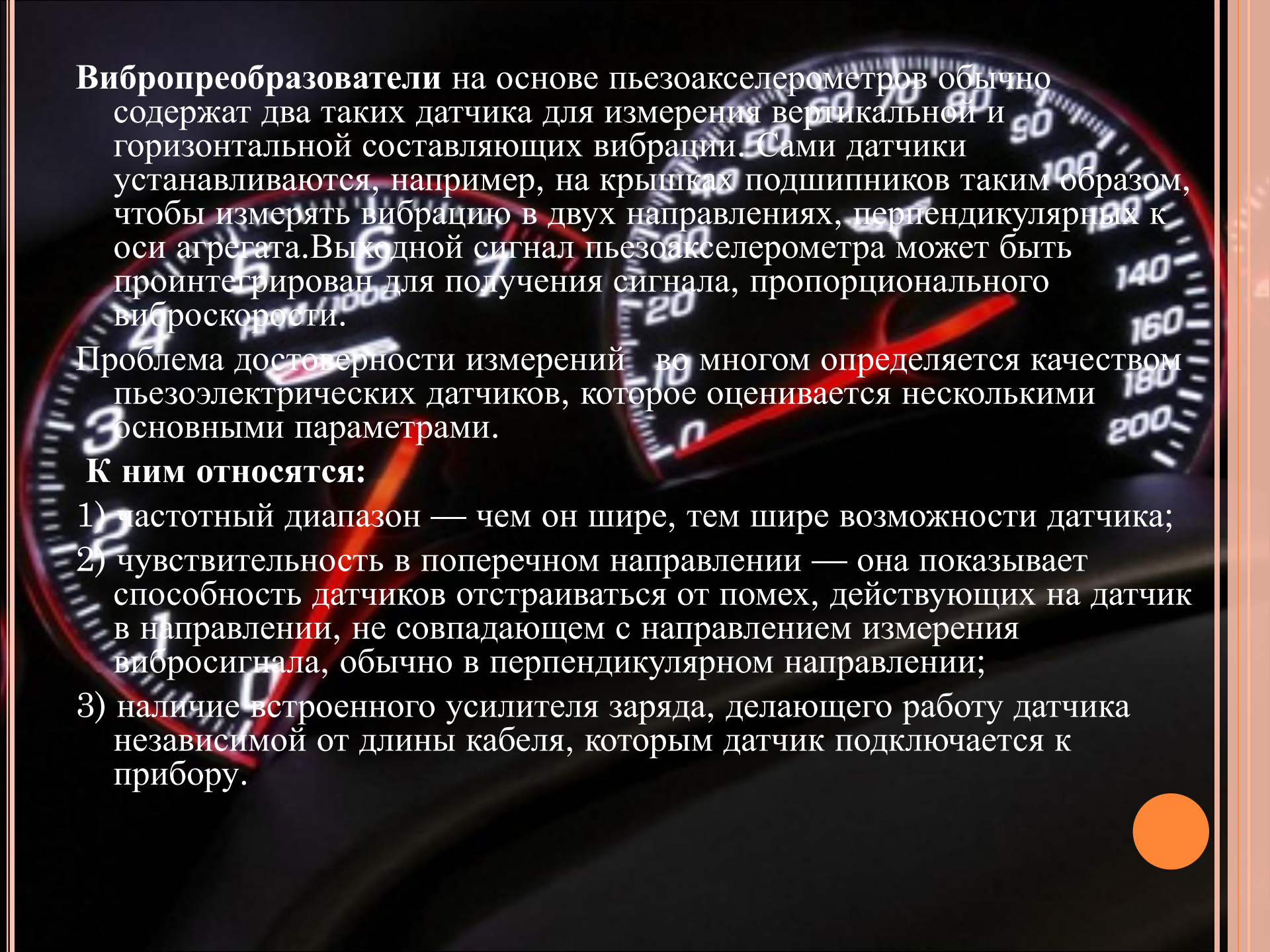
Рис. 7.3. Пьезоэлектрический вибродатчик:

1 — пьезопластины; 2 — массивный грузик; 3 — центральный электрод; 4 — пружины

Пьезопластины 1 соединены с корпусом датчика с помощью пьезопроводов. Заряды складываются на центральном электроде 3. При вибрации грузик 2 давит на пьезоэлемент, что приводит к возникновению пьезоэффекта.

При сжатии пьезоэлемента на них при сжатии заряды складываются на центральном электроде 3. При вибрации грузик 2 давит на пьезоэлемент, что приводит к возникновению пьезоэффекта.



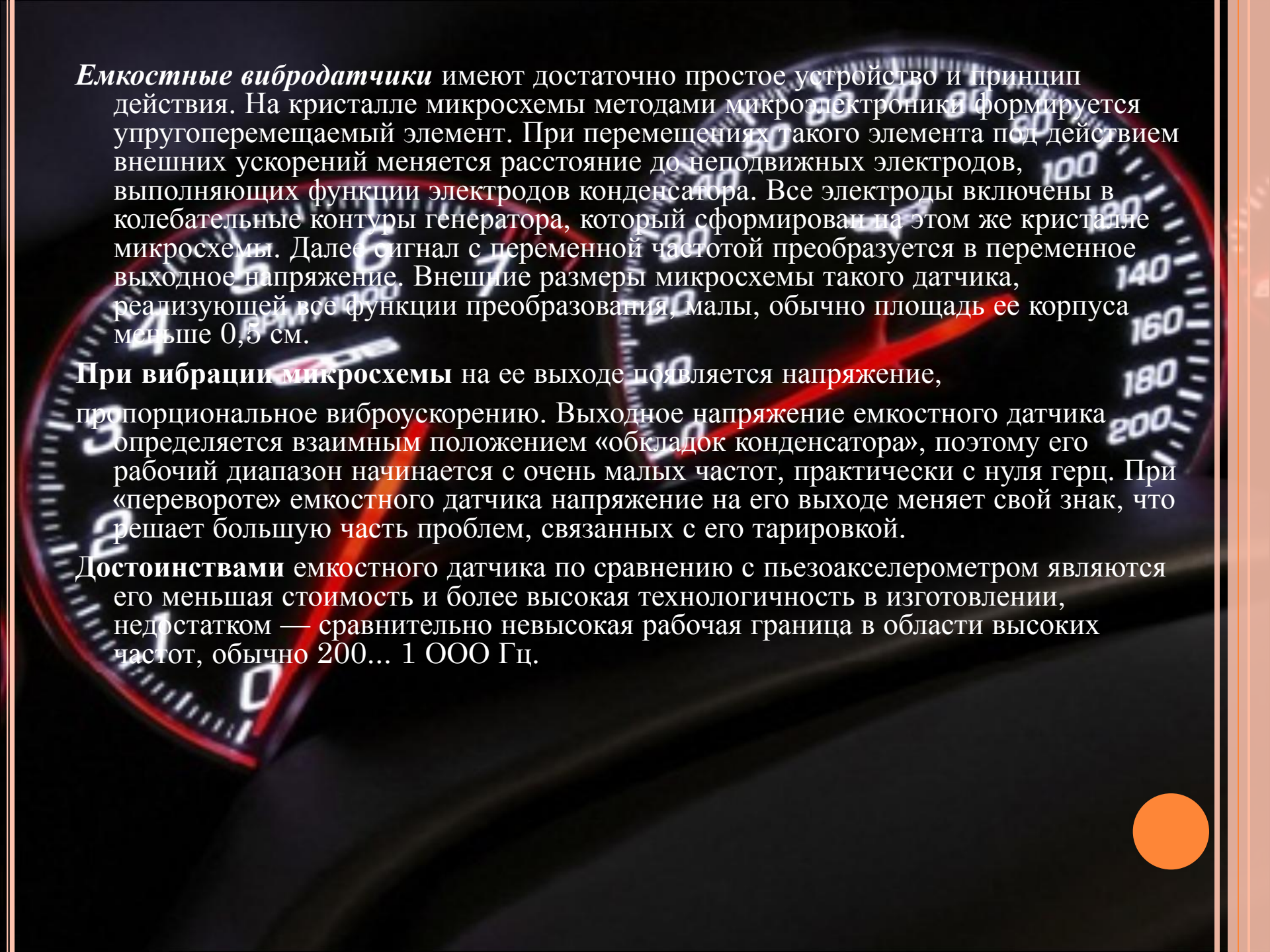


Вибропреобразователи на основе пьезоакселерометров обычно содержат два таких датчика для измерения вертикальной и горизонтальной составляющих вибрации. Сами датчики устанавливаются, например, на крышках подшипников таким образом, чтобы измерять вибрацию в двух направлениях, перпендикулярных к оси агрегата. Выходной сигнал пьезоакселерометра может быть проинтегрирован для получения сигнала, пропорционального виброскорости.

Проблема достоверности измерений во многом определяется качеством пьезоэлектрических датчиков, которое оценивается несколькими основными параметрами.

К ним относятся:

- 1) частотный диапазон — чем он шире, тем шире возможности датчика;
 - 2) чувствительность в поперечном направлении — она показывает способность датчиков отстраиваться от помех, действующих на датчик в направлении, не совпадающем с направлением измерения вибросигнала, обычно в перпендикулярном направлении;
 - 3) наличие встроенного усилителя заряда, делающего работу датчика независимой от длины кабеля, которым датчик подключается к прибору.
- 



Емкостные вибродатчики имеют достаточно простое устройство и принцип действия. На кристалле микросхемы методами микроэлектроники формируется упругоперемещаемый элемент. При перемещениях такого элемента под действием внешних ускорений меняется расстояние до неподвижных электродов, выполняющих функции электродов конденсатора. Все электроды включены в колебательные контуры генератора, который сформирован на этом же кристалле микросхемы. Далее сигнал с переменной частотой преобразуется в переменное выходное напряжение. Внешние размеры микросхемы такого датчика, реализующей все функции преобразования, малы, обычно площадь ее корпуса меньше 0,5 см.

При вибрации микросхемы на ее выходе появляется напряжение, пропорциональное виброускорению. Выходное напряжение емкостного датчика определяется взаимным положением «обкладок конденсатора», поэтому его рабочий диапазон начинается с очень малых частот, практически с нуля герц. При «перевороте» емкостного датчика напряжение на его выходе меняет свой знак, что решает большую часть проблем, связанных с его тарировкой.

Достоинствами емкостного датчика по сравнению с пьезоакселерометром являются его меньшая стоимость и более высокая технологичность в изготовлении, недостатком — сравнительно невысокая рабочая граница в области высоких частот, обычно 200... 1 000 Гц.



Системы измерения и анализа вибрации

В зависимости от задач, решаемых с помощью приборов или систем измерения и анализа вибрации, к ним предъявляются *различные технические требования*. Чаще всего эти требования могут определять:

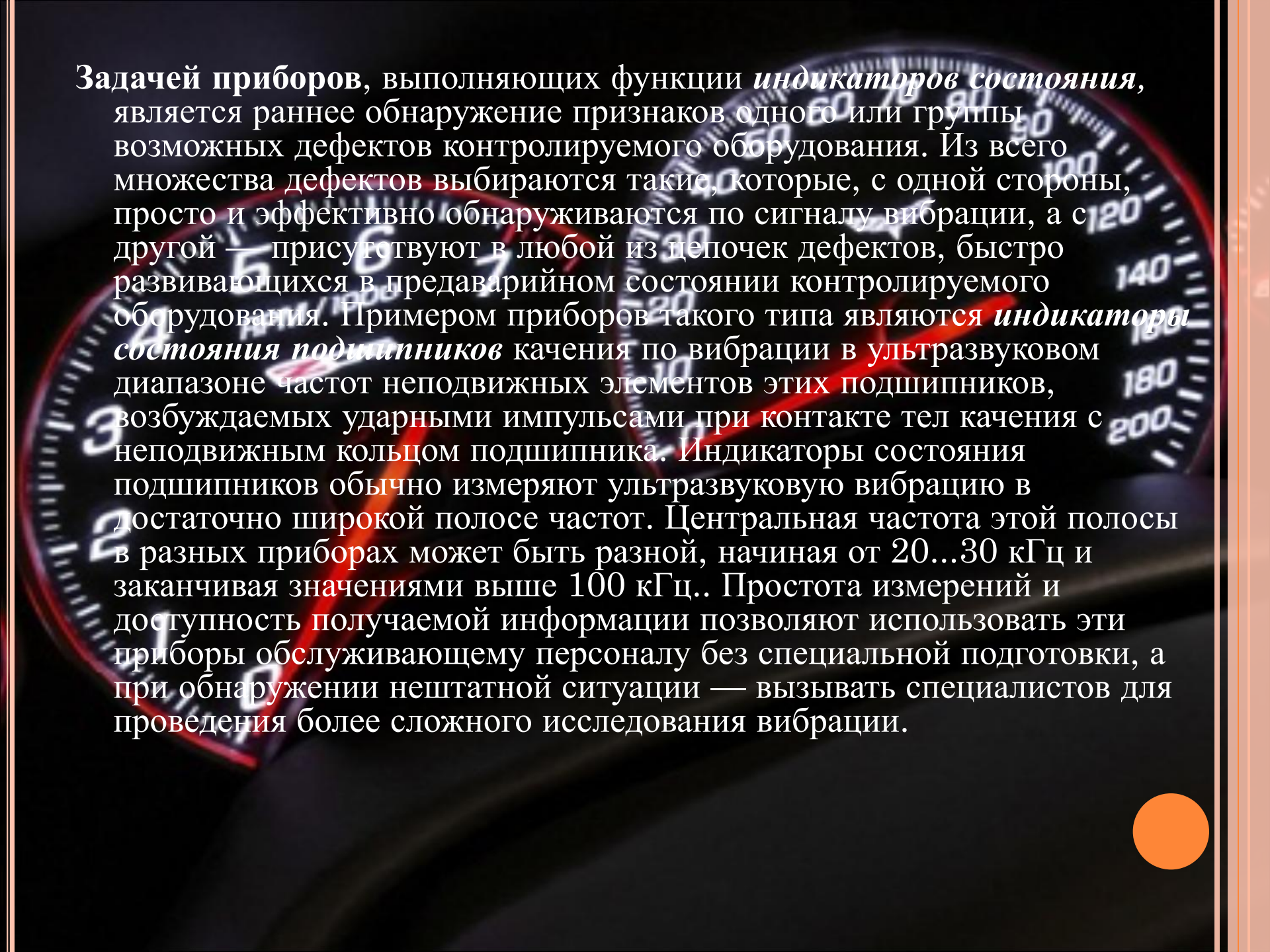
- 1) основные виды анализа и контролируемые параметры вибрации;
- 2) динамический и частотный диапазоны измерения и анализа;
- 3) линейность отдельных операций и параметров прибора (системы);
- 4) скорость выполнения операций анализа и время принятия решений;
- 5) количество параллельных каналов измерения и анализа;
- 6) помехоустойчивость и надежность и т.д.

Существующие **технические средства контроля вибрации** можно классифицировать *следующим образом*:

- 1) средства допускового контроля и аварийной защиты;
- 2) индикаторы состояния объектов контроля;
- 3) средства вибрационного мониторинга;
- 4) средства вибрационной диагностики;
- 5) исследовательские приборы и системы.

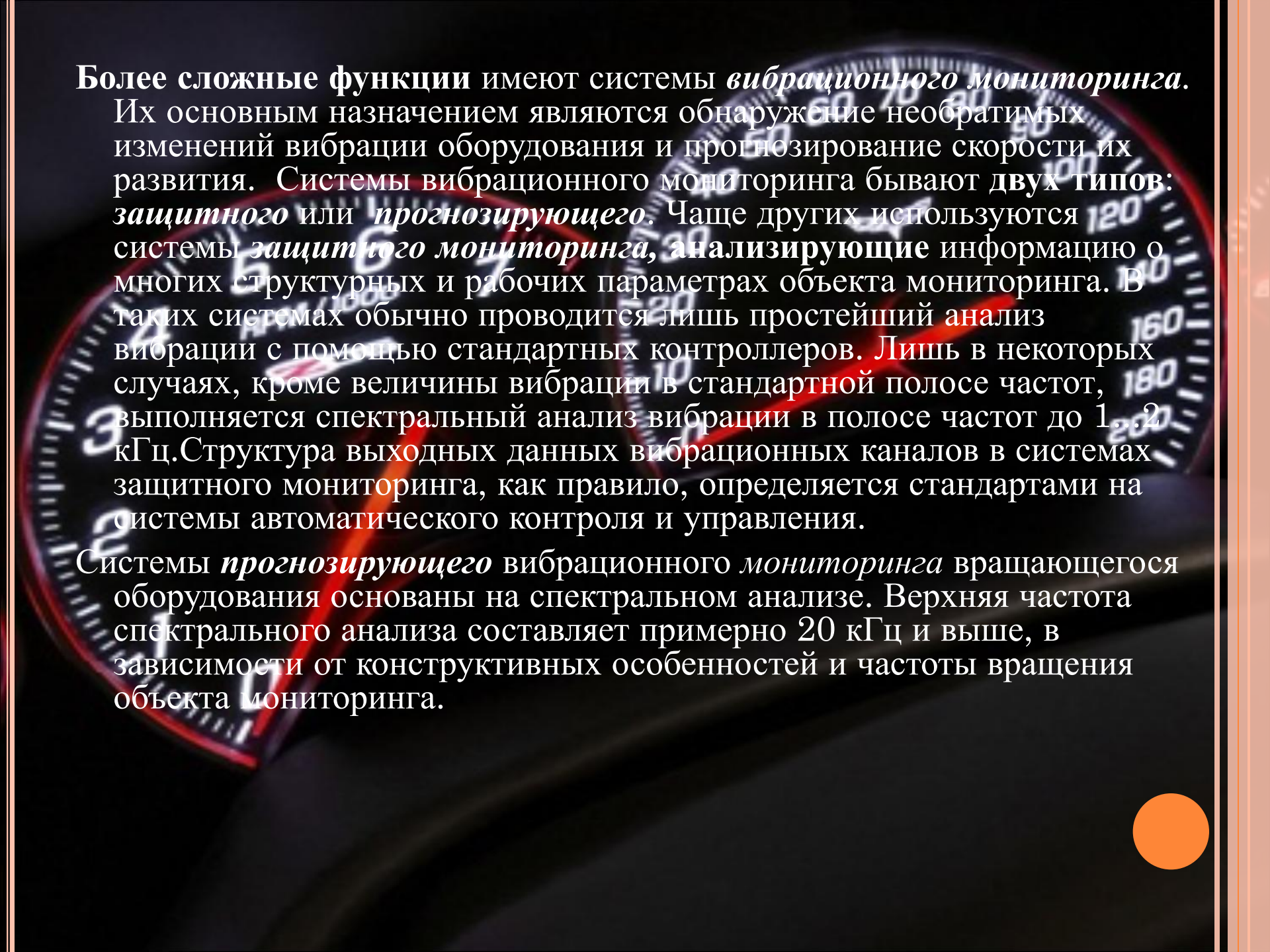
Простейшими по своим функциям являются *системы допускового контроля и аварийной защиты*.





Задачей приборов, выполняющих функции *индикаторов состояния*, является раннее обнаружение признаков одного или группы возможных дефектов контролируемого оборудования. Из всего множества дефектов выбираются такие, которые, с одной стороны, просто и эффективно обнаруживаются по сигналу вибрации, а с другой — присутствуют в любой из цепочек дефектов, быстро развивающихся в предаварийном состоянии контролируемого оборудования. Примером приборов такого типа являются *индикаторы состояния подшипников* качения по вибрации в ультразвуковом диапазоне частот неподвижных элементов этих подшипников, возбуждаемых ударными импульсами при контакте тел качения с неподвижным кольцом подшипника. Индикаторы состояния подшипников обычно измеряют ультразвуковую вибрацию в достаточно широкой полосе частот. Центральная частота этой полосы в разных приборах может быть разной, начиная от 20...30 кГц и заканчивая значениями выше 100 кГц. Простота измерений и доступность получаемой информации позволяют использовать эти приборы обслуживающему персоналу без специальной подготовки, а при обнаружении нештатной ситуации — вызывать специалистов для проведения более сложного исследования вибрации.





Более сложные функции имеют системы *вибрационного мониторинга*. Их основным назначением являются обнаружение необратимых изменений вибрации оборудования и прогнозирование скорости их развития. Системы вибрационного мониторинга бывают двух типов: *защитного* или *прогнозирующего*. Чаще других используются системы *защитного мониторинга*, анализирующие информацию о многих структурных и рабочих параметрах объекта мониторинга. В таких системах обычно проводится лишь простейший анализ вибрации с помощью стандартных контроллеров. Лишь в некоторых случаях, кроме величины вибрации в стандартной полосе частот, выполняется спектральный анализ вибрации в полосе частот до 1...2 кГц. Структура выходных данных вибрационных каналов в системах защитного мониторинга, как правило, определяется стандартами на системы автоматического контроля и управления.

Системы *прогнозирующего* вибрационного мониторинга вращающегося оборудования основаны на спектральном анализе. Верхняя частота спектрального анализа составляет примерно 20 кГц и выше, в зависимости от конструктивных особенностей и частоты вращения объекта мониторинга.



Измерение частоты вращения

Под скоростью вращения U (об/мин) обычно понимают число оборотов n твердого тела за единицу времени $t = 1$ мин:

$$U = n/t, \quad (7.3)$$

где t — время, мин.

В числе производных единиц Международной системы единиц (СИ) отсутствует термин «скорость вращения» и имеются только следующие термины:

- 1) угловая скорость ω (рад/с) как отношение угла φ (рад) поворота тела к времени вращения t (с):

$$\omega = \varphi/t, \quad (7.4)$$

- 2) частота вращения f (Гц), обозначающая число полных оборотов за единицу времени $t = 1$ с:

$$f = n/t, \quad (7.5)$$

где t — время, с.

Устройства для измерения частоты вращения называются *тахометрами*. По принципу действия они делятся на механические и электрические.



Наиболее простой конструкцией отличаются механические тахометры. Они делятся на стационарные, т. е. монтируемые неподвижно, и портативные.

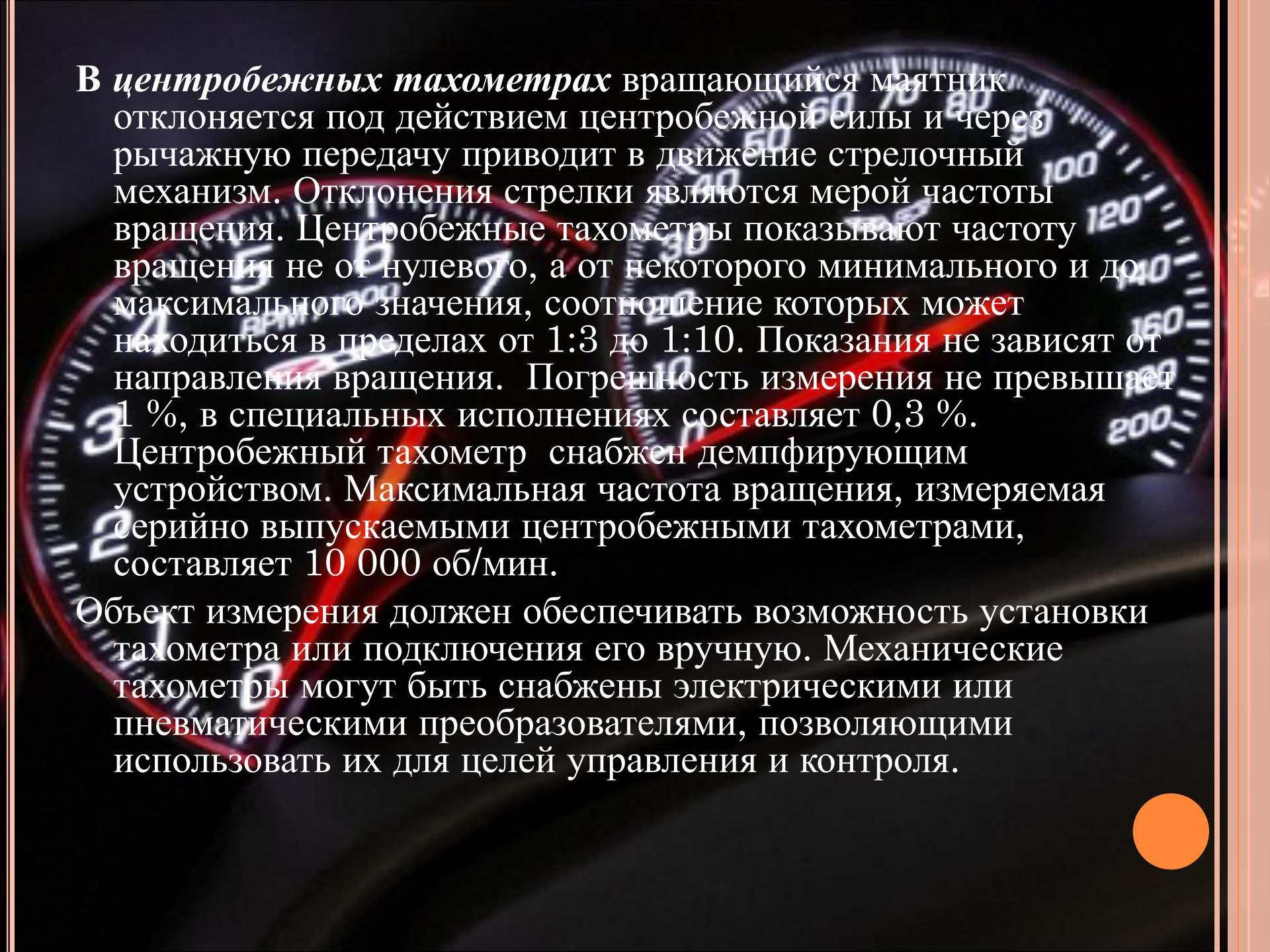
По физическому принципу имеется два типа механических тахометров: *тахометр на вихревых токах* и *центробежный тахометр*.

Тахометр на вихревых токах имеет вращающийся постоянный магнит, поле которого возбуждает вихревые токи в алюминиевом диске, соединенном с указателем. Возникающий при этом вращающийся момент пропорционален частоте вращения магнита и перемещает указатель до тех пор, пока момент, создаваемый вихревыми токами, не уравновесится моментом, созданным возвратной пружиной.

Тахометры этого типа применяют преимущественно в тех случаях, когда показания должны начинаться с нуля, соответствовать определенному направлению вращения и охватывать широкий диапазон измерения.


Погрешности составляют около $\pm 1\%$ и в простейших приборах достигают $\pm 3\%$ от конечного значения. Тахометры на вихревых токах выпускаются серийно и рассчитаны на скорости до 5 000 об/мин.

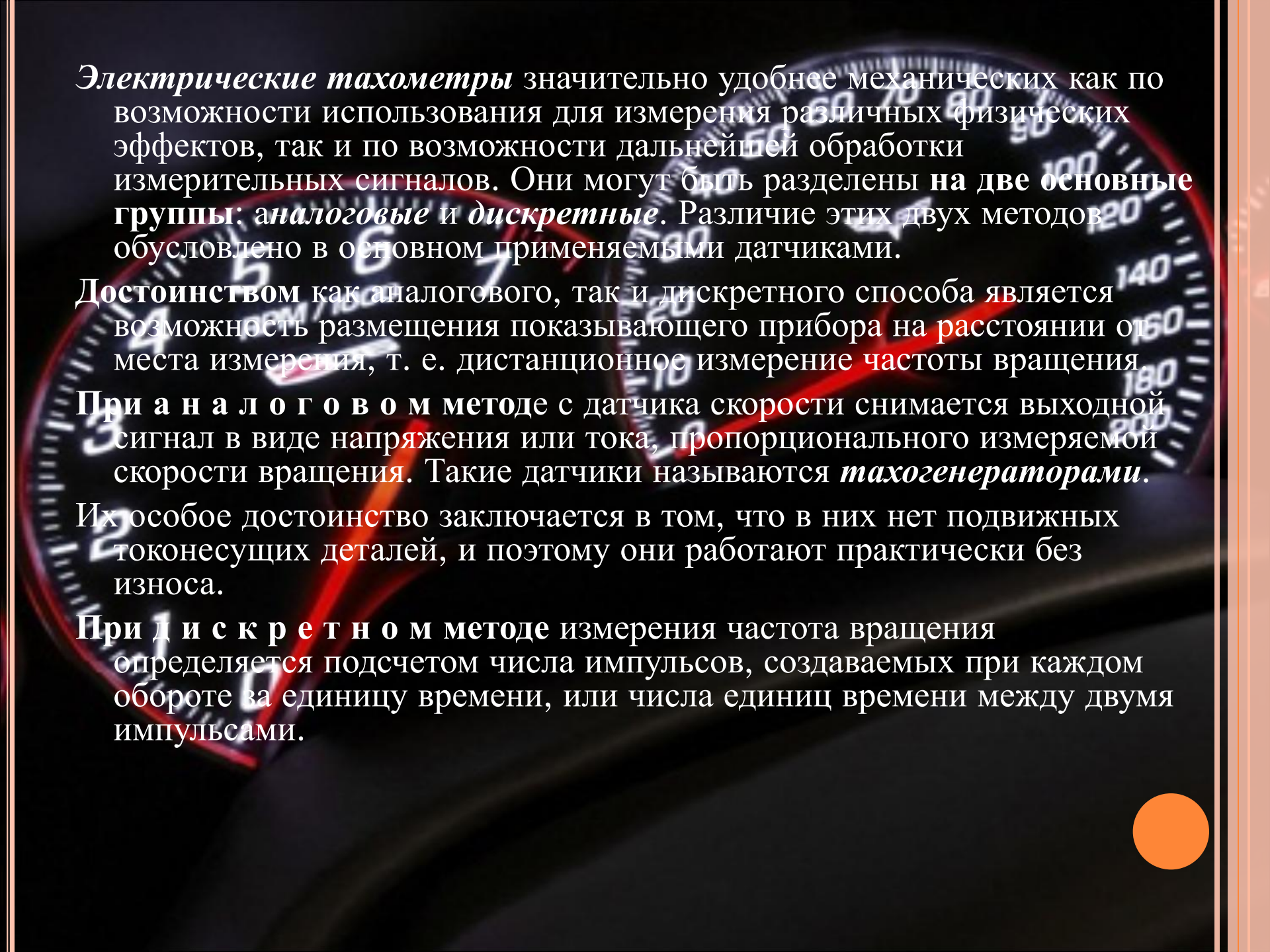




В *центробежных тахометрах* вращающийся маятник отклоняется под действием центробежной силы и через рычажную передачу приводит в движение стрелочный механизм. Отклонения стрелки являются мерой частоты вращения. Центробежные тахометры показывают частоту вращения не от нулевого, а от некоторого минимального и до максимального значения, соотношение которых может находиться в пределах от 1:3 до 1:10. Показания не зависят от направления вращения. Погрешность измерения не превышает 1 %, в специальных исполнениях составляет 0,3 %. Центробежный тахометр снабжен демпфирующим устройством. Максимальная частота вращения, измеряемая серийно выпускаемыми центробежными тахометрами, составляет 10 000 об/мин.

Объект измерения должен обеспечивать возможность установки тахометра или подключения его вручную. Механические тахометры могут быть снабжены электрическими или пневматическими преобразователями, позволяющими использовать их для целей управления и контроля.





Электрические тахометры значительно удобнее механических как по возможности использования для измерения различных физических эффектов, так и по возможности дальнейшей обработки измерительных сигналов. Они могут быть разделены на две основные группы: *аналоговые* и *дискретные*. Различие этих двух методов обусловлено в основном применяемыми датчиками.

Достоинством как аналогового, так и дискретного способа является возможность размещения показывающего прибора на расстоянии от места измерения, т. е. дистанционное измерение частоты вращения.

При **аналоговом** методе с датчика скорости снимается выходной сигнал в виде напряжения или тока, пропорционального измеряемой скорости вращения. Такие датчики называются *тахогенераторами*.

Их особое достоинство заключается в том, что в них нет подвижных токонесущих деталей, и поэтому они работают практически без износа.

При **дискретном** методе измерения частота вращения определяется подсчетом числа импульсов, создаваемых при каждом обороте за единицу времени, или числа единиц времени между двумя импульсами.



Электрические тахометры, взаимодействующие с объектом измерения без непосредственного контакта с вращающимся телом, потребляют от объекта незначительное количество энергии либо работают совсем без затраты энергии объекта.

Общим для всех электрических тахометров является возможность дистанционной передачи результатов измерений и их контроля и протоколирования совместно с результатами измерения других параметров.

Точное определение частоты вращения различных механизмов необходимо во многих областях техники. Рассмотрим несколько таких устройств более подробно.

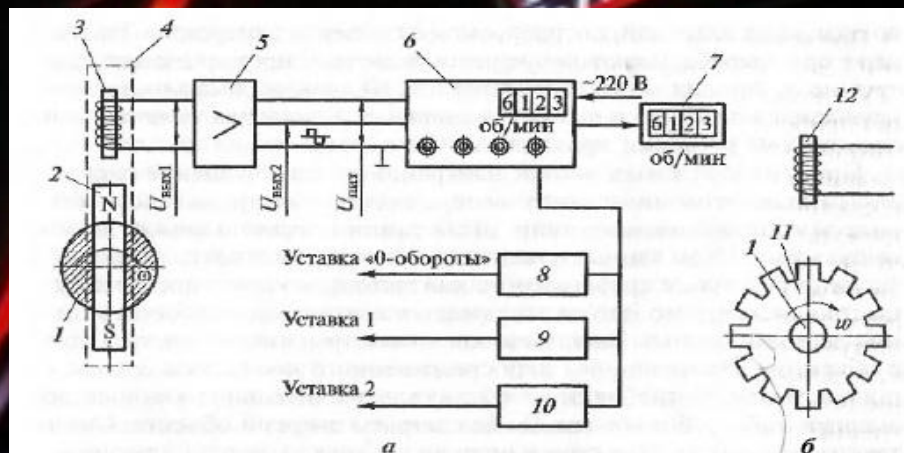
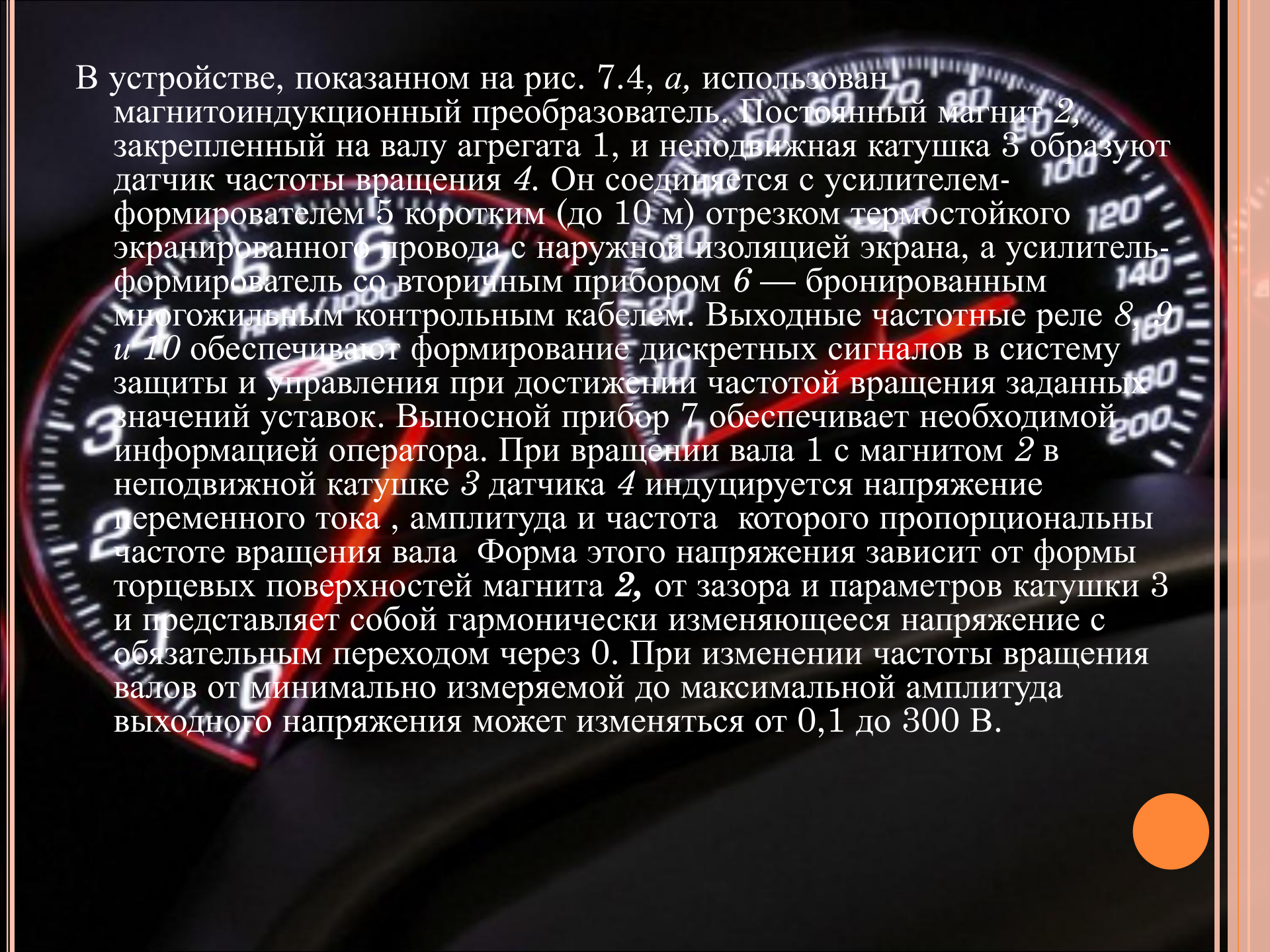


Рис. 7.4. Устройство для контроля частоты вращения:

a — с магнитоиндукционным преобразователем; *б* — индуктивный преобразователь с зубчатым диском; 1 — вал агрегата; 2 — постоянный магнит; 3 — неподвижная катушка; 4 — датчик частоты вращения; 5 — усилитель-формирователь импульсов; 6 — вторичный электронный цифровой прибор; 7 — выносной прибор; 8... 10 — выходные частотные реле; 11 — зубчатый диск; 12 — индуктивный преобразователь; ω — частота вращения вала; $U_{\text{вх1}}$ — напряжение переменного тока; $U_{\text{вх2}}$ — амплитуда прямоугольного двухполярного импульса; $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания



В устройстве, показанном на рис. 7.4, а, использован магнитоиндукционный преобразователь. Постоянный магнит 2, закрепленный на валу агрегата 1, и неподвижная катушка 3 образуют датчик частоты вращения 4. Он соединяется с усилителем-формирователем 5 коротким (до 10 м) отрезком термостойкого экранированного провода с наружной изоляцией экрана, а усилитель-формирователь со вторичным прибором 6 — бронированным многожильным контрольным кабелем. Выходные частотные реле 8, 9 и 10 обеспечивают формирование дискретных сигналов в систему защиты и управления при достижении частотой вращения заданных значений уставок. Выносной прибор 7 обеспечивает необходимой информацией оператора. При вращении вала 1 с магнитом 2 в неподвижной катушке 3 датчика 4 индуцируется напряжение переменного тока, амплитуда и частота которого пропорциональны частоте вращения вала. Форма этого напряжения зависит от формы торцевых поверхностей магнита 2, от зазора и параметров катушки 3 и представляет собой гармонически изменяющееся напряжение с обязательным переходом через 0. При изменении частоты вращения валов от минимально измеряемой до максимальной амплитуда выходного напряжения может изменяться от 0,1 до 300 В.



ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СОСТАВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Контроль состава газа. Виды анализа и анализируемых смесей. Понятие концентрации

Анализируемые вещества обычно представляют собой смеси различных компонентов. Эти смеси делятся на бинарные, многокомпонентные и псевдобинарные.

Бинарной называют газовую смесь, состоящую из двух газов, или жидкость, содержащую один растворенный компонент.

Многокомпонентной называют смесь из трех и более компонентов.

Псевдобинарной называют многокомпонентную смесь, в которой неопределяемые компоненты резко отличаются по физическим или физико-химическим свойствам от определяемого компонента.

Анализ состава бывает *качественный и количественный*.

Целью качественного анализа является получение информации о том, какие компоненты входят в смесь, а количественного, кроме того, — информации о количественном содержании каждого компонента, т. е. о его концентрации

Концентрация — доля какого-либо компонента в смеси. Для характеристики концентрации используется отношение количества определяемого компонента к количеству всей взятой для анализа пробы.



Общие сведения о газоаналитических приборах

Газоаналитические приборы являются устройствами массового применения на объектах транспорта нефти и газа. Они используются для контроля токсичных и взрывоопасных веществ в воздухе производственных помещений. Прежде чем перейти к рассмотрению конкретных приборов, введем несколько базовых для этой области терминов.

Газоанализатор (ГА) — это прибор, предназначенный для получения информации о значении концентрации измеряемого компонента или суммы компонентов в анализируемой газовой смеси.

ГА, применяемые при контроле и регулировании технологических процессов, обычно градуируют в единицах объемной доли. Для контроля воздушной среды используют ГА, градуированные в единицах массовой концентрации.

Нулевой газ — газ, который при прохождении через ГА не вызывает отклонение указателя показывающего устройства.

Поверочная газовая смесь (ПГС) — смесь нулевого газа с известным количеством измеряемого компонента, применяемая для градуировки и поверки ГА.

Нижний (верхний) концентрационный предел взрыва или воспламенения (НКПВ, ВКПВ) — наименьшая (наибольшая) концентрация горючих и взрывоопасных веществ в воздухе, в интервале которых могут произойти воспламенение или взрыв данной смеси от ее соприкосновения с источником воспламенения.



По исполнению ГА делятся на *стационарные и переносные*.

Стационарные ГА, являющиеся измерительными приборами, служат для

постоянного контроля опасных концентраций в окружающем воздухе или потоке газа.

Переносные ГА чаще всего представляют собой индикаторы, сигнализаторы, детекторы утечки газа и используются для выявления мест утечек и скоплений газа в колодцах, в месте проведения сварочных работ при ремонте трубопроводов, при обследовании различных установок.

По принципу действия ГА могут быть *тепловые, магнитные, оптические, комбинированные* и др.

Наибольшее распространение на объектах трубопроводного транспорта по-

лучили тепловые и оптические ГА



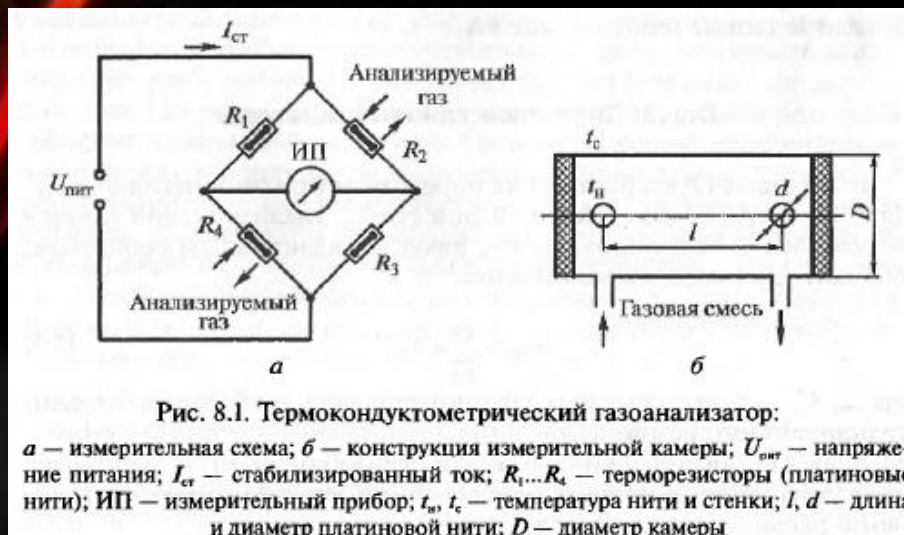
Тепловые газоанализаторы

В тепловых ГА концентрация определяемого компонента определяется по изменению теплопроводности $\lambda_{см}$ анализируемой газовой смеси (АГС).

Существует два типа тепловых газоанализаторов: *термокондуктометрические* и *термохимические*.

Принцип действия *термокондуктометрического* ГА основан на процессе теплопереноса в газах под действием градиента температур.

ГА представляет собой неуравновешенный мост (рис. 8.1, а), два плеча которого образованы терморезисторами R_2 и R_4 , помещенными в измерительные камеры, а два — сравнительными R_1 и R_3 . Измерительная камера (рис. 8.1, б) представляет собой полый цилиндр, внутри которого коаксиально расположена платиновая нить (чувствительный элемент).



Оптические газоанализаторы

Принцип действия оптических ГА основан на явлении избирательного поглощения анализируемым компонентом энергии излучения определенной длины волны, причем интенсивность этого поглощения зависит от концентрации анализируемого компонента в АГС.

В качестве источников излучения инфракрасных ГА используются нихромовые излучатели, нагретые до 700... 800 °С. Приемниками излучения служат батареи термопар или терморезисторов, фоторезисторы или конденсаторные микрофоны.

Используемые в промышленности оптико-акустические ГА, как правило, представляют собой дифференциальные двухлучевые схемы и имеют две кюветы: измерительную, через которую прокачивается АГС, и сравнительную, которая заполняется вспомогательной газовой смесью.

Оптико-акустические ГА используются для измерения в многокомпонентных смесях концентраций CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₃H₆ и др.

Диапазоны измерений этих анализаторов от 0...0Д до 0... 100% об.

Классы точности 2,5... 10 (в зависимости от диапазона измерений).



Измерение плотности жидкостей и газов. Общие сведения об измерении плотности

Плотностью ρ вещества называют физическую величину, определяемую отношением массы m вещества к занимаемому им объему V :

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (8.12)$$

Плотность измеряется в таких единицах, как кг/м³, г/см³. В некоторых случаях используется понятие **относительная плотность**, определяемая как отношение плотности данного вещества к плотности другого вещества при определенных физических условиях. **Относительную плотность жидкого вещества** принято выражать отношением его плотности, взятой при нормальной температуре (20 °С), к плотности дистиллированной воды при температуре 4 °С. Обозначается такая плотность ρ_4^{20} .

Относительную плотность газа принято выражать отношением его плотности к плотности сухого воздуха, взятых при нормальных условиях (температура 20 °С и давление 760 мм рт. ст.). Плотность жидкостей и газов уменьшается с увеличением температуры. Плотность газов увеличивается с увеличением давления, плотность жидкости от давления практически не зависит.



Основные виды плотномеров

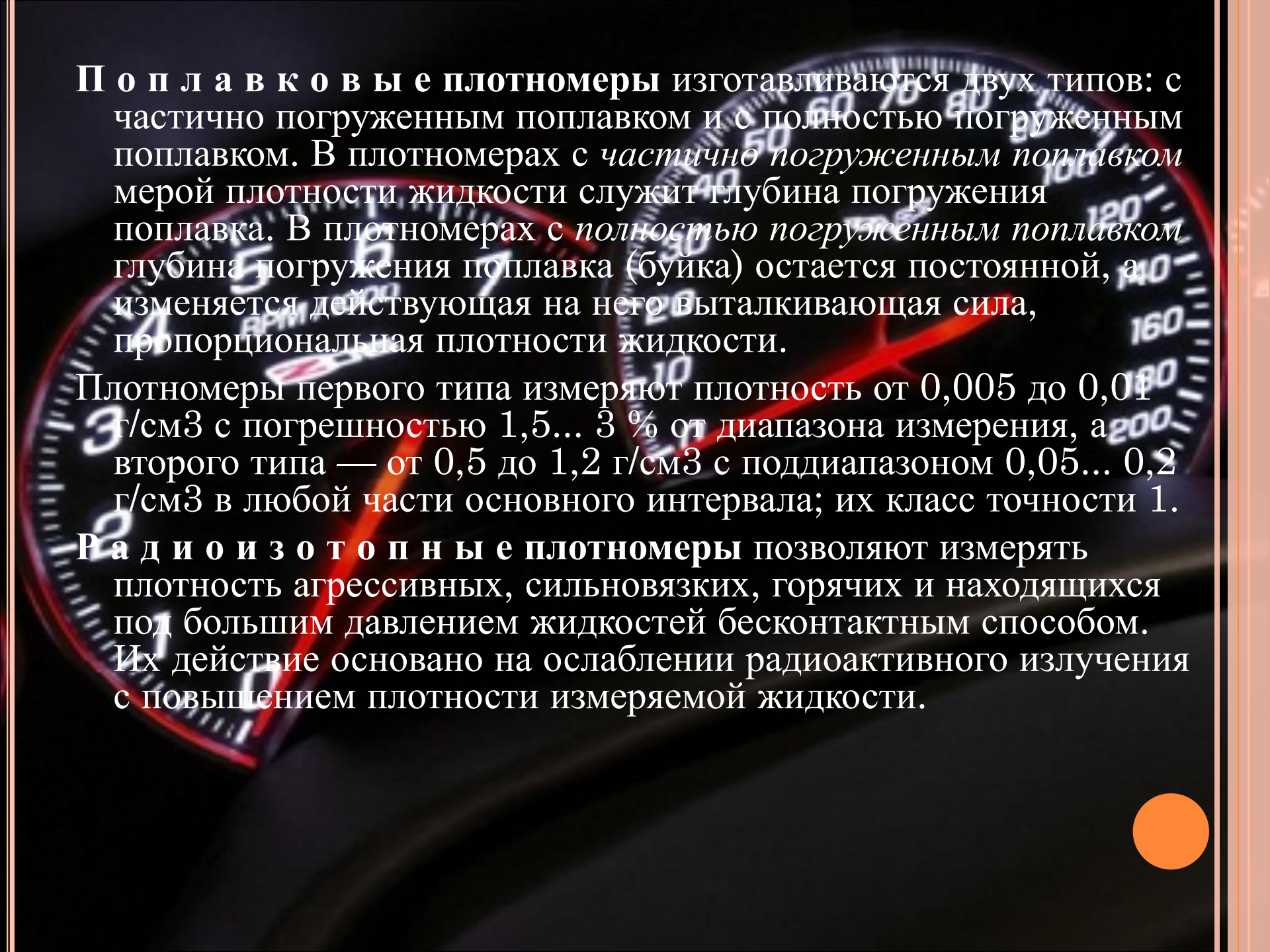
Средства измерения *плотности* называются *плотномерами* (денситометрами).

По принципу действия выделяют *весовые, поплавковые, гидроаэрастатические, вибрационные, акустические, радиоизотопные* и некоторые другие плотномеры.

Принцип действия **в е с о в ы х** плотномеров состоит в непрерывном

взвешивании постоянного объема анализируемого вещества в некоторой емкости или трубопроводе. Плотность определяется через удельный вес. Весовые плотномеры применяют обычно для измерения плотности суспензий, а также вязких и содержащих твердые включения жидкостей. Они позволяют измерять плотность в интервале $0,5...2,5$ г/см³ с выделением поддиапазона $0,05...0,3$ г/см³ в любой части основного интервала. Классы точности 1... 1,5.





Поплавковые плотномеры изготавливаются двух типов: с частично погруженным поплавком и с полностью погруженным поплавком. В плотномерах с *частично погруженным поплавком* мерой плотности жидкости служит глубина погружения поплавка. В плотномерах с *полностью погруженным поплавком* глубина погружения поплавка (буйка) остается постоянной, а изменяется действующая на него выталкивающая сила, пропорциональная плотности жидкости.

Плотномеры первого типа измеряют плотность от 0,005 до 0,01 г/см³ с погрешностью 1,5... 3 % от диапазона измерения, а второго типа — от 0,5 до 1,2 г/см³ с поддиапазоном 0,05... 0,2 г/см³ в любой части основного интервала; их класс точности 1.

Радиоизотопные плотномеры позволяют измерять плотность агрессивных, сильновязких, горячих и находящихся под большим давлением жидкостей бесконтактным способом. Их действие основано на ослаблении радиоактивного излучения с повышением плотности измеряемой жидкости.



Вибрационные плотномеры

Вибрационные плотномеры на сегодняшний день являются наиболее востребованными на объектах трубопроводного транспорта.

Принцип действия вибрационных плотномеров основан на зависимости частоты колебаний, сообщаемых камере с анализируемым веществом или телу, размещенному в нем, от плотности этого вещества. Камера с анализируемым веществом или телом, размещенное в нем, называется резонатором.

Конструктивно различают *проточные* и *погружные* вибрационные плотномеры. В первом случае анализируемое вещество протекает через внутреннюю полость резонатора, во втором — резонатор размещается в потоке анализируемого вещества. Проточные плотномеры являются более распространенными.

При измерении плотности в трубопроводе необходимо учитывать влияние давления и температуры потока. Для этого обычно используются два резонатора: измерительный и компенсирующий.

Вибрационные плотномеры позволяют измерять плотность в диапазоне от 750 до 930 кг/м³ с основной погрешностью не более 0,5 % в потоках с давлением до 6,4 МПа.



На рис.8.3, *a* показан датчик плотнора, представляющий собой корпус 1 из нержавеющей стали, внутри которого расположены два тонкостенных ферромагнитных цилиндра: измерительный 2 и компенсирующий 3. Через измерительный цилиндр протекает жидкость, плотность которой измеряется, а компенсирующий цилиндр заполнен образцовой жидкостью (керосином). Давление измеряемой среды передается в компенсирующий цилиндр 3 через сильфон 4, благодаря чему давление в цилиндрах 2 и 3 одинаково, и погрешность измерения плотности от разности давлений в цилиндрах практически отсутствует.

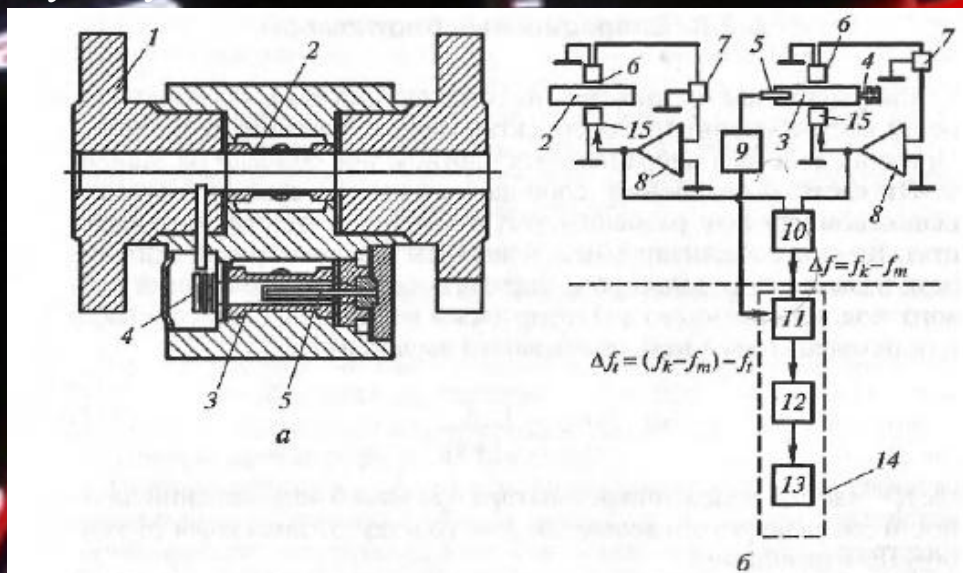


Рис. 8.3. Вибрационный плотномер:

a — датчик; *b* — функциональная схема; 1 — корпус датчика; 2 — измерительный ферромагнитный цилиндр; 3 — компенсирующий ферромагнитный цилиндр; 4 — сильфон; 5 — терморезистор; 6 — измерительная электромагнитная катушка; 7 — фазосдвигающее устройство; 8 — усилитель-ограничитель; 9 — усилитель постоянного тока; 10 — узел вычитания; 11 — устройство температурной компенсации; 12 — схема линеаризации; 13 — устройство индикации; 14 — блок обработки и индикации данных; 15 — возбуждающая электромагнитная катушка; f_m — частота колебаний измерительного цилиндра; f_k — частота колебаний компенсирующего цилиндра; Δf — разностная частота; Δf_t — разностная частота, скорректированная по температуре

Измерение вязкости. Общие сведения об измерении вязкости

Вязкость (внутреннее трение) — свойство текучих веществ (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Именно вязкость обуславливает гидравлическое сопротивление в трубопроводах.

Основной закон вязкого течения описывается формулой Ньютона:

$$F = \eta S \frac{dV}{dn} \quad (8.15)$$

где F — тангенциальная (касательная) сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости (газа) друг относительно друга;

S — площадь слоя, по которому происходит сдвиг;

dV/dn — градиент скорости V течения (быстроты изменения ее от слоя к слою) по нормали n .

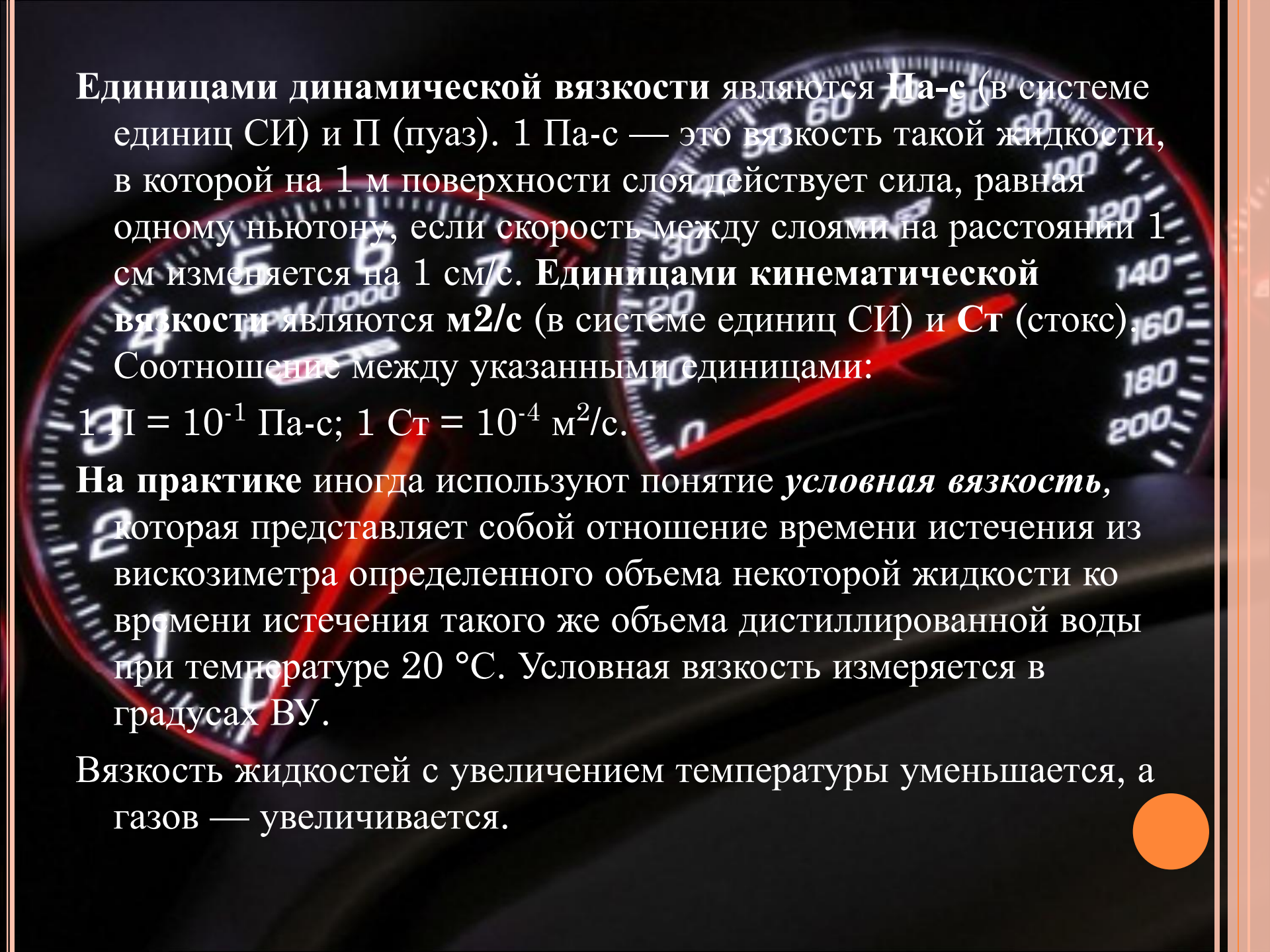
Коэффициент пропорциональности η называется *динамической*

вязкостью. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению ее слоев.

Величина, обратная динамической вязкости, называется *текучестью* $\varphi = 1/\eta$

Наряду с понятием динамической вязкости используется понятие *кинематическая вязкость* ν :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (8.16)$$



Единицами динамической вязкости являются **Па·с** (в системе единиц СИ) и **П** (пуаз). 1 Па·с — это вязкость такой жидкости, в которой на 1 м поверхности слоя действует сила, равная одному ньютону, если скорость между слоями на расстоянии 1 см изменяется на 1 см/с. **Единицами кинематической вязкости** являются **м²/с** (в системе единиц СИ) и **Ст** (стокс).
Соотношение между указанными единицами:

$$1 \text{ П} = 10^{-1} \text{ Па·с}; 1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

На практике иногда используют понятие *условная вязкость*, которая представляет собой отношение времени истечения из вискозиметра определенного объема некоторой жидкости ко времени истечения такого же объема дистиллированной воды при температуре 20 °С. Условная вязкость измеряется в градусах ВУ.

Вязкость жидкостей с увеличением температуры уменьшается, а газов — увеличивается.



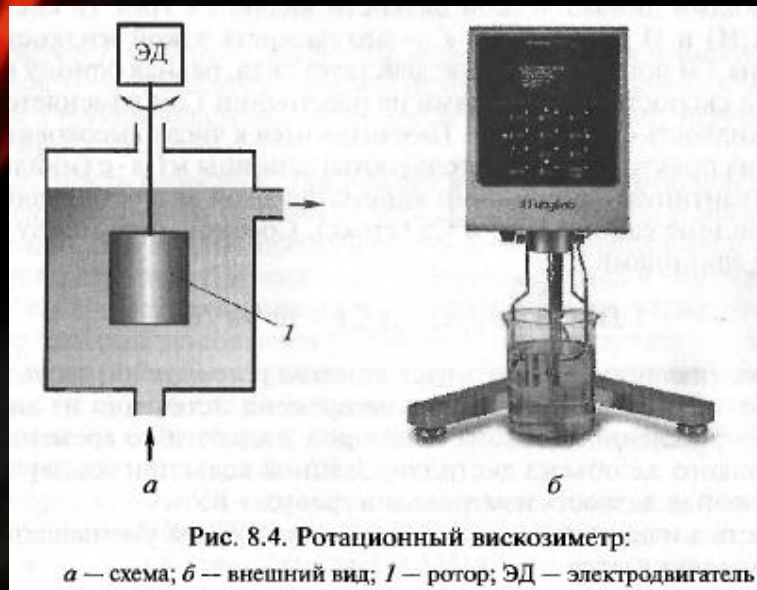
Средства измерения вязкости

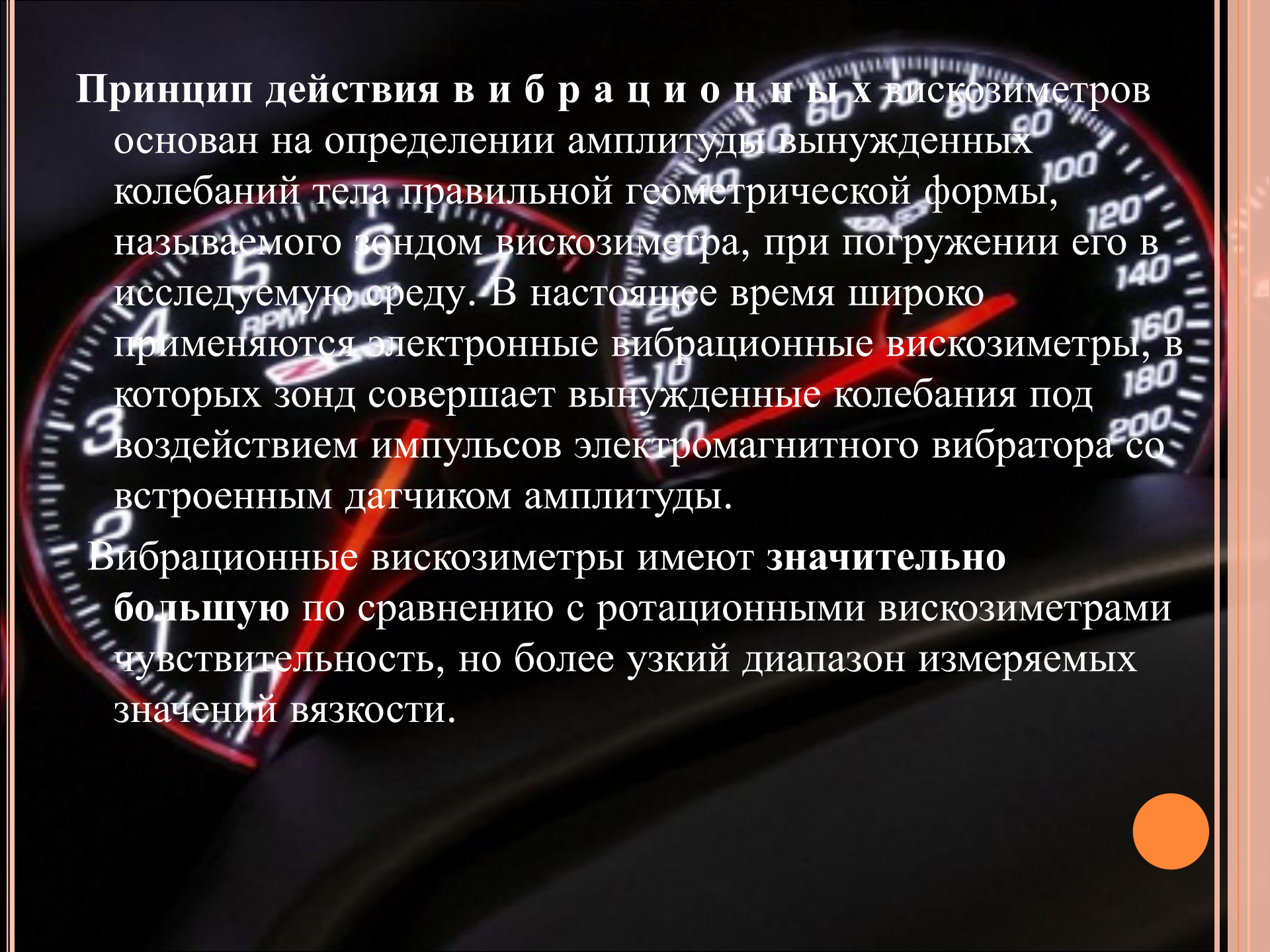
Средства измерения вязкости называют *вискозиметрами*.

В зависимости от назначения вискозиметры делятся на *промышленные* (технологического контроля) и *лабораторные* (стационарные и переносные). По режиму работы вискозиметры могут быть *непрерывного* и *циклического* действия.

По принципу действия вискозиметры делятся на пять групп: *ротационные*, *вибрационные*, *капиллярные*, *шариковые* и *условной вязкости* (типа воронки).


Принцип действия *р о т а ц и о н н ы х* вискозиметров (рис. 8.4) основан на измерении крутящего момента, возникающего на оси ротора 1, погруженного в измеряемую среду.





Принцип действия в и б р а ц и о н н ы х вискозиметров основан на определении амплитуды вынужденных колебаний тела правильной геометрической формы, называемого зондом вискозиметра, при погружении его в исследуемую среду. В настоящее время широко применяются электронные вибрационные вискозиметры, в которых зонд совершает вынужденные колебания под воздействием импульсов электромагнитного вибратора со встроенным датчиком амплитуды.

Вибрационные вискозиметры имеют **значительно большую** по сравнению с ротационными вискозиметрами чувствительность, но более узкий диапазон измеряемых значений вязкости.



Принцип действия капиллярных механических вискозиметров основан на закономерности истечения жидкости через капилляр.

Постоянный объемный расход анализируемой жидкости создается насосом Н (рис. 8.5, а).

Анализируемая жидкость поступает в змеевик 1, где нагревается до температуры, поддерживаемой в термостате 2, а затем — в капилляр 3, размеры которого выбираются в зависимости от диапазона измеряемых значений вязкости. Перепад давлений на капилляре, который пропорционален динамической вязкости анализируемой жидкости, измеряется дифманометром ДМ. Температура в термостате поддерживается

на уровне 50 или 100 °С. Диапазон измерений этих вискозиметров от 0... 2 до 0... 1 000 сП, класс точности 1,5... 2,5.

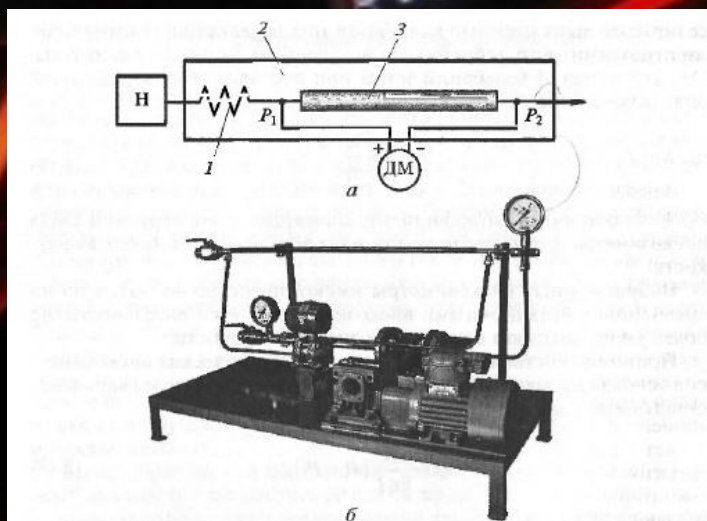


Рис. 8.5. Капиллярный вискозиметр:

а — схема; б — внешний вид; 1 — змеевик; 2 — термостат; 3 — капилляр; Н — насос; ДМ — дифманометр; P_1 , P_2 — давление до и после капилляра

$$V = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})gR^2}{9\eta}, \quad (8.21)$$

Принцип действия шариковых вискозиметров основан на измерении скорости (или времени) движения шарика под действием сил тяжести и трения в анализируемой жидкости.

В нерабочем состоянии шарик 2 (рис. 8.6, а) находится на нижней сетке 4. Анализируемая жидкость из трубопровода периодически прокачивается насосом Н по трубке 1 снизу вверх и при своем движении поднимает шарик 2 от нижней 4 до верхней 3 ограничительной сетки. В момент касания шарика с верхней сеткой насос автоматически отключается и шарик падает в неподвижной среде — анализируемой жидкости. С помощью устройств 5 и 6 формируются электрические импульсы. Промежутки времени между импульсами, измеряется блоком 7. Диаметр трубки, в которой проводят измерение вязкости, должен быть в 10 раз больше диаметра шарика.



Шариковые вискозиметры используются для измерения вязкости до 100 Па · с с погрешностью не выше $\pm 2\%$.

Измерение влажности. Общие сведения об измерении влажности

Влажность газов характеризуется абсолютной влажностью, относительной влажностью и температурой точки росы.

Абсолютная влажность газа равна массе водяного пара, содержащегося в единице объема парогазовой смеси, и равна плотности водяного пара.

Относительная влажность воздуха φ — это величина, характеризующая степень насыщения воздуха водяными парами.

Температура точки росы — это температура, до которой необходимо охладить влажный воздух, чтобы достичь насыщения водяного пара, сохраняя постоянным массовое содержание влаги в процессе охлаждения. Средства измерения влажности жидкостей и твердых тел называются *влажномерами*, а газов — *гигрометрами*.

В нефтегазовой промышленности наиболее распространенными влажмерами жидкостей являются *диэлькометрические (емкостные)* и *сверхвысокочастотные (СВЧ)* влажмеры, а для измерения влажности газов используются диэлькометрические, конденсационные гигрометры, психрометры и др.



Диэлькометрические влагомеры

Принцип действия диэлькометрических влагомеров основан на сильной зависимости диэлектрической проницаемости материалов от содержания в них влаги.

Во влагомерах, рассчитанных на небольшое влагосодержание (например, для товарной нефти), используют специальную дифференциальную схему, позволяющую исключить влияние сорта нефти на результат измерения (рис. 8.7). Влагомер содержит два цилиндрических конденсатора *1* и *9*. Конденсатор *1* установлен в трубопроводе *10*, по которому протекает анализируемая нефть, т. е. его емкость зависит от ее диэлектрической проницаемости, которая определяется как содержанием воды в нефти, так и ее сортом. Конденсатор *9* установлен в емкости *8*, которая периодически заполняется нефтью, очищенной в блоке осушки *7* от воды и механических примесей. Его емкость будет определяться диэлектрической проницаемостью обезвоженной нефти, т. е. это значение зависит только от сорта нефти. Конденсаторы *1* и *9* включены в колебательные контуры генераторов *2* и *6*,



Рис. 8.7. Диэлькометрический поточный влагомер нефти:

1, 9 — цилиндрические конденсаторы; *2, 6* — генераторы; *3* — смеситель; *4* — преобразователь в унифицированный ток; *5* — вторичный прибор; *7* — блок осушки; *8* — емкость; *10* — трубопровод

Сверхвысокочастотные влагомеры

Принцип действия сверхвысокочастотных (СВЧ) влагомеров основан на оценке степени взаимодействия исследуемого материала с СВЧ- радиоволнами. При прохождении СВЧ- радиоволн через влажный материал происходит поглощение и рассеяние энергии электромагнитных волн частицами вещества. Для получения информации о свойствах вещества можно использовать параметры прошедшего или отраженного излучения. При этом конструкция и схема измерительного устройства определяются способом локализации СВЧ- радиоволн.

Наиболее распространенными являются метод с использованием проходящей волны и метод с использованием отраженной волны.

Основное преимущество СВЧ-влагомеров заключается в том, что они бесконтактны и позволяют измерять влажность в широком диапазоне (0... 100 %) с высокой точностью. Выпускаемые отечественными и зарубежными фирмами СВЧ-влагомеры часто называются также микроволновыми.



Кулонометрические гигрометры

В кулонометрических гигрометрах в зависимости от количества влаги в газе изменяется ток электролиза. В канале цилиндрического стеклянного корпуса 1 кулонометрического чувствительного элемента размещены родиевые электроды 2, 3 и 4, выполненные в виде геликоидальных несоприкасающихся спиралей (рис. 8.8). Электроды 3 и 4 расположены последовательно друг за другом по ходу газового тракта. На стенки канала и электрода нанесена пленка частично гидратированной пятиокиси фосфора P_2O_5 , обладающей высокой влагосорбирующей способностью. Через чувствительный элемент в направлении, указанном стрелкой, непрерывно проходит анализируемый газ, расход которого поддерживается постоянным. Значение расхода выбирается таким образом, чтобы из потока анализируемого газа извлекалась практически вся влага. К электродам приложено напряжение от источника постоянного тока 5, причем значение этого напряжения превышает потенциал разложения воды. Таким образом, в гигрометре одновременно происходят два процесса: непрерывное извлечение пленкой сорбирующего вещества влаги из точно дозируемого потока анализируемого газа и электролитическое разложение поглощенной влаги. В установившемся режиме ток электролиза, контролируемый гигрометром, является мерой абсолютного содержания влаги в газе.



Рис. 8.8. Кулонометрический гигрометр:

1 — корпус; 2 — электрод родиевый общий; 3 — электрод родиевый рабочей части чувствительного элемента; 4 — электрод родиевый контрольной части чувствительного элемента; 5 — источник питания; 6 — отсчетное устройство; 7 — кнопка контроля чувствительного элемента

Диапазон измерений кулонометрических гигрометров ограничен невозможностью измерений

ток этих приборов —



Принцип их действия в целом аналогичен диэлькометрическим влагомерам, но при этом достаточно часто в этих гигрометрах используется комбинация диэлькометрического и электросорбционного (измерение электрической проводимости вещества, поглощающего влагу) методов. В *диэлькометрическом* гигрометре (рис. 8.9) изменение диэлектрической проницаемости происходит вследствие сорбции паров воды из анализируемого газа. Этот газ прокачивается с постоянным объемным расходом через камеру 1, в которой размещен алюминиевый стержень 2, по поверхности которого сделана нарезка и нанесен оксид алюминия Al_2O_3 . В нарезку уложена никелевая проволока 3. Стержень 2 и проволока 3 образуют конденсатор, включенный в неравновесный электрический мост переменного тока. Емкость этого конденсатора увеличивается при сорбции паров воды оксидом алюминия и возрастании вследствие этого его диэлектрической проницаемости. Увеличение емкости измеряется вторичным прибором (вольтметром) 4. Гигрометры такого типа обеспечивают измерение относительной влажности в диапазоне 20... 100%. При использовании некоторых других сорбентов нижний предел измерения может начинаться с 10^{-4} % об.

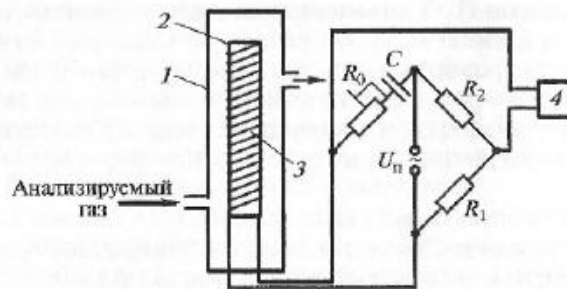


Рис. 8.9. Диэлькометрический гигрометр:

1 — камера; 2 — алюминиевый стержень; 3 — никелевая проволока; 4 — вольтметр; R_1, R_2, C — элементы неравновесного моста; U_n — напряжение питания