

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ЭЛЕКТРОННЫЕ ИНДИКАТОРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН****Л. А. Гончарский**

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы экспериментальная техника исследования механических процессов обогатилась новым классом высокочувствительных датчиков — электронных воспринимателей механических величин. Эти устройства представляют собой электровакуумные приборы с подвижными электродами, перемещающимися под действием контролируемых механических процессов. Электронные датчики зарекомендовали себя высокой чувствительностью, резко выделяясь ею среди стабильно работающих на постоянном токе параметрических датчиков. Эта особенность относительно сложных по своей конструкции воспринимателей, являющихся механически управляемыми электронными лампами, делает целесообразной замену ими других систем датчиков механических величин в ряде лабораторных приборов и прикладных измерительных устройств, в числе которых можно упомянуть, например, микрометры, дилатометры, динамометры, тензометры, акселерометры и др.

Характерной особенностью электронных индикаторов является многочисленность принципов их осуществления, позволяющая строить разнообразные датчики механических величин, приспособленные для решения разнохарактерных задач экспериментальной техники.

Темой нашей статьи является описание некоторых способов наиболее эффективного механического управления электронными и ионными токами электровакуумных приборов, используемых в качестве индикаторов механических величин, а также изложение некоторых способов применения их для измерения и регистрации ряда механических величин, характеризующих исследуемые процессы.

Действие электронных индикаторов механических величин основано, как это было уже упомянуто выше, на использовании

непосредственного механического управления электронными и ионными токами, проходящими внутри вакуумного прибора. Сущность этого способа управления электровакуумными приборами сводится в основном к изменению геометрии электрического поля между электродами прибора в результате относительного перемещения его подвижной детали. В настоящее время наиболее известны следующие способы эффективного механического управления электронными и ионными токами вакуумных приборов, применяемых в качестве датчиков механических величин: продольный, поперечный, зондовый и дифференциальный.

Продольный способ основан на перемещении подвижного электрода в направлении электрического поля. Сближение электродов сопровождается возрастанием напряженности электрического поля, приводящим (в электронных приборах) к соответствующему увеличению анодного тока. В газоразрядных приборах перемещение электрода вдоль электрического поля приводит к изменению условий ионизации газа, определяющих условия газового разряда внутри датчика.

При поперечном способе управления подвижный электрод перемещается в направлении, перпендикулярном к электрическому полю индикатора.

Зондовый способ управления основан на использовании тонкого электрода, перемещающегося относительно электрического поля.

Наконец, дифференциальный способ управления сводится к использованию электрода, выдвигающегося через щели второго электрода, имеющего существенно отличный потенциал. Глубина проникновения подвижного электрода в щели неподвижного определяет анодный ток индикатора.

Переходя к характеристике основных способов механического управления токами электронных индикаторов, остановимся в первую очередь на индикаторах продольного управления.

ПРОДОЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Простейшей системой электронного индикатора продольного управления является диодная¹, предложенная автором в 1935 г

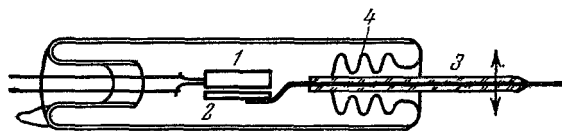


Рис. 1.

Ее принципиальная схема показана на рис. 1. Внутри резервуара прибора находятся два плоских параллельных электрода: непод-

вижный подогревный катод 1 и подвижный анод 2. Последний укреплен на рычаге 3, проходящем сквозь эластичную (сильфон) стенку 4 резервуара, позволяющую наклонять рычаг на небольшие углы в результате внешних механических воздействий. При отклонениях рычага 3 в направлении, показанном стрелкой, меняется расстояние между электродами лампы, а с ним и напряженность электрического поля между ее электродами. Анодный ток I_a диода зависит от U_a — анодного напряжения и a — расстояния между электродами и выражается соотношением

$$I_a = \frac{A \cdot S \cdot U_a^{3/2}}{a^3} \text{ ампер,} \quad (1)$$

где $A = 2,34 \cdot 10^{-6}$, а S — активная поверхность плоского катода в см^2 .

Из соотношения (1) следует, что перемещение анода на Δa приводит к изменению анодного тока описываемого диода на

$$\Delta I_a = \frac{2A \cdot S \cdot U_a^{3/2}}{a^3} \Delta a. \quad (2)$$

Определим следующим образом статическую дифференциальную чувствительность индикатора по току

$$\psi_d = \left(\frac{\partial I_a}{\partial a} \right)_{dU_a=0}, \quad (3)$$

по напряжению

$$\varphi_d = \left(\frac{\partial U_a}{\partial a} \right)_{dI_a=0}, \quad (4)$$

а также дифференциальное внутреннее сопротивление

$$R_d = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{da=0}. \quad (5)$$

Пользуясь соотношениями (1), (3), (4) и (5), можно получить после преобразований¹ соответственно выражения, характеризующие основные параметры индикатора

$$\psi_d = - \frac{2A \cdot S \cdot U_a^{3/2}}{a^3}, \quad (6)$$

$$\varphi_d = \frac{4U_a}{3a}, \quad (7)$$

$$R_d = \frac{2a^2}{3A \cdot S \cdot U_a^{1/2}}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены характеристики зависимости токовой чувствительности индикатора от смещения для нескольких анодных напряжений (при $S = 0,1 \text{ см}^2$).

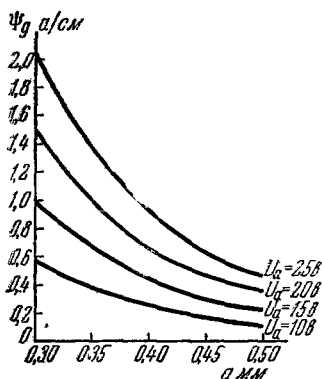


Рис. 2.

На рис. 3 показаны характеристики зависимости вольтовой чувствительности того же индикатора к смещению.

Резко выраженная нелинейность основных характеристик диодной системы побуждает строить вдвоенные диодные индикаторы, предназначенные для работы в мостовых схемах, позволяющих получать достаточно линейные характеристики измерительных устройств. Принципиальная схема вдвоенного диодного индикатора показана на рис. 4. Действие его сводится к следующему. При

смещении анодов 2 и 3 относительно накаливаемого катода 1 в направлении, показанном стрелкой, расстояние между катодом 1 и одним из анодов увеличивается, расстояние же между катодом

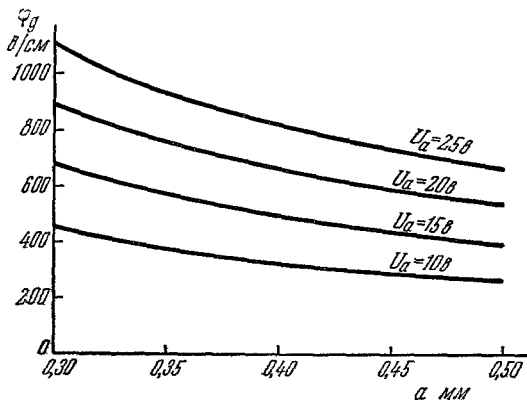


Рис. 3.

и вторым анодом уменьшается. В результате этого меняется соотношение электронных токов на аноды, сопровождающееся в свою очередь соответствующим изменением тока в диагонали мостовой схемы, показанной на том же рисунке. С конструктивной точки зрения целесообразнее делать подвижными аноды, а не катод.

Именно так и делаются современные механически управляемые диоды продольного управления.

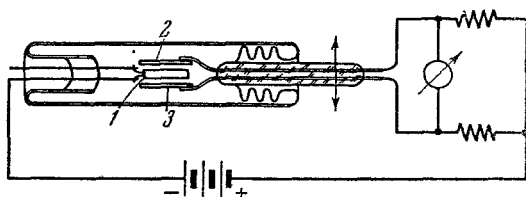


Рис. 4.

Механически управляемые диоды продольного управления обладают высокой чувствительностью по току при относительно невысокой чувствительности по напряжению.

УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Опишем два известных^{2,6} способа повышения чувствительности по напряжению электронных индикаторов продольного управления.

Один из них основан на повышении внутреннего сопротивления лампы в результате размещения между неподвижным накалённым катодом 1 и подвижным анодом 2 неподвижной сетки 3, как это показано на рис. 5, а. Размещение неподвижной сетки между катодом и анодом позволяет увеличить напряжённость электрического поля у поверхности последнего при одновременном снижении напряжённости электрического поля у поверхности накалённого катода². Так как чувствительность электронного индикатора продольного управления по напряжению оказывается численно равной напряжённости электрического поля у поверхности плоского подвижного анода

$$\varphi_d \cong E_a, \quad (9)$$

то частичное экранирование катода неподвижной сеткой, дающее возможность увеличить напряжённость электрического поля за счёт повышения анодного напряжения, позволяет значительно увеличить чувствительность индикатора по напряжению при резком снижении анодного тока. Последнее в свою очередь позволяет увеличить чувствительность индикатора по напряжению при снижении рассеиваемой в нём мощности, а следовательно, при большей стабильности его работы.

На рис. 5, б показана фотография, а на рис. 5, в — разрез вибротрона, представляющего собой триод продольного управления с подвижным анодом.

Второй способ получения электронного индикатора продольного управления с высокой чувствительностью по напряжению основан на использовании зависимости падения напряжения между электро-

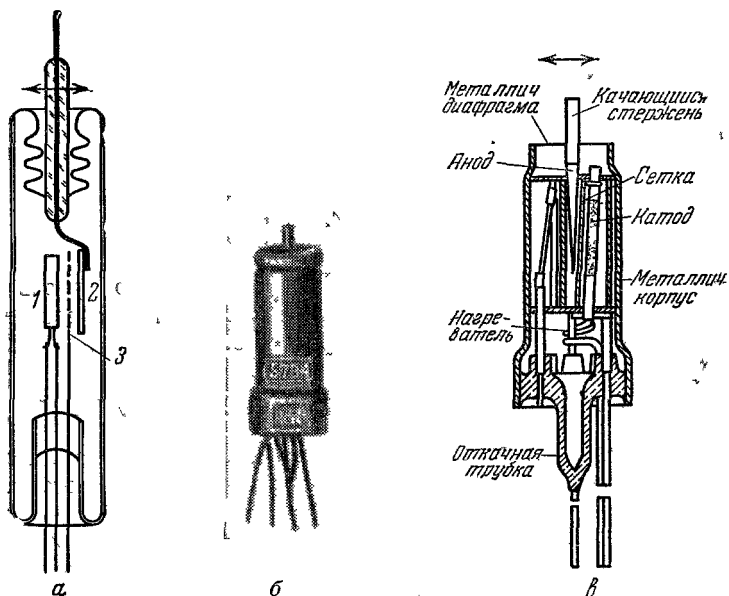


Рис. 5.

дами при затруднённом тлеющем разряде от расстояния между ними.

Схема индикатора этого типа показана на рис. 6. Он представляет собой газоразрядный диод, давление в котором подобрано таким, чтобы между неподвижным анодом 1 (окружённым стеклом

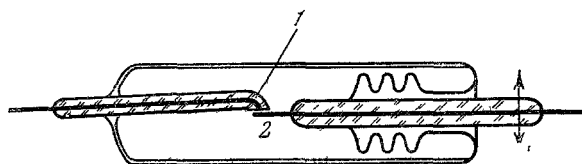


Рис. 6.

со всех сторон, кроме разрядного промежутка между электродами) и подвижным катодом 2 получался затруднённый тлеющий разряд. В этом случае зависимость падения напряжения на индикаторе от расстояния между электродами имеет форму, позволяющую получать высокую чувствительность по напряжению.

ПОПЕРЕЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Поперечное управление электронными индикаторами сводится, как это было уже упомянуто выше, к перемещениям подвижного электрода в направлении, перпендикулярном к вектору электрического поля. На рис. 7, *а* показана схема электронного индикатора поперечного управления, в котором перемещение тонкого накалённого катода 1 в направлении, показанном стрелкой, сопровождается изменением распределения электронных токов между анодами 2 и 3. На схеме показан также холодный катод 4, способствующий формированию и концентрации потока электронов,

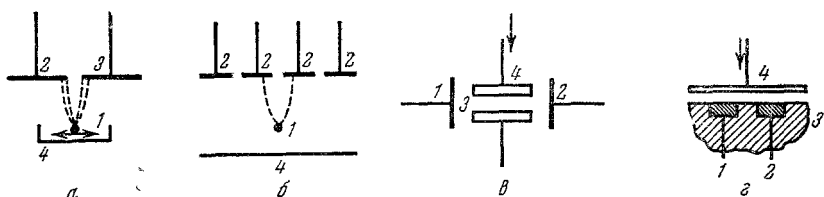


Рис. 7.

показанного пунктиром. На рис. 7, *б* показан вариант с несколькими электродами. На рис. 7, *в* приведена схема поперечного управления газовым разрядом (происходящим между холодным или накалённым катодом 1 и анодом 2 сквозь щель 3), осуществляемого путём изменения ширины щели 3 при перемещении одной из её стенок 4 в направлении, показанном стрелкой. На рис. 7, *г* показана схема поперечного управления за счёт перемещения (в направлении, показанном стрелкой) подвижной стенки 4 относительно двух электродов 1, 2, утопленных в неподвижной стенке 3.

ЗОНДОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Зондовое управление² основано на перемещении тонкого катода непосредственного накала, ориентированного перпендикулярно к электрическому полю, в направлении последнего. Этот способ управления назван зондовым, так как очень тонкий накалённый катод ведёт себя подобно зонду, определяющему по силе анодного тока потенциал зоны поля, в которой находится накалённый катод, относительно потенциала последнего. Механизм зондового управления поясняется принципиальной схемой индикатора, показанной на рис. 8, *а*. Электрическое поле, в котором перемещается тонкий накалённый катод 1, создаётся электродами 2 и 3, соединёнными с полюсами анодной батареи. Зонд 1 присоединён к отрицательному полюсу анодной батареи, как это показано на том же рисунке.

Во время работы индикатора накали́нный катод *1* перемещается в направлении, показанном стрелкой, оставаясь параллельным эквипотенциальным поверхностям электрического поля, созданного электродами *2* и *3*. Напряжённость электрического поля около накали́нного катода, определяющая анодный ток лампы, зависит от разности между потенциалом зоны электрического поля, в которой

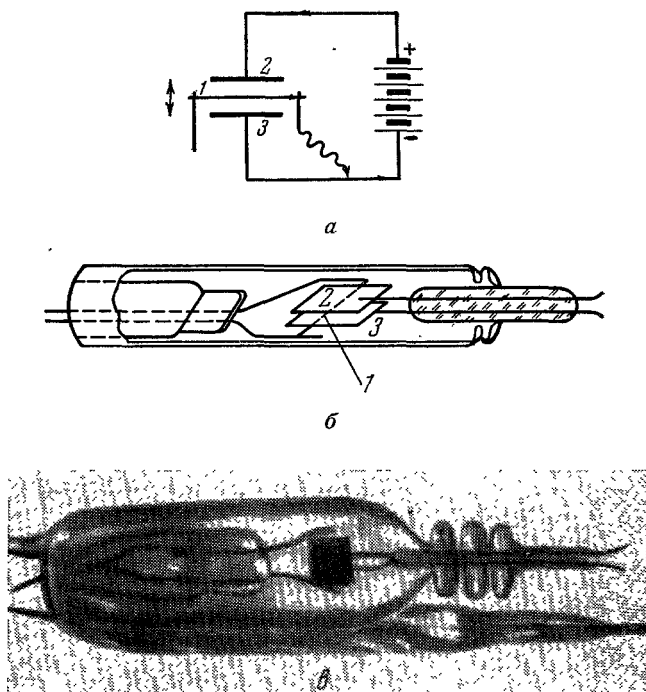


Рис. 8.

лежит зонд, и потенциалом самого зонда. Чем больше эта разность потенциалов, тем бóльшим оказывается анодный ток. Быстрое нарастание анодного тока лампы в результате движения тонкого накали́нного катода в направлении анода позволяет использовать зондовое управление для осуществления высокочувствительных индикаторов механических величин.

Чувствительность зондового индикатора по току в функции анодного тока I_a и расстояния b между накали́нным катодом *1* и холодным катодом *3* выражается соотношением ²

$$\Psi_d = \frac{3I_a}{2b} a / \text{см}. \quad (10)$$

Его дифференциальное внутреннее сопротивление равно

$$R_d = \frac{2U_a}{3I_a} \text{ ом} \quad (11)$$

и чувствительность по напряжению

$$\varphi_d = \frac{U_a}{b} \text{ в/см.} \quad (12)$$

На рис. 9 приведена типичная характеристика зависимости анодного тока индикатора от смещения накалённого катода I при постоянном напряжении, а на рис. 10 приведена типичная характеристика зависимости анодного напряжения от смещения накалённого катода I при постоянном анодном токе.

В зондовых механически управляемых электронных лампах применяется экономичный оксидный катод непосредственного накала. Благодаря этому зондовые индикаторы выделяются среди других систем механически управляемых электронных ламп не только высокой чувствительностью по напряжению, но и малой

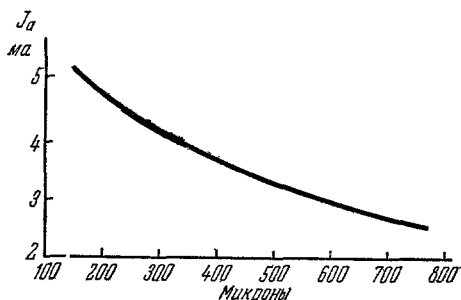


Рис. 9.

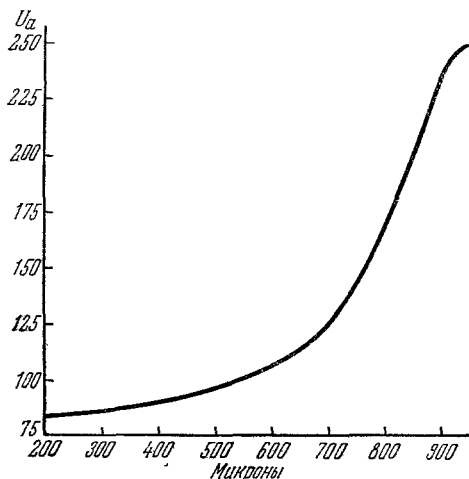


Рис. 10.

мощностью, рассеиваемой в цепи катода. Показанная на рис. 8, а принципиальная схема зондового индикатора, в которой подвижным

электродом является зонд, не всегда оказывается удобной, так как тонкую растянутую нить, находящуюся при высокой температуре, зачастую нецелесообразно подвергать быстрым динамическим нагрузкам. На рис. 8, б изображено устройство зондового индикатора, у которого подвижной системой являются холодные электроды 2 и 3, создающие электрическое поле, в котором находится зонд 1, а на рис. 8, в приведена его фотография.

Представляется целесообразным применение зондовых газоразрядных индикаторов с холодным или накалившимся зондом, действие которых основано на перемещении тонкого электрода относительно стенки или другого электрода.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Дифференциальное механическое управление электронным током³ осуществляется путем проникновения пластин анода сквозь

щели отрицательно заряженного экрана, оказывающего запирающее действие. Принципиальная схема индикатора дифференциального управления показана на рис. 11. Система электродов прибора состоит из накаливаемого катода 1 и сквозных электродов 2 и 3. В одном из последних, являющемся холодным катодом 3, имеется щелевидное отверстие, вдоль которого может свободно (не касаясь краев щели) перемещаться по направлению, показанному стрелкой, второй электрод 2, являющийся анодом.

Схема включения электродов этого прибора показана там же. Сущность дифференциального управления в основном сводится к следующему: пока анод 2 утоплен в щели холодного катода 3, экранирующего от него накаливаемый катод, на электроны, эмиттированные последним, действует тормозящее электрическое поле, возвращающее их обратно. Перемещая анод 2 в направлении накаленного катода 1, мы обнаружим вскоре появление анодного тока, быстро нарастающего по мере дальнейшего продвижения анода в том же направлении. Дифференциальное механическое управление электронными токами оказывается очень эффективным, позволяя строить электронные индикаторы механических величин, обладающие высокой чувствительностью как по напряжению, так и по току.

ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОМЕТРЫ

Электронные индикаторы линейных размеров имеют широкое поле применения для измерения малых перемещений и деформаций, контроля линейных размеров готовых изделий, геометрии их поверхности, активного контроля линейных размеров изделий

в процессе их изготовления (т. е. регулирования рабочего хода обрабатывающего механизма), контроля хода инструмента в процессе обработки изделия, измерения перемещения деталей станков при производственных процессах, автоматической сортировки изделий по их линейным размерам и исследования ряда механических процессов, наблюдающихся при изучении многих физических явлений 1, 3, 5, 7.

Из упомянутых применений электронных индикаторов наиболее известными являются электронные микрометры, в которых обычно применяются двойные диодные индикаторы, работающие в симметричной мостовой схеме^{2, 3}. При включении в диагональ

моста стрелочного гальванометра получают достаточно чувствительные приборы, обеспечивающие точность отсчета до 0,1 м и более, пригодные для работы в лабораторных и производственных условиях.

Электронный микрометр с визуальным отсчетом (схема которого

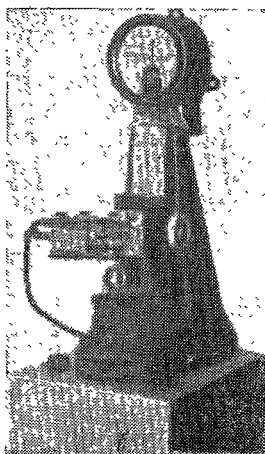
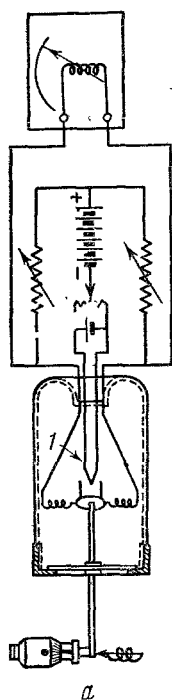


Рис. 12.

приведена на рис. 12, а, а фотография — на рис. 12, б) является удобным дистанционным измерительным прибором, в котором в качестве отсчетного устройства служит обычно стрелочный микроамперметр. Чувствительность электронного микрометра (цена его деления) может быть выражена

$$\gamma = \frac{\sigma}{\psi_*}, \quad (13)$$

где σ — чувствительность гальванометра (цена деления микроамперметра) и ψ_* — динамическая чувствительность датчика по току, равная в случае моста, сопротивления всех плеч которого одинаковы,

$$\psi_* = \frac{\varphi_d}{R_d + R_r} = \frac{\varphi_d}{1 + \frac{R_r}{R_d}}, \quad (14)$$

где R_r — сопротивление гальванометра.

Подставляя (14) в (13), получаем:

$$\nu = \frac{\sigma \left(1 + \frac{R_r}{R_d}\right)}{\psi_d}. \quad (15)$$

Подсчитаем, для примера, по формуле (15) чувствительность электронного микрометра, собранного по мостовой схеме, при условии, что датчиком является двусторонний диодный термоэлектронный индикатор с чувствительностью $\psi_d = 1 \text{ а/см}$, а для отсчёта применяется стрелочный микроамперметр с ценой деления $\sigma = 0,2 \text{ мка}$ и $R_r = 4R_d$. При этих параметрах цена деления электронного микрометра оказывается равной

$$\nu = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 5}{1} = 10^{-6} \text{ см.}$$

Применяя в электронном микрометре зондовый индикатор малых перемещений с чувствительностью по напряжению $\varphi_d = 10^4 \text{ в/см}$ и внутренним сопротивлением порядка 10^5 ом и пользуясь гальванометром с теневой стрелкой, обладающим чувствительностью по току $\sigma = 10^{-8} \text{ а}$, получаем цену деления

$$\nu = \frac{10^{-8} \cdot 10^5}{10^4} = 10^{-7} \text{ см.}$$

Высокая чувствительность электронных микрометров способствует возрастанию интереса к применению их для контроля и регистрации изменений линейных размеров контролируемых тел в различных измерительных устройствах.

ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОМЕТРОВ

Приведённые выше значения чувствительности электронных микрометров не являются ещё предельными. Применение более чувствительных гальванометров, с одной стороны, и подбор оптимальных параметров датчиков и измерительной схемы, с другой стороны, позволяют строить при помощи сравнительно простых средств^{5,7} устройства для измерения чрезвычайно малых перемещений, измерявшихся ранее при помощи сложных установок^{4,17}.

Это обстоятельство делает небезинтересным вопрос о пороге чувствительности электронных микрометров, ограничиваемой флук-

туациями анодного тока индикаторов, т. е. в первую очередь флуктуациями эмиссии накаливаемого катода, частично подавляемыми объёмным зарядом.

Полагая, что минимальные фиксируемые смещения dl_0 должны давать токи dI_0 , на порядок превышающие среднее квадратичное значение случайных колебаний электронного тока $\sqrt{dI_*^2}$ датчика, мы получаем критерий для определения минимальной интенсивности сигнала, соответствующей одному делению шкалы измерительного прибора, обеспечивающей устойчивую работу прибора:

$$dI_0 \geq 10 \sqrt{dI_*^2}. \quad (16)$$

Следовательно, минимальные смещения, надёжно фиксируемые электронным микрометром, определяются в соответствии с (16) и (3) соотношением

$$dl_0 \geq \frac{10 \sqrt{dI_*^2}}{\psi_d}. \quad (17)$$

А так как ^{1, 2}

$$\psi_d = \frac{\varphi_d}{R_d}, \quad (18)$$

то

$$dl_0 \geq \frac{10 R_d \sqrt{dI_*^2}}{\varphi_d}, \quad (19)$$

где dI_*^2 для тока насыщения ¹³ определяется из соотношения

$$dI_*^2 = 2e I_a \Delta f, \quad (20)$$

в котором e — заряд электрона, I_a — анодный ток датчика, Δf — полоса частот, на которую рассчитано устройство.

Подставляя (20) в (19), получаем:

$$dl_0 \geq \frac{14,1 \cdot R_d}{\varphi_d} \sqrt{e \cdot I_a \cdot \Delta f}. \quad (21)$$

Полагая параметры индикатора имеющими следующие значения: $\varphi_d = 10^4$ в/см, $R_d = 3,10^4$ ом, $I_a = 3$ ма (при $\Delta f = 1$ гц), получаем порог чувствительности электронного микрометра, определяемый флуктуациями электронной эмиссии, порядка

$$dl_0 = 3,10^{-10} \text{ см.}$$

В нашем случае анодный ток ограничивается объёмным зарядом, подавляющим флуктуации, поэтому порог чувствительности, вычисленный нами на основании (21), оказывается взятым с большим запасом. Следовательно, порог чувствительности электронных микрометров определяется не электронными процессами внутри индикатора, а тепловыми смещениями механических элементов измерительной установки.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВИБРОМЕТРЫ

Электронные виброметры^{8,12} применяются как для наблюдения и регистрации вибраций, сотрясений, толчков и ускорений в изучаемых объектах, так и для исследования механических волновых процессов в различных средах. Электронный виброметр состоит из эластично подвешенной инертной массы и электронного индикатора ее перемещений.

В тех случаях, когда описываемое устройство используется для исследования смещений контролируемого объекта, собственная частота колеблющейся системы электронного индикатора выбирается значительно ниже частоты исследуемых процессов. В этом режиме работы эластично подвешенная инертная масса, соединенная с подвижным электродом индикатора, остается неподвижной, а сам индикатор колеблется вместе с исследуемым телом.

В тех случаях, когда описываемое устройство используется для изучения ускорений, его собственная частота выбирается значительно выше наиболее высокой частоты диапазона частот исследуемого процесса. Работа электронного акселерометра сводится в основном к следующему: под действием ускорения инертная масса смещается, деформируя эластичный подвес, на котором она укреплена. Смещение инертной массы, прямо пропорциональное

величине измеряемого ускорения, измеряется электронным индикатором малых перемещений, кинематически сочлененным с инертной массой.

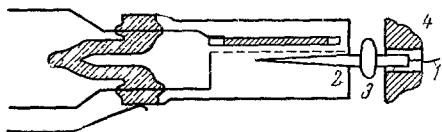


Рис 13

Электронные акселерометры делаются с внешней и с внутренней инертной

массой. Схема акселерометра первого типа с вибротроном^{8,14} в качестве индикатора показана на рис. 13. Инертная масса прибора укреплена непосредственно на качающемся стержне 1 вибротрона. Упругая мембрана 2 индикатора играет роль эластичного подвеса для инертной массы 3. Ограничителем перемещений стержня 1 является жестко укрепленная капиллярная трубка 4, внутренний диаметр которой немного превышает диаметр стержня 1. В зазоре между внутренней поверхностью капилляра и стержнем находится масло, удерживаемое капиллярными силами. Масло демпфирует колебания стержня 1. Чувствительность и собственная частота акселерометра (при стабильных параметрах вибротрона) зависят от величины инертной массы и жесткости ее эластичного подвеса. На рис. 14 показана зависимость чувствительности акселерометра с вибротроном⁸ от частоты. Как видно из этой характеристики, чувствительность акселерометра быстро падает с по-

вышением частоты. На том же рисунке пунктиром показана зависимость диапазона измеряемых ускорений от частоты.

В электронных акселерометрах с внутренней инертной массой⁹⁻¹² подвижный электрод электронного индикатора используется в качестве инертной массы прибора. Из приборов этого

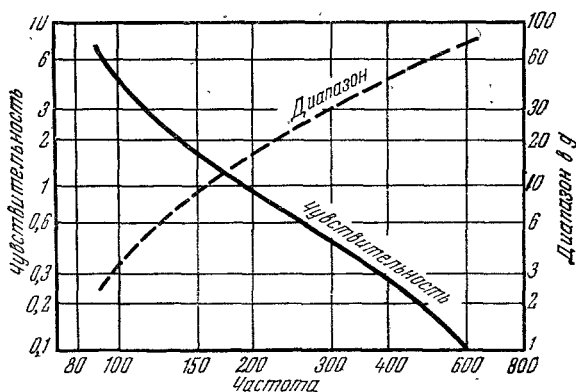


Рис. 14.

типа наиболее известен диодный акселерометр с подвижными анодами. В нём по обе стороны плоского подогревного катода на упругих стойках укреплены плоские аноды. Под действием составляющей ускорения, нормальной к плоскости анодов, последние изменяют своё расстояние от катода, меняя тем самым соотношение токов на аноды. Диодные акселерометры благодаря высокой чувствительности по току работают непосредственно на магнитоэлектрический осциллограф, без предварительного усиления создаваемых ими сигналов¹²⁻¹⁶. Диодные акселерометры, производимые в настоящее время электровакуумной промышленностью^{12, 16} для технических применений, делаются на несколько диапазонов ускорений, среди которых наиболее часто встречаются диапазоны 10 g и 100 g. На рис. 15 показаны фотографии двух акселерометров этого типа.

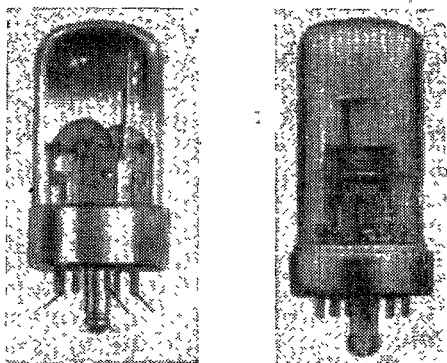


Рис. 15.

Хорошие результаты были получены при применении электронных акселерометров для полуавтоматического и автоматического контроля дисбаланса изделий в производственных условиях¹⁴. В частности, использование электронных акселерометров облегчило осуществление станков автоматической балансировки вращающихся деталей для автоматических линий¹⁴. На рис. 16 показана одна из электронных схем балансировочной машины с электронным индикатором ускорений. Подшипники 1 и 2, в которых вращается контролируемая деталь, укреплены на эластичных опорах 3 и 4. Поэтому вращение детали сопровождается колебаниями подшипников и прикрепленных к ним акселерометров 5 и 6. Фаза пере-

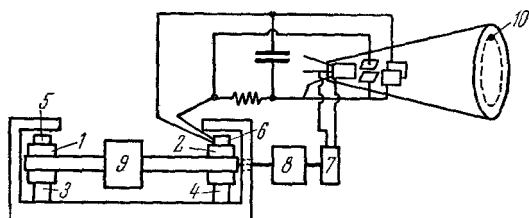


Рис. 16.

менного тока, модулирующего анодный ток акселерометра, определяется положением дисбаланса, а амплитуда переменного тока — величиной дисбаланса. Переменный ток отделяется от постоянной составляющей, фильтруется от помех, созданных шумами станка, и направляется в измерительное устройство одновременно с короткими импульсами, создаваемыми коммутатором 7, соединенным с мотором 8, вращающим испытываемую деталь 9. Положение и величину дисбаланса удобно отсчитывать по экрану электронного осциллографа, включенного в схему фазоимпульсного индикатора. Переменный ток акселерометра поступает на фазовращатель, с которого снимается двухфазное переменное напряжение на отклоняющие пластины электронного напряжения, заставляющее пучок электронов вращаться на окружности. Короткие импульсы напряжения, даваемые коммутатором 7, используются для отпирания запертого пучка электронов осциллографа, дающего на экране светлое пятнышко 10 в моменты замыкания контакта коммутатора. Расстояние пятнышка от центра шкалы определяет величину дисбаланса, а азимут отклонения — положение дисбаланса.

Электронные акселерометры применяются также для непосредственного контроля и регистрации вибраций испытываемых изделий и машин в производственных условиях. Отсутствие необходимости усиления сигналов, даваемых электронными акселерометрами, позволяет непосредственно включать большое количество одновременно работающих электронных датчиков на многотрассный осциллограф.

Так, например, использование электронных датчиков позволило легко использовать 24-шлейфовый осциллограф в цеховых условиях для одновременной записи вибраций испытуемого изделия в 24 его точках⁶. В частности, эта аппаратура была использована для исследований вибраций корпуса самолёта в производственных условиях.

ИЗМЕРИТЕЛИ СИЛ

Электронный динамометр состоит из упругого элемента, деформируемого измеряемым усилием, и электронного индикатора малых смещений, измеряющего величины деформации. Существенным достоинством электронных динамометров является высокая чувствительность, позволяющая вести непосредственный отсчёт контролируемых усилий по гальванометру или регистрацию их при помощи магнитоэлектрического или электронного осциллографа^{5, 7, 16}. На рис. 17 приведено несколько типичных схем установки индикаторов малых перемещений в электрических динамометрах. Сверху показана схема устройства для измерения сжимающих усилий. В середине — схема установки индикатора для измерения продольных усилий, растягивающих стержень. Внизу показана схема установки индикатора для измерения крутильных усилий в стержне или в вале.

Другим примером применения электронных измерителей сил являются электронные тензометры^{5, 7}, представляющие собой концевые электронные микрометры, используемые для измерения

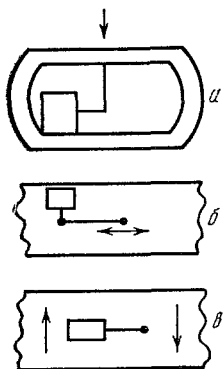


Рис. 17.

длины контролируемой базы. Для статических измерений целесообразнее пользоваться вдвоенными индикаторами, работающими в мостовой схеме, тогда как для динамических измерений могут быть использованы и менее стабильные индикаторы, обладающие большей чувствительностью.

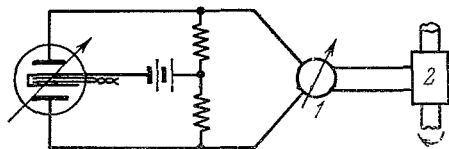


Рис. 18.

Электронные динамометры используются в качестве чувствительного элемента измерителей усилий, действующих в изготовленных машинах, устройствах, применяемых для контроля упругих свойств эластичных деталей, и приспособлений, служащих для

измерения усилий, развивающихся в рабочих органах станков во время их работы. На рис. 18 показана схема испытательной установки³ для непосредственного контроля мощности, развиваемой на валу изготовленной машины. Ток разбаланса моста, в который включён двуханодный датчик, пропорционален крутящему моменту, приложенному к валу. Этот ток поступает в одну из катушек ваттметра 1; во вторую катушку направляется ток от датчика 2 электрического тахометра. Мощность, развиваемая испытуемой машиной, отсчитывается непосредственно по ваттметру,

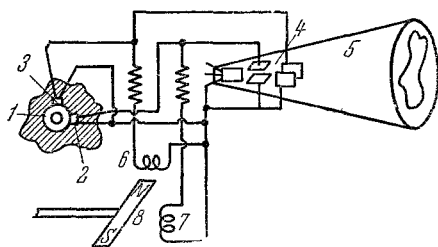


Рис. 19.

отградуированному в единицах мощности.

Другим примером использования электронного динамометра в устройствах для контроля изделий является непосредственное наблюдение реакции на подшипники контролируемых вращающихся деталей во время испытаний в процессе производства и при работе в

изготовленной машине. Схема такого устройства показана на рис. 19. У каждого из подшипников 1, в которых вращается испытуемая деталь, в двух перпендикулярных направлениях устанавливаются электронные динамометры 2 и 3, соединенные с отклоняющими пластинами 4 трубки 5 электронного осциллографа. На те же пластины осциллографа подается двухфазное переменное напряжение, генерируемое в катушках 6 и 7 постоянным магнитом 8, укрепленным на оси, соединенной с вращающейся испытуемой деталью.

ЭЛЕКТРОННЫЕ МАНОМЕТРЫ

Существенный интерес представляют также электронные манометры⁷. Принципиальная схема одного из них показана на рис. 20, а. Приёмником давления служит герметичный корпус с эластичной мембраной, деформация которой измеряется электронным индикатором малых перемещений. В качестве чувствительного элемента воспринимателя давления может служить также эластичный сильфон (коробочка Види или трубка Бурдона).

На рис. 20, б показана схема электронного манометра, мембраной которого является эластичная стенка резервуара индикатора. Плоский подогревный катод 1 находится около анода 2, выполняющего роль мембраны. Деформация анода сопровождается изменением тока в анодной цепи индикатора. На рис. 20, в показана схема электронного манометра с эластичным корпусом в форме сильфона.

Значительный интерес представляет применение электронных манометров для регистрации динамических процессов, а также динамических давлений, возникающих при испытании изделий. Так, например, применение электронных манометров для контроля давления внутри цилиндра двигателя внутреннего сгорания сильно упрощает контроль работы изготавливаемых двигателей в производственных условиях. Обусловлено это тем, что высокая чувствительность электронных манометров позволяет включать их непосредственно на осциллограф, не прибегая к усилению даваемых

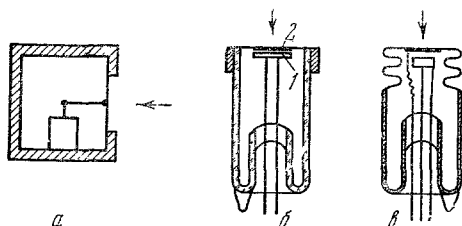


Рис. 20.

ими сигналов⁵⁻¹². Возможно также использование электронных манометров и для контроля работы других изделий, а также для контроля и регулирования производственных процессов по характеру динамических давлений, наблюдаемых при помощи осциллографических устройств⁵.

Представляет также известный интерес возможность использования малоинерционных электронных манометров в качестве приёмников для аппаратов ультразвуковой дефектоскопии⁴.

Наконец, некоторый интерес представляет также применение электронных индикаторов малых перемещений в качестве чувствительного элемента некоторых акустических приборов⁶. В частности, при помощи этих индикаторов были построены высокочувствительные микрофоны⁶. Чувствительность этих микрофонов не уступает чувствительности угольных микрофонов при уровне шумов, соответствующем уровню шумов хорошего конденсаторного микрофона. Электронные микрофоны имеют хорошие частотные характеристики, позволяющие применять их для высококачественного воспроизведения речи и музыки.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Гончарский, Электричество № 6, 62 (1952).
2. Л. Гончарский, Электричество № 12, 54 (1952).
3. Л. Гончарский, Электричество № 7 (1953).
4. E. Bradshaw, Journ. of Sci. Instr. 22, № 6, 112 (1945).

5. R. Gunn, Journ. of Appl. Mech. **7**, № 2, A-49 (1940).
 6. H. Olson, Journ. of Acoust. Soc. of Am. **19**, № 2, 307 (1947).
 7. G. Dion, Measures **17**, № 177, 95 (1952).
 8. R. Lewis, Journ. of Acoust. Soc. of Am. **22**, № 3, 357 (1950).
 9. W. Ramberg, Journ. of Res. Nat. Bur. of Stand. **37**, № 6, 391 (1946).
 10. W. Ramberg, AIE Transactions **66**, 735 (1947).
 11. Electronic Eng. **22**, 530 (1950).
 12. V. Zeluff, Electronics **24**, № 2, 120 (1951).
 13. Schottky, Ann. der Phys. **57**, 541 (1918).
 14. Harrison, Rev. of Sci. Instr. **19**, № 12, 936 (1948).
 15. Wildback, Rev. of Sci. Instr. **18**, № 1, 67 (1947).
 16. S. Levy, Exp. Stress. Analysis **9**, № 2, 151 (1952).
 17. R. Widdington, Phil. Mag. **40**, 634 (1920).
-