

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ЭЛЕКТРОННО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ**

Л. А. Гончарский

Опыт успешного использования механически управляемых электровакуумных приборов (механотронов) в научных лабораториях, промышленности и клинической практике показал, что эти приборы в настоящее время уже выделяются в самостоятельный раздел прикладной электроники.

Основной областью применения механотронов является разнообразная экспериментальная и прикладная аппаратура, предназначенная для исследования и контроля механических процессов в различных областях науки и техники. Здесь механотроны используются преимущественно в качестве высокочувствительных электронно-механических датчиков.

В настоящее время уже определилось несколько основных типов механотронов, изготавливаемых электровакуумной промышленностью ряда стран. Одновременно электровакуумные лаборатории продолжают разработку многочисленных типов новых механотронов, предназначенных для использования в новых системах измерительной, контрольной, автоматической и регистрирующей аппаратуры.

В ряде задач оказывается целесообразным строить специализированные типы электронно-механических датчиков, вместо того чтобы приспособлять существующие типы датчиков за счет одновременного усложнения последующих звеньев аппаратуры, предназначенной для решения конкретных задач. Именно этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что и в последнее время, несмотря на существование уже ряда конструкций высокочувствительных электронно-механических датчиков, продолжается интенсивная разработка новых датчиков такого типа, основанных на использовании новых явлений, позволяющих осуществить эффективное механическое управление электронными и ионными токами в вакууме.

Помимо разработки новых конструкций механотронов, намечается тенденция расширения областей их использования за рамки уже установившейся области экспериментальной техники исследования механических процессов и измерения значений отдельных механических величин, в последнее время наметились также тенденции использования электронно-механических датчиков для целей измерения и исследования немеханических величин. Анализ перспектив использования механотронов и в этих областях экспериментальной техники показывает целесообразность разработки специализированных конструкций этих ламп с целью осуществления совершенно новой по своим принципам действия электронной аппаратуры, могущей быть использованной в научных лабораториях, промышленности и других отраслях народного хозяйства.

Наконец, в последнее время проводилась работа по изучению возможностей использования механотронов в качестве преобразовательных элементов регулирующих и усилительных устройств. И в этих областях электронной техники намечены уже определенные перспективы, заслуживающие предварительного

анализа и хотя бы общей оценки возможностей и перспектив осуществления подобной аппаратуры.

Разработка новых упрощенных способов механического управления электронными и ионными токами, а также конструкций механотронов, доступных для изготовления и неспециализированным лабораториям, дает возможность многим научным и заводским лабораториям самостоятельно изготавливать механотроны. Это позволяет значительно быстрее внедрять электронно-механические датчики в технику физического эксперимента и шире использовать их в промышленной контрольно-измерительной аппаратуре.

Разработка новых систем электронно-механических датчиков, отличающихся высокой стабильностью и надежностью работы, при высокой чувствительности, привлекла в последнее время внимание к изучению возможностей использования этих датчиков в аппаратуре, применяемой для автоматизации производственных процессов. Электронные датчики нашли применение и в контрольной аппаратуре автоматических линий.

I. МЕХАНОТРОНЫ

1. Лампы продольного управления

Продольный способ механического управления электронными токами был первым, успешно использованным для осуществления надежно работающих электронно-механических датчиков, нашедших широкое применение в экспериментальной технике и прикладной аппаратуре. На основе использования этого способа были осуществлены механотроны, производящиеся электровакуумной промышленностью ряда стран в течение более чем десятилетнего срока¹.

Одновременно с расширением областей применения механотронов продольного управления велись работы по изучению физических особенностей продольного способа механического управления электронными токами с целью радикального улучшения параметров таких ламп, необходимого для использования их в новых областях экспериментальной техники, где они не применялись ранее.

Новым представителем механотронов продольного управления является лампа двусторонней проводимости. В ней имеется два плоских подогревных

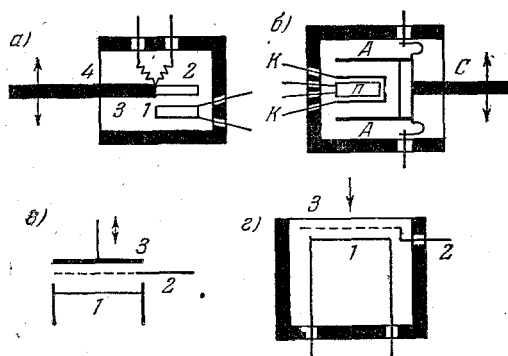


Рис. 1.

катода 1 и 2 (рис. 1, а), из которых первый неподвижен, а второй укреплен на подвижном стержне 3. Последний может качаться в эластичной мембране 4 в направлении, показанном стрелкой². Эта лампа имеет одинаковую проводимость в обоих направлениях и может быть использована для регулирования цепей переменного тока, а также в качестве датчика, работающего в цепях переменного тока. Ниже мы остановимся на устройствах подобного типа, в которых используется такой реостат регулируемого сопротивления.

ния, значения которого для токов обоих направлений остаются одинаковыми.

Практический интерес представляют и механотроны двусторонней проводимости с различными сопротивлениями для токов противоположных направлений и с регулируемым отношением этих сопротивлений. Это двойные диод-

ные лампы, направления токов каждой из половин которых имеют противоположное направление. Принципиальная схема одного из вариантов такой лампы показана на рис. 1, б. Здесь на общем подогревателе Π укреплены два подогревных катода K , параллельно которым расположены аноды A . При качаниях стержня C , на котором укреплены аноды, в направлении, показанном стрелкой, сопротивление одной из половин лампы возрастает при соответствующем снижении сопротивления ее второй половины. Такие лампы могут быть использованы в качестве датчиков, работающих на переменном токе, но дающих в нагрузку (отсчетное устройство или регистратор) пульсирующий ток, направление и среднее значение которого определяются смещением подвижной системы электронной лампы. Целесообразно использование таких ламп и в качестве реле, дающего ток, направление которого определяется направлением отклонения подвижного стержня. Подобные реле могут быть использованы для переключения исполнительных цепей систем с автоматическим регулированием, например, в автоматических потенциометрах.

Для параметрических датчиков, к которым относятся также и электронно-механические датчики, оказывается важным для обеспечения стабильной работы выбор достаточно мало напряженного температурного режима. Обусловлено это тем, что с возрастанием мощности, рассеиваемой внутри датчика, быстро нарастают температурные погрешности, а с ними и дрейф нуля измерительного устройства. Стоит отметить, что некоторые типы датчиков продольного управления, например датчики, изготавливаемые фирмами Сильвания (США), Мюллер (Англия), Филипс (Голландия), отличаются довольно напряженным тепловым режимом, потребляя около 5 *ватт*^{3, 4}. Обусловлено это не столько большой мощностью, рассеиваемой на анодах датчика, сколько повышенной мощностью, расходуемой на подогрев накаленного катода.

Соотношение мощностей, рассеиваемых на анодах и в катодах механотрона, характеризуется коэффициентом отношения мощностей

$$K = \frac{P_a}{P_n}, \quad (1)$$

где P_a — мощность, рассеиваемая на аноде лампы, и P_n — мощность, расходуемая на подогрев катода. Подставляя сюда значения

$$P_a = I_a \cdot U_a$$

и

$$P_n = I_a \cdot Y,$$

где U_a — напряжение на аноде лампы, I_a — анодный ток лампы, Y — удельная мощность накала $\frac{P_n}{I_a}$ в ваттах на ампер, получаем для K выражение

$$K = \frac{U_a}{Y}. \quad (2)$$

В связи с тем обстоятельством, что предельная мощность, которая может быть рассеяна внутри датчика, ограничена его предельным тепловым режимом, определяемым условиями стабильности работы, оказывается существенным повысить значение коэффициента отношения мощностей. Увеличение последнего позволяет повысить чувствительность датчика при неизменном значении мощности, рассеиваемой внутри датчика. Следовательно, для повышения чувствительности датчика, для которого фиксировано значение рассеиваемой в нем мощности, оказывается целесообразным повышение анодного напряжения при одновременном снижении удельной мощности накала.

В таблице I приведены примерные значения удельных мощностей накала и коэффициентов отношения мощностей для ряда типов ^{20,21} современных катодов электронных ламп, отличающихся малой работой выхода.

Таблица I

Тип катода	γ в вт/а	Значение K при		
		$U_a = 10 \text{ в}$	$U_a = 50 \text{ в}$	$U_a = 200 \text{ в}$
Катоды косвенного накала усилительных ламп	250	0,04	0,2	0,8
Катоды непосредственного накала усилительных ламп	25—50	0,2—0,4	1—2	4—8
Катоды кенотронов	50	0,2	1	4
Металлокерамические губчатые катоды . .	1	10	50	200

При сопоставлении данных таблицы I с параметрами датчиков становятся очевидными причины того, что электронные датчики продольного управления, изготовлявшиеся ранее, имели значения коэффициента мощностей значительно меньшие единицы. Это были преимущественно диодные датчики, работавшие при анодных напряжениях около 10 в или несколько больших.

Из соотношения (2) видно, что значения коэффициента отношения мощностей оказываются при таких условиях значительно меньшими единицы для всех типов катодов, применявшихся ранее в электронно-механических датчиках. Только использование металлокерамического губчатого катода ²¹, разработанного сравнительно недавно, позволяет осуществлять электронные датчики диодного типа, для которых значение коэффициента отношения мощностей превышает единицу.

В электронно-механических датчиках, имеющих оксидные катоды со сплошным керном, единственный способ повышения значения коэффициента отношения мощностей без снижения длительности срока службы сводится к повышению анодного напряжения и выбору наиболее подходящего по своей геометрии катода. В частности, в механотроне, изготовляемом фирмой «Radiocorporation» под названием вибротрона ¹⁵, использование подогревного катода неблагоприятной формы обусловило значение коэффициента отношения мощностей меньше единицы и при относительно высоком анодном напряжении, равном 300 в.

Из данных таблицы I видно, что замена оксидных катодов со сплошным керном косвенного подогрева оксидными катодами непосредственного накала способствует значительному повышению значений коэффициента отношений мощностей. Это дает основание рекомендовать для триодов с подвижным анодом продольного управления катоды непосредственного накала. В частности, на рис. 1, в приведена схема электронного датчика такого типа, удовлетворяющего указанному выше условию. Здесь 1 — неподвижный оксидный катод непосредственного накала и 2 — неподвижная плоская сетка с очень мелкими отверстиями. На очень небольшом расстоянии от сетки находится подвижный плоский анод 3, ориентированный параллельно плоскости сетки. Анод 3 перемещается в направлении, показанном стрелкой.

На рис. 1, г показана схема датчика динамических давлений — пьезотрона, система электродов которого соответствует показанной на рис. 1, в (обозначения аналогичные). Работа этого датчика основана на прогибе мембраны 3 при возрастании внешнего давления.

В диодных датчиках продольного управления также делались попытки использования катода непосредственного накала ^{13,14}. Однако датчики такого

типа отличались весьма малой чувствительностью по напряжению. В датчиках Ганна ¹³, а также Греховой и Васильевой ¹⁴ основной перепад потенциала электрического поля получался у поверхности катода, тогда как градиент электрического поля у поверхности подвижного анода имел слишком малое значение. Поскольку чувствительность датчика продольного управления ¹ по напряжению оказывается численно равной напряженности электрического поля у поверхности плоского анода, постольку становится очевидной причина малой чувствительности подобных датчиков.

Для повышения чувствительности по напряжению электронного датчика продольного управления, имеющего катод непосредственного накала, оказывается необходимым искусственно снизить напряженность электрического поля у поверхности катода и за счет этого увеличить напряженность электрического поля у поверхности подвижного анода. Одним из вариантов решения этой задачи является описанное выше устройство триода с неподвижной сеткой, находящейся между горячим катодом и подвижным анодом. Другое решение сводится к намотке катода непосредственного накала на плоскую пластинку изолятора.

Конструктивная схема такого механотрона соответствует диоду с плоскими параллельными электродами с той разницей, что вместо плоского подогревного катода помещена аналогичной формы пластинка изолятора, на которую намотан катод непосредственного накала. В этом случае наличие поверхности изолятора вблизи катода непосредственного накала снижает значение градиента электрического поля у его поверхности.

2. Лампы зондового управления

Выше было уже показано, что в механотронах продольного управления замена оксидных катодов со сплошным керном косвенного подогрева оксидными катодами непосредственного накала способствует значительному повышению значений коэффициента отношений мощностей. Однако при использовании в механотронах катодов непосредственного накала оказывается (во многих случаях) еще более целесообразным переход от продольного к зондовому управлению электронными токами. Такой переход позволяет ¹¹ значительно повысить чувствительность по напряжению электронно-механических датчиков ряда величин.

Чувствительность по напряжению механотрона зондового управления с однородным полем может быть подсчитана по формуле ¹¹

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

где U_a — напряжение на аноде лампы, a — расстояние между холодным катодом и горячим катодом. Полагая $U_a = 500$ в и $a = 0,1$ мм, получаем чувствительность по напряжению порядка 50 000 в/см. Используя скважный анод и располагая за ним коллектор ¹¹ электронного тока, можно достичь дальнейшего значительного повышения чувствительности по напряжению лампы зондового управления.

Относительно небольшая мощность, рассеиваемая в механотроне зондового управления с высокой чувствительностью по напряжению, позволяет значительно сократить внешнюю поверхность металлических электродов; в частности, оказывается возможным выполнять электроды из проволоки. Это упрощает технологию изготовления и обезгаживания электродов лампы.

Схема расположения электродов лампы такого типа показана на рис. 2, а. Здесь K — катод непосредственного накала, A — анод, выполненный из

проволоки, X — холодный катод, также выполненный из проволоки, сечение которой значительно меньше поперечного сечения анода. Подвижным электродом является холодный катод, могущий перемещаться в направлении, показанном стрелкой.

Сдвоенный вариант этого типа лампы показан на рис. 2, б. Неподвижный горячий катод K непосредственного накала имеет U-образную форму. С внешней стороны катода находятся два анода A , представляющие собой прямые проволоки. Конусообразный холодный катод X размещен между двумя ветвями горячего катода.

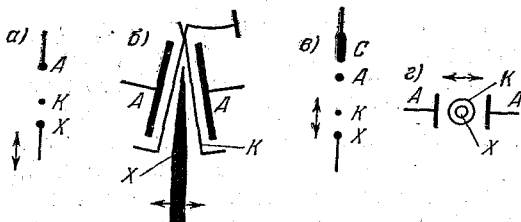


Рис. 2.

был использован анод, имеющий форму конуса. Такая форма подвижного электрода с механической точки зрения оказалась весьма благоприятной, позволяя значительно повысить резонансную частоту кинематической системы лампы (до 12 000 гц). Однако она вредно сказалась на возможности получения эффективного продольного механического управления электронным током лампы.

Напротив, при использовании зондового управления концентрация электрического поля у конца конуса оказывается, в отличие от продольного способа управления, весьма благоприятной для получения высокой чувствительности механотрона по напряжению.

На рис. 2, в приведен вариант конструкции лампы зондового управления с коллектором C анодного тока лампы, расположенным за выполненным из прямой проволоки относительно небольшого диаметра анодом A . Подвижный холодный катод X управляет электронным током, испускаемым горячим катодом K . Большая часть электронов огибает тонкий стержень анода и попадает на коллектор C . Чувствительность по напряжению и внутреннее сопротивление такого механотрона оказываются значительно большими соответствующих параметров аналогичного триодного механотрона зондового управления.

Для получения высокой чувствительности по току в механотроне зондового управления следует уменьшить расстояние между горячим катодом и анодом. Однако в таком режиме при значительных анодных токах нарушается пропорциональность градиента электрического поля вблизи поверхности зонда разности потенциалов зонда и эквипотенциальной поверхности, на уровне которой находится зонд¹¹. В том случае, когда зонд находится в непосредственной близости от анода, электронная лампа работает в известной степени аналогично кенотрону с плоскими анодами и катодом непосредственного накала. Это дает основание воспользоваться эмпирической формулой Кузунозы²² для получения приближенного выражения, позволяющего оценить чувствительность лампы по току к перемещениям подвижного электрода. При использовании тонких катодов, диаметр которых достаточно мал по сравнению с расстоянием между зондом и анодом, структура электрического поля вблизи катода получается аналогичной структуре электрического поля в кенотроне с катодом такого же диаметра, находящимся на расстоянии от анода, равном расстоянию зонда от анода лампы (при условии, что анод кенотрона имеет потенциал, близкий к потенциалу эквипотенциальной поверхности, на уровне которой находится зонд).

Формула Кузунозы для анодного тока кенотрона указанного типа имеет вид

$$I_a = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a \cdot U_a^{1,5}}{\beta^2 \cdot a^2}, \quad (4)$$

где S_a — действующая поверхность анода, U_a — анодное напряжение, β — коэффициент, значение которого определяется отношением диаметра катода к расстоянию между катодом и анодом (для катодов малого диаметра, используемых в лампах зондового управления, β можно положить равным единице), a — расстояние между горячим катодом и анодом.

Полагая в этом выражении

$$S = 2 \cdot L \cdot a, \quad (5)$$

где L — полная длина активной поверхности катода непосредственного накала, мы получаем выражение для анодного тока лампы зондового управления с однородным полем в форме

$$I_a = 4,66 \cdot 10^{-6} \frac{L \cdot U_a^{1,5} \cdot (l - a)^{1,5}}{l^{1,5} \cdot a}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в выражение для дифференциальной чувствительности по току

$$\psi_d = \left(\frac{\partial I_a}{\partial a} \right) dU_a = 0, \quad (7)$$

получаем

$$\psi_d = -4,66 \cdot 10^{-6} \frac{L \cdot U_a^{1,5} \cdot (l - a)^{0,5} \cdot (l + 0,5a)}{l^{1,5} a^2}. \quad (8)$$

Так как $a < l$, то полученное приближенное соотношение может быть преобразовано к виду

$$\psi_d = -4,66 \cdot 10^{-6} \frac{L \cdot U_a^{1,5}}{a^2}. \quad (9)$$

Сравнивая (6) и (8), получаем приближенное выражение

$$\psi_d = \frac{I_a}{a}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) видно, что при фиксированном расстоянии между горячим катодом и анодом чувствительность датчика зондового управления оказывается пропорциональной его анодному току. При фиксированном диаметре катода повышение анодного тока сопровождается увеличением длины катода. Это в свою очередь позволяет переходить от конструкций ламп с прямолинейным катодом к конструкциям ламп зондового управления с более плотной укладкой катода. В частности, здесь разумно использовать крепление катода непосредственного накала зигзагом, как это сделано, например, в кенотроне 5ЦЗС.

Целесообразным является также оформление катода непосредственного накала механотрона зондового управления и в форме U-образной петли, укрепленной своими концами на подвижном стержне лампы. Плоскость петли располагается параллельно поверхностям анода и холодного катода.

На рис. 2, г приведена схема сдвоенного датчика зондового управления, в котором использован катод непосредственного накала, намотанный в виде

спирали круглой или прямоугольной формы. По обе стороны спирального катода K непосредственного накала находятся аноды A . Внутри спирали находится холодный катод X , представляющий собой прямой тонкий стержень, ось которого совпадает с осью спирали. При перемещениях холодного катода в направлении, указанном стрелкой, меняется соотношение анодных токов в обеих половинах двоиного датчика. В электронных датчиках ускорений возможно использование свободной спирали, провисающей под действием инерционной силы, в качестве подвижной инертной массы датчика. В некоторых случаях целесообразно выполнять катод в виде спирали, намотанной на жесткий каркас.

Холодный катод может быть выполнен и из изолятора. Потенциал, который приобретает поверхность изолятора, находящегося в непосредственной близости от горячего катода, оказывается близким к потенциалу соответствующих участков катода, но несколько ниже его за счет различия температур.

3. Ионные лампы тлеющего разряда

Действие ионных датчиков тлеющего разряда основано на двух основных принципах: на геометрическом ограничении тлеющего разряда и на использовании зондов, перемещающихся внутри разрядного промежутка. При геометрическом ограничении разрядного промежутка возрастает работа, необходимая для переноса через него электрического заряда, а следовательно, и падение напряжения на разрядном промежутке при неизменном токе разряда. В настоящее время известно несколько способов геометрического ограничения разряда, позволяющих получать значительную чувствительность механотрона.

Наиболее известным из них является продольный способ механического управления затрудненным разрядом¹. Принципиальная схема такого датчика показана на рис. 3, а. Внутри ионной лампы находятся два электрода — неподвижный электрод 1 и электрод 2,

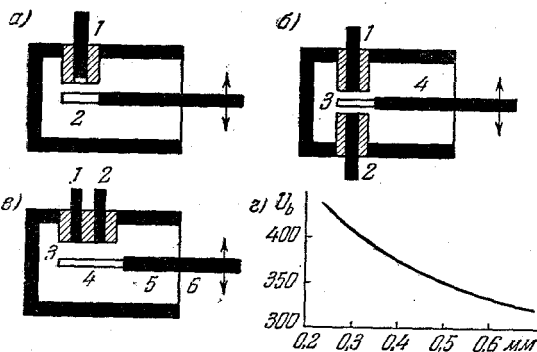


Рис. 3.

могущий перемещаться в направлении, показанном стрелкой. Обратные друг к другу поверхности обоих электродов плоские и параллельные. Давление газа (обычно инертного) внутри лампы задается таким, чтобы получить затрудненный тлеющий разряд между электродами. Для предотвращения огибающего разряда на боковую поверхность катода последний окружен защитной стеклянной трубкой. При этих условиях удается получить высокую чувствительность ионной лампы по напряжению к перемещению подвижного электрода.

На рис. 3, б показана схема двоиного датчика такого типа. Подвижный плоский анод 3, укрепленный на стержне 4, впаянном в эластичную мембрану, может перемещаться в направлении, показанном стрелкой, изменяя падение напряжения на обоих разрядных промежутках.

Обращает на себя внимание величина внутреннего дифференциального сопротивления ионных датчиков такого типа, достигающая 100—200 ком.

Схема ионного датчика поперечного управления показана на рис. 3, в. Здесь тлеющий разряд между электродами 1 и 2 проходит сквозь щель 3, одна стенка которой неподвижна, а вторая образуется подвижной пластиной 4, укрепленной на стержне 5, проходящем сквозь эластичную мембрану.

чу 6. Сужение щели, в которой происходит разряд, способствует рекомбинации ионов на стенках щели и повышает тем самым падение напряжения на приборе. Примерная форма характеристики зависимости падения напряжения на приборе от положения подвижного электрода показана на рис. 3, 2. Иногда электрод 1 помещается внутри полого цилиндрического электрода 2.

Здесь следует отметить целесообразность использования в ионных датчиках поперечного управления накаливаемого катода. Это позволяет значительно снизить рабочее напряжение на датчике. В этом случае принципиальная схема лампы остается аналогичной, приведенной на рис. 3, в, с той разницей, что холодный катод 1 заменен горячим катодом.

На рис. 4, а приведена схема зондового механотрона тлеющего разряда постоянного тока. Он состоит из баллона, наполненного разреженным инертным газом, внутри которого находятся два плоских параллельных электрода 1 и 2.

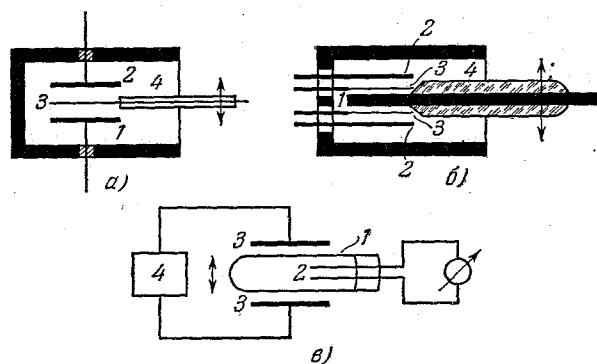


Рис. 4.

Между ними (и параллельно им) расположен электрод 3, представляющий собой тонкую прямую проволочку, укрепленную на стержне 4, который может перемещаться (благодаря эластичному сочленению) в направлении, показанном стрелкой. Потенциал электрода 3, играющего роль зонда, находится в определенном соответствии с потенциалом зоны разряда, в которой он помещается. При работе датчика между электродами 1 и 2 поддерживается тлеющий разряд и перемещение зонда сопровождается изменением его потенциала относительно электрода 1. Следовательно, потенциал зонда определяет положение подвижного электрода.

На рис. 4, б приведена схема двоянного датчика зондового управления, в котором разряд происходит между катодом 1 и анодами 2. С обеих сторон катода 1 находятся два тонких прямых зонда 3. Катод 1 укреплен на подвижном стержне 4. Перемещения последнего в направлении, показанном стрелкой, сопровождаются соответствующими изменениями тока в гальванометре, приключенном к зондам¹².

Недавно фирма «Decker Aviation Company» в США начала массовое изготовление ионных датчиков зондового управления²³, работающих в электрическом поле высокой частоты. Действие этого датчика основано на явлении возникновения пространственного заряда в разреженном газе при высокочастотном разряде. Схема измерительного устройства с высокочастотным ионным датчиком зондового управления показана на рис. 4, в. Сам датчик представляет собой наполненную разреженным газом трубку 1, в которую введены два прямых электрода 2. Датчик помещается в электрическое поле конденсатора 3, питаемого от высокочастотного генератора 4. При перемещении датчика 1 в направлении, показанном стрелкой, меняется величина постоянного напряжения, снимаемого с электродов 2. Максимальное смещение датчика

сопровождается изменением снимаемого напряжения в диапазоне 200 в. При этом существенно отметить линейный характер зависимости снимаемого напряжения от перемещения датчика. Чувствительность датчика по напряжению оказывается около 20 000 в/см. Диаметр стеклянной трубочки около 6 мм, а длина около 18 мм. Обращает на себя внимание высокий срок службы датчиков — более 5000 часов, обусловленный в значительной степени тем обстоятельством, что измерительное устройство оказывается весьма экономичным в отношении потребляемой мощности — при нормальной работе датчик потребляет мощность, меньшую 0,05 Вт.

4. Ионные лампы импульсного разряда

Действие ионных ламп импульсного разряда основано на регулировании напряжения зажигания разряда перемещением подвижного электрода. Ионные лампы такого типа могут иметь и холодный и горячий катод.

Действие ламп первого из упомянутых выше типов основано на регулировании напряжения зажигания разряда в результате изменения геометрии разрядного промежутка. Ионные лампы могут быть как продольного управления (конструктивное оформление в основном соответствует вариантам, изображенным на рис. 3, а, б), так и поперечного управления (в основном соответствуют схеме, изображенной на рис. 3, в).

Здесь следует также отметить целесообразность использования в импульсных лампах с холодным катодом и отдельного, третьего электрода, являющегося подвижным электродом, управляющим зажиганием разряда в лампе. Лампа такого типа является механически управляемым тиратроном с холодным катодом. В этом тиратроне управляющий электрод является подвижным электродом механотрона. При однократном замыкании в таких лампах допустимы некоторые колебания напряжения, необходимого для зажигания разряда. Однако при использовании таких датчиков в схемах релаксационных генераторов и при импульсном питании постоянным током колебания напряжения зажигания сглаживаются и значение среднего напряжения зажигания разряда уже может довольно близко характеризовать положение подвижного элемента.

К механотронам импульсного разряда относятся также и механически управляемые тиратроны. Механически управляемый тиратрон имеет один подвижный электрод, перемещение которого используется для механического регулирования коэффициента управления тиратрона. Схема механически управляемого тиратрона по существу не отличается от любой механически управляемой электронной лампы, имеющей горячий катод и один подвижный электрод. Аналогично механически управляемым электронным лампам механически управляемые тиратроны могут быть продольного, зондового и дифференциального управления⁶. Механически управляемые тиратроны могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. Позднее мы коснемся некоторых особенностей обоих режимов работы механически управляемых тиратронов.

Механически управляемые тиратроны могут иметь внешнее управление за счет кинематической связи через эластичный элемент стенки баллона ионной лампы. Возможно также осуществление механически управляемых тиратронов внутреннего управления. В частности, в тиратронных датчиках ускорений в качестве инертной массы можно использовать сам подвижный электрод. При фиксированных значениях напряжений на электродах тиратрона разряд внутри него зажигается при определенном значении ускорения, с которым движется тело, на котором укреплен датчик.

В другом возможном варианте тиратрона с внутренним механическим управлением подвижный электрод укрепляется на свободно подвешенном магните. Под действием внешнего магнитного поля последний поворачивается, увлекая

за собой электрод. Такой тиратрон с магнитным управлением может быть использован либо для контроля заданной напряженности магнитного поля, либо для контроля определенной ориентации тиратрона относительно магнитного поля.

II. ИЗМЕРИТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Микрометры

Высокая чувствительность механотронов к положению подвижного электрода способствовала использованию этих ламп в первую очередь в качестве высокочувствительных датчиков электронных микрометров^{13, 14}. В последних используются преимущественно мостовые схемы, работающие на постоянном токе с гальванометром (стрелочным) в качестве отсчетного устройства, причем чувствительность микрометра достигает 10^{-6} и даже 10^{-7} см и ограничивается не электронными элементами устройства, а стабильностью работы его механических элементов и тепловыми деформациями отдельных его частей. Здесь уместно отметить, что столь высокая чувствительность микрометра к малым перемещениям оказывается особенно существенной для обнаружения малых периодических изменений линейных размеров или перемещений, где непрерывное смещение нуля измерительного устройства оказывается уже неопасным, при условии сохранения неизменной чувствительности устройства к малым перемещениям.

В связи с нелинейностью характеристик большей части электронных датчиков, используемых в микрометрах, в последних прибегают обычно к сдвиганию датчиков, имеющих идентичные характеристики. В этом случае колебания напряжения в питающей цепи вызывают относительно небольшие смещения нуля. Здесь следует отметить, что зависимость чувствительности большинства

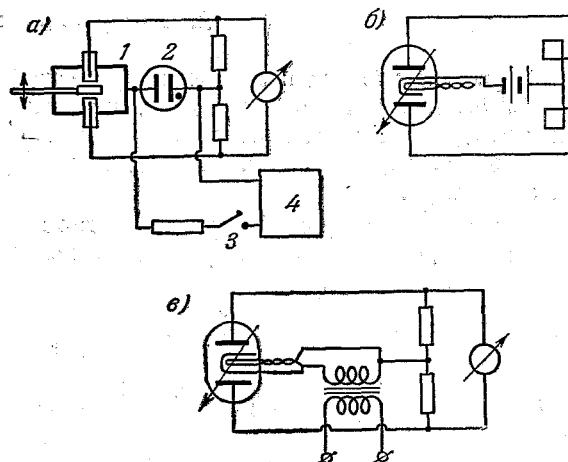


Рис. 5.

электронно-механических датчиков от приложенного напряжения требует стабилизации последнего и в первую очередь для питания анодных цепей.

Схема включения высокочастотного датчика к гальванометру большого внутреннего сопротивления показана на рис. 4, в. На рис. 5, а показана мостовая схема включения ионного датчика 1 продольного управления с затрудненным тлеющим разрядом. В этой же схеме показано включение газоразрядного стабилизатора 2 напряжения, используемого для питания микрометра.

К числу достоинств газоразрядных датчиков относится возможность производства измерений непосредственно после включения устройства. Этим они выгодно отличаются от электронных датчиков, требующих определенного промежутка времени для разогрева накаливаемого катода и установления стационарного теплового режима. Период установления стационарного теплового режима оказывается для датчиков с подогревным катодом значительно большим промежутка времени установления стационарного теплового режима датчика с катодом непосредственного накала.

Благодаря наличию возможности включения ионных датчиков только на время измерения оказывается возможным с их помощью осуществить измерительное устройство для периодического отсчета контролируемого размера в течение длительного срока времени при питании его от сухой батареи. На схеме, приведенной на рис. 5, а, имеется выключатель 3, позволяющий периодически производить кратковременное включение питающей схему батареи 4.

Использование логометра для отсчета показаний электронного микрометра позволяет ³⁵ применять для его питания нестабилизированные источники. На рис. 5, б показана схема включения логометра в схему электронного микрометра.

Электронно-механические датчики с горячим катодом имеют одностороннюю проводимость. Это дает возможность использовать для их питания сеть переменного тока, а на выходе датчика иметь выпрямленный сигнал, пригодный для подачи на высокочувствительные магнитоэлектрические отсчетные и регистрирующие устройства.

На рис. 5, в показана схема электронного микрометра, работающего на переменном токе и снабженного для отсчета показаний чувствительным гальванометром постоянного тока. При использовании в таком устройстве магнитного стабилизатора питающего напряжения можно иметь простой и удобный в работе микрометр, работающий от сети переменного тока.

2. Вибротроны

Первоначально под названием вибротрона была известна электронная лампа RCA-5734, названная так потому, что она применялась главным образом для исследования различных колебательных процессов¹. Позднее так стали называться электронно-механические датчики, применяемые в виброизмерительной аппаратуре.

Для исследования колебаний применяются электронно-механические датчики смещений, скоростей и ускорений. Из них наибольший практический интерес

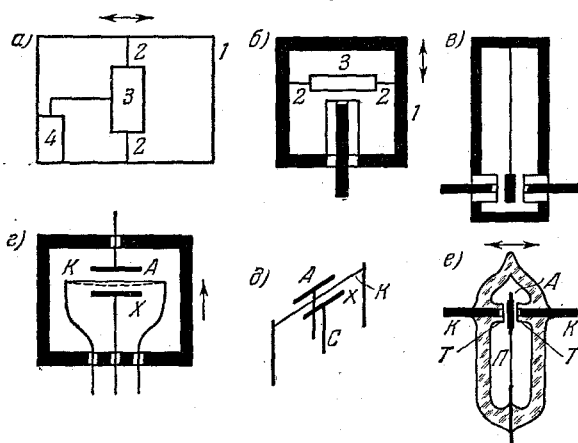


Рис. 6.

в настоящее время представляют первые и последние. Электронные датчики смещений при колебательных процессах — сейсмотроны бывают двух типов: с внешним и внутренним управлением.

Принципиальная схема сейсмотрона внешнего управления показана на рис. 6, а. Внутри каркаса 1 подвешена на эластичных пружинах 2 инертная масса 3, сочлененная кинематически с электронным датчиком малых перемещений 4. Если частота колебаний значительно выше собственной частоты

колебательной системы, образованной массой 3 и пружинной подвеской 2, то масса 3 остается практически неподвижной, а корпус вибротрона 1 колеблется относительно этой массы в направлении, указанном стрелкой.

В таких вибротронах используются стандартные электронные датчики малых смещений, отличающиеся сравнительно небольшим рабочим ходом подвижного электрода. Выбор длины рычага, удлиняющего стержень подвижного

электрода, определяется диапазоном смещений, на который рассчитывается измерительное устройство, с тем, чтобы получить максимальную амплитуду сигналов датчика и не рисковать его перегрузкой.

Значительно проще по своей конструкции датчики смещений внутреннего управления. На рис. 6, б приведена схема такого сейсмофона. Внутри электронной лампы 1 на эластичном подвесе 2 укреплен инертная масса 3, образующая подвижный электрод лампы. Резонансная частота кинематической системы сейсмофона и в этом варианте должна быть ниже самой низкой составляющей диапазона исследуемых частот. При колебаниях лампы, укрепленной на исследуемом объекте, эластично подвешенный электрод остается в покое. Поэтому положение этого электрода относительно остальных электродов лампы периодически изменяется в соответствии с колебаниями объекта. В результате в анодной цепи лампы появляются сигналы, характеризующие контролируемые колебания. На рис. 6, в показана схема электронно-механического уровня, который может быть использован в качестве сейсмофона для горизонтальных колебаний.

Сигналы, генерируемые сейсмофонами описанных выше типов, практически мало зависят от частоты колебаний (если последняя значительно выше резонансной частоты кинематической системы датчика), а их амплитуды оказываются пропорциональными смещениям контролируемого объекта.

Электронные датчики ускорений — акселетроны — имеют кинематические системы, аналогичные по своей конструкции приведенным на рис. 6, а, б и в. Отличие кинематических систем сейсмофонов и акселетронов заключается в выборе резонансных частот. Резонансная частота кинематической системы акселетрона должна быть значительно выше наиболее высокочастотной составляющей исследуемого механического процесса. В этом случае смещение инертной массы датчика оказывается пропорциональным ускорению, с которым движется датчик. Чувствительность акселетрона обратно пропорциональна резонансной частоте его кинематической системы. Поэтому не следует задавать собственную частоту кинематической системы на много более высокой, чем это необходимо для удовлетворительного воспроизведения ускорений исследуемого диапазона.

Датчики смещений и ускорений внешнего управления представляют собой обычные электронно-механические датчики малых перемещений, сочлененные при помощи кинематической системы с инертной массой. Особенности работы такого устройства в значительной степени зависят от конструктивного оформления кинематической системы, не представляющего существенных трудностей и аналогичного в значительной степени сейсмодатчикам и датчикам ускорений с другими системами электрических датчиков.

Поэтому мы рассмотрим только некоторые важнейшие особенности устройства электронных датчиков смещений и ускорений внутреннего управления. Наиболее известными датчиками такого типа являются лампы, изготавливаемые фирмами Сильвания³, Мюллер²⁴ и Филипс²⁵. Они представляют собой диоды продольного управления с подвижными анодами и отличаются высокой чувствительностью по току и малым значением рабочего напряжения на анодах. Сигналы от таких датчиков обычно записываются непосредственно при помощи электромагнитного осциллографа, без предварительного усиления. К существенным дефектам подобных ламп относится чрезмерно большое значение мощности, расходуемой на подогрев катода лампы.

Опишем несколько конструкций электронных датчиков ускорений, отличающихся значительно меньшей тепловой нагрузкой катода лампы.

Сюда следует в первую очередь отнести электронные датчики зондового управления. На рис. 6, г приведена схема наиболее простого по своей конструкции электронного датчика ускорений зондового управления с провисающим катодом. Он состоит из анода А и холодного катода Х, между которыми

находится нитевидный катод непосредственного накала K . При ускоренном движении датчика в направлении, показанном стрелкой, катод K провисает под действием инерционной силы, принимая положение, показанное пунктиром. В качестве материала для изготовления провисающего катода оказывается целесообразным использование оксидированного вольфрама, имеющего высокую прочность, вполне достаточную для измерения значительных ускорений.

Провисающий катод может иметь также форму U-образной петли, плоскость которой располагается параллельно плоскостям анода и холодного катода. Инерционная сила, приложенная к петле, при ускоренном движении датчика, изгибает петлю и изменяет ее расстояние от анода и холодного катода.

При использовании электронного датчика зондового управления для измерения относительно небольших ускорений оказывается целесообразным применить в качестве подвижного электрода холодный катод. Схема такого датчика показана на рис. 6, *д*. Здесь анод A и горячий катод K , натянутый довольно сильно, представляют собой неподвижные электроды датчика, а холодный катод X , укрепленный на эластичном стержне C , представляет собой инертную массу датчика ускорений.

Помимо вакуумных акселетронов, оказывается возможным использование газоразрядных датчиков ускорений тлеющего разряда²⁷. Из существенных достоинств датчиков такого типа следует отметить отсутствие накаливаемого катода, что способствует значительному повышению надежности датчика. Отсутствие накаливаемого катода позволяет также использовать датчик для измерений сразу же после включения установки, не дожидаясь установления теплового равновесия, обязательного для датчиков, имеющих горячий катод. Схема ионного датчика ускорений, в котором использовано продольное управление затрудненным тлеющим разрядом, показана на рис. 6, *е*. Здесь между двумя катодами K , боковые поверхности которых закрыты стеклянными трубками T , находится плоский подвижный анод A , укрепленный на эластичной пластинке $П$. Ускоренное движение датчика в направлении, показанном стрелкой, сопровождается соответствующим изменением зазоров между электродами, при котором на одном разрядном промежутке падение напряжения повышается, в то время как на втором разрядном промежутке оно соответственно уменьшается. Сдвоенный датчик такого типа предназначается для работы в мостовой схеме. Существенно, чтобы конец защитной трубки T выступал за края катода K . Такая геометрия способствует лучшей концентрации затрудненного разряда внутри разрядного промежутка. Кроме того, выступающий конец трубки T оказывается удобным ограничителем перемещений подвижного анода, предотвращающим замыкание электродов при чрезмерных перегрузках датчика.

Одной из важнейших особенностей вибротронов является малость механических сил, необходимых для смещения электрода, обусловленных особенностями механического управления электронными и ионными токами. Это дает возможность использовать в датчиках такого типа весьма малые по своей величине инертные массы. А это в свою очередь позволяет значительно облегчить демпфирование собственных колебаний кинематической системы датчика; как известно, особые трудности представляет демпфирование подвижного электрода датчика с внутренней инертной массой, причем легче осуществить демпфирование внутреннего электрода у газоразрядных датчиков, в которых возможно использовать внутреннее трение в газе, наполняющем датчик.

Из числа способов демпфирования электронно-механических датчиков ускорений с внутренней инертной массой наиболее разработанным является способ, основанный²⁸ на использовании кинематической системы с двумя степенями свободы. Сущность этого способа сводится к эластичному креплению датчика ускорений, на котором в свою очередь укреплена эластичная кинематическая система с резонансной частотой, равной резонансной частоте подвиж-

ного электрода датчика, но имеющая гораздо большее затухание. Наличие кинематической связи способствует передаче энергии колебательного движения от внутреннего колеблющегося тела внешнему, где она расходуется на преодоление силы трения. Опытное исследование этого способа демпфирования колебаний¹⁸ подтвердило его эффективность.

Выше мы уже отмечали, что нет принципиальной разницы между сейсмографом и акселетроном. Датчики обоих типов различаются лишь соотношением контролируемого диапазона колебаний и резонансной частоты кинематической системы датчика. Так, например, портативный электронный датчик низкочастотных ускорений, будучи укрепленным на колеблющемся стержне, оказывается хорошим приемником его продольных звуковых и ультразвуковых колебаний, т. е. работает в качестве сейсмофона. Следует указать, что использование сейсмофона в качестве датчика позволяет значительно упростить техническую и научную аппаратуру, применяемую для регистрации колебательных процессов, за счет уменьшения или совершенного устранения усилителей.

3. Измерители сил

К приборам такого типа можно отнести измерители давлений (электронные манометры или пьезотроны), электронные динамометры и электронные тензометры.

Электронные манометры бывают внешнего и внутреннего управления. К приборам первого типа относятся преимущественно манометры мембранного типа (рис. 7, а), в которых деформация мембраны M под действием давления газа или жидкости измеряется при помощи электронно-механического датчика D малых перемещений⁹. Вместо эластичной мембраны в качестве воспринимающего давлений могут быть использованы также трубки Бурдона или коробочки Види. Ввиду очевидности подобной замены эти варианты манометров не показаны на рисунке.

К электронным манометрам внутреннего управления относятся датчики, имеющие эластичный элемент стенки баллона, деформирующийся под действием контролируемого давления. На рис. 1, 2 приве-

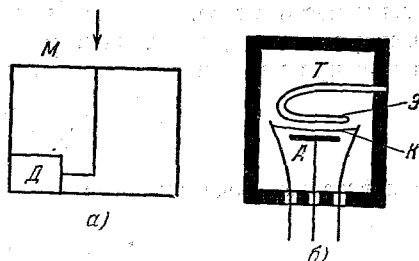


Рис. 7.

дена схема пьезотрона, часть стенки баллона которого оформлена в виде эластичной мембраны, прогибающейся под внешним давлением. Электроно-механические датчики давления такого типа пригодны для исследований динамических давлений. В частности, оказывается целесообразным применение²⁸ таких датчиков для регистрации и визуального наблюдения за ходом давления внутри цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

На рис. 7, б приведена схема другого варианта конструкции электронно-механического датчика давлений внутреннего управления, в котором элементом, воспринимающим измеряемые давления, является уплощенная искривленная стеклянная трубка T , впаянная в стеклянную стенку баллона электронной лампы. Конiec $\mathcal{E}$ этой стеклянной трубки оказывается в непосредственной близости от горячего катода K лампы зондового управления (A — анод этой лампы) и выполняет функции подвижного холодного катода. При изменениях давления среды, в которой находится датчик, происходит деформация стеклянной трубки T и меняется соответственно расстояние между электродами K и A , с одной стороны, и концом $\mathcal{E}$ стеклянной трубки, с другой стороны. В результате этого анодный ток датчика оказывается функцией контролируемого давления.

Последние два типа электронно-механических манометров пригодны для измерений сравнительно высоких давлений, тогда как манометр мембранного типа с электронно-механическим датчиком стрелы прогиба мембраны могут быть использованы как для измерения высоких, так и сравнительно низких давлений. Манометры такого типа могут быть применены для измерения давлений, начиная от 10^{-2} мм ртутного столба и до весьма высоких давлений.

Заслуживает упоминания возможность использования мембранного манометра и для измерения более низких давлений при условии использования системы, аналогичной манометру Мак-Леода, в котором перемещающаяся ртуть сжимает контрольный объем газа в узкую щель, образованную с одной стороны плоской неподвижной стенкой, а с другой стороны мембраной чувствительного электронно-механического манометра.

Использование электронно-механических датчиков с внешним управлением в качестве динамометров основано на измерении деформаций, вызванных приложенными силами. Высокая чувствительность электронно-механических датчиков позволяет использовать кинематические системы динамометров, отличающиеся высокой жесткостью, весьма малыми упругими последствиями и остаточными деформациями. Это дает возможность осуществлять динамометрические устройства, обладающие высокими частотами собственных колебаний, и пригодные для исследования быстротечных динамических процессов.

Особенно интересным оказывается использование электронно-механических датчиков для тензометрических исследований. Генерируемые ими сигналы оказываются столь интенсивными, что во многих случаях позволяют приключать их непосредственно к типовым электромагнитным и электронным осциллографам для целей регистрации динамических давлений.

Приведем некоторые соотношения, иллюстрирующие непосредственную возможность этого. Определяя чувствительность ι_d тензометра по току как частную производную тока в нем по действующему механическому напряжению σ при постоянном напряжении на аноде датчика

$$\iota_d = \left(\frac{\partial I_a}{\partial \sigma} \right)_{\text{при } dU_a = 0} \quad (11)$$

и подставляя сюда значение

$$\sigma = \frac{E \cdot \Delta L}{L}, \quad (12)$$

где L — база тензометра, ΔL — ее удлинение и E — модуль упругости испытуемого материала, получаем

$$\iota_d = \frac{L \cdot \phi_d}{E}, \quad (13)$$

где ϕ_d — чувствительность датчика по току к малым перемещениям.

Определяя чувствительность υ_d тензометра по напряжению как частную производную напряжения на аноде механотрона по действующему механическому напряжению

$$\upsilon_d = \left(\frac{\partial U_a}{\partial \sigma} \right)_{dI_a = 0} \quad (14)$$

и подставляя сюда (12), получаем

$$\upsilon_d = \frac{L \cdot \varphi_d}{E}, \quad (15)$$

где φ_d — чувствительность датчика по напряжению к малым перемещениям.

Задаваясь, для примера, значениями $L = 2$ см, $\phi_d = 1$ а/см, $\varphi_d = 10\,000$ в/см, $E = 20\,000$ кг/мм², получаем соответственно $\iota_d = 100$ мка $\times$ мм²/кг, $\upsilon_d = 1$ в $\cdot$ мм²/кг.

Нетрудно видеть из приведенных данных, что полученные значения электронно-механических тензометров в сотни раз превосходят чувствительности проволочных тензометров сопротивления, имеющих одинаковые базы.

Используя малогабаритные электронно-механические датчики, можно осуществлять высокочувствительные малогабаритные тензометры, легко размещаемые в малых полостях контролируемых машин и механизмов, что позволяет значительно упростить экспериментальную аппаратуру, применяемую для исследования работы машин и механизмов в условиях их нормальной эксплуатации и испытаний.

Следует также отметить возможность использования электронно-механических динамометров и в экспериментальной физике.

4. Акустические приборы

Высокая чувствительность электронно-механических датчиков к малым перемещениям и малым механическим силам делает особенно заманчивым применение их в качестве высокочувствительных датчиков в акустических приборах¹⁵. В первую очередь были осуществлены электронные микрофоны. Принципиальная схема электронного микрофона состоит из мембраны, являющейся воспринимателем звуковых колебаний, и сочлененного с ней электронного датчика перемещений этой мембраны. Особенно успешным оказалось использование в качестве датчика электронных микрофонов вибротрона. В приведенной схеме электронный датчик работает в качестве сейсмофона внешнего управления, фиксирующего колебания мембраны. Такие микрофоны оказываются особенно удобными для целей воспроизведения низких частот слышимого диапазона звуковых колебаний²⁹.

Интересно также указать на второй не менее перспективный способ осуществления электронных микрофонов с сейсмофоном внутреннего управления, резонансная частота которого лежит ниже уровня звуковых частот, воспроизводимых микрофоном. Он состоит из конусообразной мембраны, в вершине которой укреплен чрезвычайно легкий сейсмофон. Колебания последнего сопровождаются генерированием электрических колебаний, соответствующих звуковым волнам, попадающим на мембрану микрофона. При достаточно малой массе сейсмофона оказывается возможным получить хорошую частотную характеристику такого микрофона.

Если кинематическая система микрофона с датчиком внешнего управления имеет собственную частоту значительно ниже диапазона звуковых колебаний, то она превращается в электронно-механический измеритель звукового давления.

Одним из первых приложений электронно-механического датчика в акустике было использование его в качестве звукописателя¹ для целей воспроизведения механической звукозаписи¹⁵. Частотные характеристики такого звукописателя и его чувствительность оказались вполне достаточными для этой цели и фирмой RCA, в частности, при участии Олсона были разработаны несколько конструкций таких звукописателей. Такие приборы являются, по существу, анализаторами микрорельефа. Поэтому вполне естественным оказалось использование подобных датчиков в качестве датчиков приборов для контроля шероховатости поверхности^{7, 8}.

При анализе шероховатости поверхности обычно стараются не воспроизводить волн поверхности, обусловленных периодическими колебаниями в положении резца или другого обрабатывающего инструмента. Эти низкочастотные составляющие могут быть отфильтрованы при помощи электрических фильтров. Хорошие результаты, как показал Бидвелл, дает использование механических и особенно гидравлического фильтров⁷.

Возможность получения сигналов значительной интенсивности с электронно-механического датчика открывает перспективы использования устройства, аналогичного электронно-механическому звукописателю, в качестве генератора

электрических колебаний звуковых частот. Для этого игла звукоснимателя должна скользить по канавке синусоидальной формы, с этой целью может быть использован и обычный проигрыватель грампластинок, на который кладутся пластинки с синусоидальными дорожками различной длины волн. Такое устройство позволяет получать ряд фиксированных частот электрических колебаний. Для получения звукового генератора с непрерывным диапазоном получаемых частот оказывается целесообразным сохранить в качестве двигателя синхронный мотор¹, питаемый от сети переменного тока или от стабилизированного генератора низкой частоты, и использовать регулируемую передачу от мотора к вращаемой им пластинке.

Используя электронно-механические лампы достаточно большой чувствительности по мощности, нетрудно получить сигнал достаточно большой интенсивности, чтобы во многих случаях использовать его без предварительного усиления. Так, например, при помощи электронно-механического датчика чувствительностью около $10\,000\text{ в/см}$, не трудно получить амплитуду электрических колебаний около 25 в при амплитуде звукозаписи в 25 мкм . Специализированные же датчики позволяют снять с такого звукового генератора сигналы синусоидальной формы мощностью до 1 вт и даже более, без всякого усиления.

Можно также осуществить анализатор микрорельефа, используя для этой цели чрезвычайно легкий сейсмотрон, прикрепленный непосредственно к движущейся по поверхности игле. (Желательно, чтобы масса сейсмотрона была сравнима с массой иглы, на которой он крепится.) И здесь оказывается целесообразным использование гидравлического фильтра.

Кинематические системы электронно-механических датчиков акустической аппаратуры, предлагавшихся и разрабатывавшихся ранее, представляли собой обычно жесткий стержень, средняя часть которого укреплена на эластичной опоре (которой, в частности, служит мембрана). Один конец стержня подвергается воздействию контролируемой механической силы, а на втором конце стержня укреплен электрод механически управляемой электронной лампы.

Сравнительно недавно была показана возможность осуществления в механотронах иной кинематической системы, в которой стержень, конец которого подвергается воздействию в поперечном направлении, представляет собой полую металлическую трубку, закрепленную эластично на втором конце. Внутри трубки находится второй (неподвижный) электрод механотрона тлеющего разряда продольного управления. Его внутренний электрод покрыт на всем протяжении защитным слоем изолятора, кроме конца, обнаженного против боковой стенки трубки, выполняющей функции подвижного электрода газоразрядной лампы. Поперечные колебания трубки сопровождаются соответствующими колебаниями напряжения на лампе. При достаточной жесткости трубки такая система позволяет получить значительно более высокие резонансные частоты, а поэтому и значительно лучшие частотные характеристики электронно-механических датчиков.

В том случае, когда к свободному концу трубки прикрепляется игла, тогда получается датчик звукоснимателя или анализатора чистоты поверхности, а при осуществлении кинематической связи с мембраной получается датчик микрофона или манометра.

5. Гидромеханические приборы

Использование электронно-механических датчиков в экспериментальной технике исследования гидродинамических и аэродинамических процессов позволяет значительно улучшить важнейшие параметры измерительной и регистрирующей аппаратуры, а также осуществить ряд новых приборов, изготовление которых на основе использования других типов датчиков оказывается подчас весьма затруднительным.

В первую очередь здесь следует отметить устройства для измерения скорости и регистрации пульсаций скорости потоков жидкостей и газов. Схема такого датчика, основанного на принципе гидравлического маятника, показана на рис. 8, а. Датчик скорости потока состоит из электронно-механического датчика 1, на подвижном стержне 2 которого укреплен пластина 3, располагаемая внутри потока перпендикулярно к направлению течения. Давление струи на пластинку заставляет ее отклоняться на угол, пропорциональный скорости потока. Весь датчик, кроме пластинки 3, закрыт обтекаемым корпусом, вносящим минимальные искажения в контролируемый поток.

Для того чтобы иметь возможность регистрировать пульсации скорости потока, оказывается целесообразным снизить массу тела 3 до минимума. Бречер и Праглин³⁰ пользовались в качестве тела 3, воспринимающего давление потока, тонкой проволокой, укрепленной на подвижном стержне вибротрона RCA-5734. Схема датчика, разработанного ими для контроля пульсаций скорости крови в артерии и в вене, показана на рис. 8, б. Здесь 1 — трубка, в которой течет контролируемый поток, 2 — лампа RCA-5734, 3 — подвижной стержень лампы, на котором укреплен проволока 4, погруженная в контролируемый поток. Собственная частота подвижной системы датчика оказалась около 500 гц. Использование электронно-механического датчика позволило реализовать еще ряд конструкций подобных приборов^{33, 34}.

Некоторый интерес представляет также возможность использования для измерения скорости течения описанного выше датчика, выполненного в виде эластично закрепленной на одном конце трубки с неподвижным внутренним электродом. Угол наклона трубки, а следовательно, и сигнал датчика однозначно зависят от скорости потока. Динамические характеристики такого датчика могут оказаться лучшими, чем у датчика, осуществленного на основе использования вибротрона^{30, 33}.

Для целей регистрации динамических давлений в потоке жидкости и гидравлических ударов (например, ударных нагрузок при ударах волн о поверхности инженерных сооружений) оказывается целесообразным использование датчиков с прогибающейся мембраной, например типа, изображенного на рис. 1, 2. Возможность использования мембран, имеющих достаточно высокую резонансную частоту, позволяет применять такие датчики для изучения весьма быстротечных процессов в жидких и газообразных средах. Например, оказывается возможным использовать такие датчики для изучения детонации в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания.

К числу задач, в которых использование электронно-механических датчиков дает существенные результаты, следует отнести и электронно-механические манометры дифференциального типа, в которых прогиб мембраны фиксируется электронно-механическим датчиком.

III. ИЗМЕРИТЕЛИ НЕМЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Термические приборы

Использование электронно-механических датчиков в термометрической аппаратуре основано на преобразовании термических деформаций воспринимающей контролируемой величины в перемещения подвижного электрода механотрона. Весьма высокая чувствительность электронно-механических датчиков к перемещениям подвижного электрода позволяет осуществлять высокочувствительные

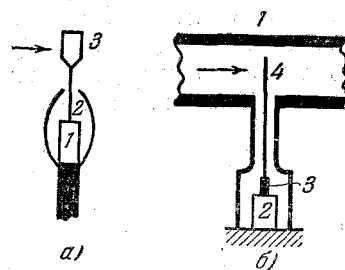


Рис. 8

термометрические приборы, могущие быть использованными как в качестве датчиков температуры, так и датчиков ряда других величин, значения которых могут быть преобразованы в соответствующие изменения температуры.

Опишем в первую очередь некоторые типы электронно-механических термометров, а затем покажем некоторые способы использования подобных устройств в качестве существенных элементов иной нетермометрической аппаратуры.

На рис. 9, а показана схема электронно-механического термометра с волоочным воспринимателем, образованным двумя проволоками из различных металлов (например, бронзовой 1 и вольфрамовой 2). Первая из них соединяет натяжную пружину 3 с подвижным стержнем 4 электронно-механического датчика малых перемещений 5, а вторая — натяжную пружину с корпусом датчика. Такая кинематическая схема обеспечивает реакцию прибора только

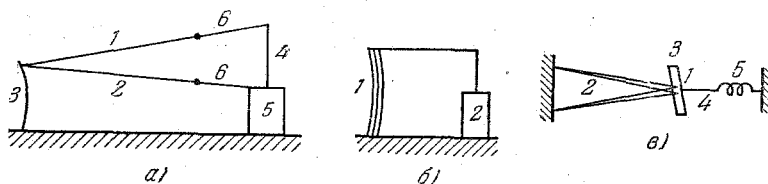


Рис. 9.

на изменение разности длин проволок, обусловленное изменением температуры воздуха, исключая при этом влияние на показания устройства термических деформаций каркаса прибора. Участки 6 проволок, находящиеся в непосредственной близости от датчика, желательно делать из одного металла для снижения влияния повышенной температуры электронной лампы на показания термометра.

Полагая длины проволок 1 и 2 при 0°C равными L_0 и обозначая их термические коэффициенты расширения через α_1 и α_2 , получаем выражения для чувствительности электронно-механического датчика температуры по напряжению

$$v_t = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot L_0 \cdot \varphi \quad (16)$$

и по току

$$i_t = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot L_0 \cdot \psi. \quad (17)$$

Задаваясь для примера значениями $\alpha_2 - \alpha_1 = 10^{-5} \text{ см/град}$, $L_0 = 10 \text{ см}$, $\varphi = 10\,000 \text{ в/см}$, $\psi = 1 \text{ а/см}$, получаем значения $v_t = 1 \text{ в/град}$, $i_t = 10^{-4} \text{ а/град}$.

Если в качестве воспринимателя температуры используется тело, позволяющее получать значительно большие деформации на градус, чем прямая проволока, то оказывается возможным осуществить и более чувствительные по току и по напряжению датчики термометрических устройств. В частности, для этой цели оказывается удобным применение биметаллических пластинок. На рис. 9, б показана схема такого устройства, в котором один конец биметаллической пластинки 1 прикреплен к каркасу датчика температуры, а свободный конец этой пластинки сочленен с подвижным электродом механически управляемой электронной лампы 2, контролирующей перемещение свободного конца биметаллической пластинки. Изменение температуры сопровождается соответствующим изменением анодного тока электронно-механического датчика.

Высокая чувствительность электронно-механических датчиков температуры позволяет, с одной стороны, использовать стрелочные гальванометры для непосредственного отсчета небольших изменений температуры и, с другой стороны, легко осуществить высокочувствительные терморегуляторы и регистраторы температуры без значительного усиления сигнала датчика, а иногда и совсем

без его усиления. В частности, это оказывается удобным при использовании термических интегральных датчиков света для спектроскопических исследований. Позднее мы коснемся принципов осуществления подобных датчиков на основе использования механотронов.

При выборе наиболее подходящего механотрона для электронно-механического термометра следует остановиться на лампах, сочетающих максимальную чувствительность с минимальной мощностью, рассеиваемой при работе, для того, чтобы обеспечить минимальные влияния тепла, выделяемого лампой, на показания термометра. Поэтому для указанной цели оказываются особенно удобными газоразрядные датчики малых перемещений с холодным катодом, которые могут включаться только на время отсчета контролируемой температуры.

Помимо описанных выше электронно-механических термометров внешнего управления, оказывается целесообразным использование и электронно-механических термометров внутреннего управления. Покажем принцип осуществления одного из подобных датчиков (см. рис. 9, в). Здесь подвижный стержень 1 механически управляемой электронной лампы укреплен на крутильном двухпетлевом подвесе 2. Петли подвеса выполнены из материалов, имеющих существенно различные термические коэффициенты линейного расширения. На стержне 1 укреплен подвижный электрод 3, управляющий анодным током лампы. При изменении температуры лампы обе петли деформируются по-разному и стержень 1 поворачивается на угол, пропорциональный изменению контролируемой температуры. Подвес укреплен в каркасе, смонтированном внутри электронной лампы, и растягивается нитью 4 при помощи пружинки 5. Нетрудно показать, что электронно-механический термометр такого типа обладает намного большей чувствительностью по сравнению с описанными выше типами электронно-механических термометров внешнего управления. Использование описанной схемы оказывается особенно интересным при осуществлении некоторых типов термопреобразователей.

Во многих видах экспериментальной и промышленной аппаратуры термометрические элементы применяются как вспомогательные устройства, используемые для преобразования контролируемой величины в электрические сигналы, удобные для измерения или регистрации. При этом в ряде случаев оказывается целесообразным использование электронно-механических преобразователей. Покажем это на нескольких типичных примерах.

Одним из наиболее перспективных применений подобных устройств является осуществление термопреобразователей для целей измерения высокочастотных токов. Направляя измеряемый ток в одну из двух проволочек 1 или 2 схемы, приведенной на рис. 9, а, мы получаем возможность снять с электронно-механического датчика 5 сигнал, пропорциональный мощности, выделяемой током. Подобное устройство может иметь во много раз большую чувствительность по сравнению с аналогичными устройствами на основе использования термо-сопротивлений и термопар.

Аналогичная кинематическая схема может быть осуществлена и внутри лампы, т. е. с датчиком внутреннего управления. Однако в этом случае целесообразнее прибегнуть к схеме, приведенной на рис. 9, в, и пропускать ток через одну из петель подвеса крутильных весов или по проволоке, к которой прикреплена одна из петель.

Устройство датчика, схема которого показана на рис. 9, а, может быть оформлено и так, что проволочки 1 и 2 изготавливаются из одного материала и имеют одинаковый диаметр. В таком оформлении устройство оказывается пригодным для измерения разности температур двух сред. Так, например, если одна из проволочек покрыта увлажненной материей, то мы получаем устройство для непосредственного отсчета психрометрической разности.

Пропуская по одинаковым проволочкам 1 и 2 последовательно один и тот же ток, мы получаем возможность использовать подобное устройство

в качестве датчика различной теплопроводности сред, в которых находятся обе проволоочки. Следовательно, подобное устройство пригодно для использования в качестве газоанализатора, у которого одна проволоочка находится в эталонной, а вторая проволоочка — в контролируемой среде. Подобное устройство может быть использовано и для непосредственного контроля дефицита влажности. Для этого одна из проволоочек находится в атмосфере насыщенного парами воды воздуха, а вторая — в контролируемой атмосфере, имеющей ту же температуру. Для непосредственного измерения абсолютной влажности при помощи подобного устройства следует одну проволоочку погрузить в осушенный воздух, а вторую проволоочку в контролируемую атмосферу той же температуры.

Наконец, возможно использование устройства по схеме 9, а с одинаковыми проволоочками 1 и 2 в режиме, при котором по обеим проволоочкам пропускается один и тот же постоянный ток, а по проволоке 1 еще и более слабый переменный ток сравнительно низкой частоты (порядка герца) или только переменный ток. Тогда вследствие периодического охлаждения проволоочки ее длина будет периодически изменяться, и в анодной цепи электронно-механического датчика будут наблюдаться пульсации анодного тока, глубина которых определяется теплопроводностью среды, зависящей от ее химического состава, скорости движения или давления газа. Следовательно, на подобном принципе возможно осуществление газоанализаторов, измерителей влажности воздуха, скорости движения газов и жидкостей, а также и некоторых иных параметров окружающей проволоочки среды.

2. Магнитные приборы

Действие многих магнитных измерительных приборов основано на измерении сил, обусловленных контролируруемыми магнитными явлениями. Обычно действующие силы измеряются при помощи механических или оптико-механических устройств непосредственного отсчета, являющихся большей частью простыми и надежными приборами. Использование электронно-механических датчиков этих сил оказывается во многих случаях более целесообразным с точки зрения повышения чувствительности и расширения диапазонов измерений.

Здесь следует в первую очередь отметить электронно-механический магнитометр внешнего и внутреннего управления. Схема электронно-механического магнитометра внешнего управления крайне проста. На подвижном стержне механотрона укрепляется прямой постоянный магнит. Под действием внешнего магнитного поля стержень испытывает тогда вращающий момент и угол наклона стержня регистрируется механотроном. В электронно-механическом магнитометре внутреннего управления прямой магнит укрепляется на подвесе и жестко соединяется с подвижным электродом механически управляемой электронной лампы. В обоих описанных выше типах электронно-механических магнитометров постоянный магнит может быть заменен катушкой, по которой пропускается постоянный ток.

Портативность таких датчиков позволяет производить непосредственные измерения напряженности магнитного поля и значений его составляющих в различных точках поля, с отсчетом измеряемых величин непосредственно по стрелочному гальванометру. Описанные электронно-механические магнитометры могут быть использованы в целях магнитной дефектоскопии.

Может быть целесообразным их использование и для определения силы, необходимой для отрыва магнетика от поверхности образца.

Такое устройство пригодно для использования в измерителях толщины лент из ферро-магнитных материалов, определения толщины защитных покрытий на стали и других ферро-магнитных материалах, а также определения толщины слоя никеля, покрывающего не ферро-магнитные материалы.

3. Электронно-механические усилители

Использование электромеханических преобразователей, трансформирующих электрический сигнал в механические пропорциональные усилия для последующего воздействия на кинематическую систему механотрона, открывает перспективу осуществления электронно-механических усилителей²⁷.

Для того чтобы получить значительное усиление, оправдывающее осуществление подобных усилительных устройств, необходимо использовать в них высокочувствительные электромеханические преобразователи, позволяющие эффективно преобразовать усиливаемый сигнал в перемещение подвижного электрода механотрона.

На рис. 10, а приведена схема электронно-механического усилителя с механотроном внешнего управления. Здесь усиливаемый сигнал подается в катушку электромагнита 1, якорь которого механически соединен с подвижным электродом 2 механически управляемой электронной лампы 3. Перемещение якоря под действием сигнала сопровождается соответствующим изменением анодного тока лампы, которое может быть больше первичного тока.

Использование такого усилителя может иметь смысл при усилении очень малых напряжений. Для этого оказывается целесообразным катушку электромагнита 1 делать возможно меньшего сопротивления. В таком усилительном устройстве можно получать довольно значительное усиление по напряжению.

Однако для целей физического эксперимента значительно больший интерес представляют электронно-механические усилители с механотронами внутреннего управления. Принципиальная схема такого усилителя показана на рис. 10, б. Здесь катушка 1 воздействует на один из прямых магнетиков 2 астатической магнитной системы 3, аналогичной электромагнитному гальванометру с вращающимися магнитами. К этой же астатической системе прикреплен подвижный электрод 4 механически управляемой электронной лампы 5.

Для грубой оценки коэффициента усиления по напряжению такой системы можно задаться условием, что подвесная система чувствительного электромагнитного гальванометра, аналогичная используемой в таком усилителе, имеет чувствительность около 10^{-6} вольта на деление шкалы, находящейся на расстоянии 1 метра от гальванометра. Это соответствует перемещению на 10 микрон конца подвижного электрода, находящегося на расстоянии 2 см от оси вращения подвеса. При чувствительности механотрона 10 000 в/см изменение напряжения, приложенного к катушке, на 10^{-6} в приводит к изменению напряжения на механотроне на 10 в, что дает коэффициент усиления по напряжению, равный 10^7 .

Аналогичное усилительное устройство может быть осуществлено и в том случае, если в качестве подвижной системы использована и вращающаяся рамка магнитно-электрического гальванометра.

4. Электронно-механические регуляторы

Возможность легкого регулирования внутреннего сопротивления механотронов в результате относительно небольшого перемещения подвижного электрода, требующего незначительного усиления, позволяет осуществлять

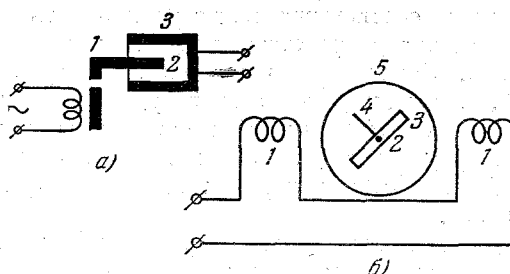


Рис. 10.

бесконтактные сопротивления, могущие рассеивать внутри себя сравнительно большие мощности и требующие для регулирования относительно небольших усилий.

Механически управляемые электронные лампы могут быть использованы в качестве реостатов цепей постоянного и переменного тока, что представляет существенный интерес для техники физического эксперимента. На рис. 11 приведены принципиальные схемы основных типов электронно-механических реостатов. На рис. 11, а показана схема диодного реостата продольного

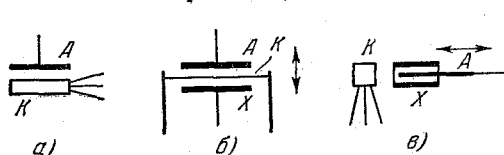


Рис. 11.

управления с плоскими параллельными электродами. Сопротивление такого реостата

$$R = \frac{a^2}{A \cdot S \cdot U_a^{0,5}}, \quad (18)$$

где a — расстояние между электродами лампы в см, $A = 2,33 \cdot 10^{-6}$,

S — активная поверхность горячего катода в см², U_a — напряжение на реостате. Из этого соотношения видна возможность получения тысячекратного изменения сопротивления реостата при изменении зазора в диапазоне от 0,1 мм до 3 мм. Сокращение поперечных размеров электродов этого диода до значений, меньших максимального удаления электродов, позволяет еще в большей степени повысить диапазон относительных изменений сопротивления реостата. Примером такого решения может быть диод с подогревным катодом шириной около 1 мм, в котором электроды могут удаляться на расстояние 3—4 мм и более.

Значительный диапазон изменения сопротивления позволяет получить электронный реостат зондового управления, схема которого приведена на рис. 11, б. Здесь A — анод, X — холодный катод и K — горячий катод. Перемещение последнего в направлении, показанном стрелкой, сопровождается весьма быстрыми изменениями сопротивления реостата.

На рис. 11, в приведена схема реостата дифференциального управления. Здесь A — анод, X — холодный катод, K — горячий катод. Перемещение анода A в щели холодного катода в направлении, показанном стрелкой, сопровождается быстрыми изменениями сопротивления реостата. Реостаты дифференциального управления позволяют получить изменение сопротивления реостата до 5—6 порядков при перемещениях подвижного электрода на несколько миллиметров. Возможность легкого изменения сопротивления в чрезвычайно широких пределах представляет определенный интерес для некоторых задач экспериментальной техники.

Относительно небольшие усилия, которые оказываются необходимыми для перемещения подвижного электрода регулятора, позволяют использовать подобные реостаты для целей автоматического регулирования отдельных цепей электронной аппаратуры. В частности, такие реостаты могут быть использованы и для целей автоматической стабилизации напряжения или тока источников тока, используемых в отдельных экспериментальных установках.

Электронные реостаты описанного выше типа обладают односторонней проводимостью. Это позволяет использовать их в качестве механически регулируемых вентилей, что позволяет очень просто осуществить автоматическую стабилизацию напряжения или снимаемого тока выпрямителей.

Для целей регулирования цепей переменного тока могут быть использованы электронные реостаты двусторонней проводимости. Типичным примером такого реостата является диод с двумя плоскими параллельными подогревными катодами, один из которых неподвижный, а второй подвижный.

В заключение изложенные выше сведения об электронно-механических преобразователях следует дополнить информацией об электронно-механических реле. Реле такого типа представляют собой электронно-механические преобразователи с фиксированным перемещением подвижного электрода и позволяют получать электрический сигнал фиксированного значения, если воздействие на электронно-механическую лампу превышает заданное значение. Так, например, применяя ограничители перемещений подвижного элемента электронного микрометра, мы получаем реле линейных размеров. Используя ограничители перемещений подвижного элемента акселетрона, получаем реле ускорения. Используя ограничители перемещений подвижного элемента электронно-механического термометра, мы получаем реле температуры. Ограничивая же перемещения в электронно-механическом усилителе, мы получаем электронно-механическое реле, позволяющее получать весьма значительное усиление по напряжению и по току электрических импульсов.

Можно полагать, что отдельные типы электронно-механических реле различных физических величин имеют перспективы применения в технике физического эксперимента и в ряде прикладных задач.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Гончарский, Успехи физических наук **55**, 81 (1955).
2. E. G. Hopkins, Journ. Inst. Electr. Eng. **3**, март, 77 (1954).
3. V. Zeluff, Electronics **24**, № 2, 120 (1951).
4. S. Levy, Exp. Stress. Analysis **9**, № 2, 151 (1952).
5. Л. А. Гончарский, Труды секции прикладной электроники ВНИТО, № 1 (1954).
6. L. A. Vallet, Electronique, № 88, 12 (1954).
7. J. B. Bidwell, Electronics **26**, № 11, 68 (1953).
8. W. A. Wildback, Rev. Scien. Instr. **25**, № 1, 102 (1954).
9. M. Ainsworth, Journ. Scien. Instr. **31**, 12, 471 (1954).
10. Л. А. Гончарский, Электронные датчики механических величин, Сб. «Прикладная электроника», изд. ВСНИТО, Москва, 1953.
11. Л. А. Гончарский, Журнал технической физики **24**, 1741 (1954).
12. Л. А. Гончарский, Измерительная техника, № 3, 64 (1955).
13. R. Gunn, Journ. of Appl. Mech. **7**, № 2, 49 (1940).
14. М. Т. Грехова и Р. П. Васильев, Заводская лаборатория **12**, 882 (1946).
15. H. Olson, Journ. of Acoust. Soc. of Am. **19**, № 2, 307 (1947).
16. L. A. Vallet, Electronique, № 89 (1954).
17. W. Ramberg, Journ. of Res. Nat. Bur. of Stand. **37**, № 6, 391 (1946).
18. S. Levy, E. V. Hobbs, W. O. Kroil, L. Mordfin, Journ. of Research. Nat. Bur. of Stand. **50**, № 2, 71 (1953).
19. J. R. Stovall, Electr. Manufact. **48**, July, 102 (1951).
20. С. В. Птицын, Физические явления в оксидном катоде, Гостехиздат, М. — Л., 1949.
21. Г. А. Тягунов и И. В. Юдинская, Термоэлектронные катоды электровакуумных приборов, Сб. «Успехи электровакуумной техники», Госэнергоиздат, М. — Л., 1956.
22. Н. Кузуноза, Расчеты электронных ламп и проектирование триодов, Госэнергоиздат, М. — Л., 1934.
23. Tele-Tech. **13**, № 11, 67 (1954).
24. H. Bärnheim, VDI Zeitsch. **92**, № 23, 650 (1950).
25. K. Kretzmann, Funk-technik, № 8, 217 (1951).
26. Hübner, Funk-technik **10**, № 7, 186 (1955).

27. Л. А. Гончарский, Электронная лампа с механическим управлением, Госэнергоиздат, М. — Л., 1956.
28. А. А. Байков и Л. А. Гончарский, Измеритель давлений, Приборостроение, № 4 (1956).
29. Journal of Acoust. Soc. of Am. 26, № 6, 1080 (1954).
30. G. A. Brecher a. J. Praglin, Proc. Soc. Exp. Biol. a. Med. 83, № 1, 155 (1953).
31. J. H. Green, Journ. Physiol. (London) 125, № 1, 4 (1954).
32. P. Bättig a. K. Bücher, Helv. Physiol. et Pharm. Acta 12, № 12, 50 (1954).
33. A. Scher, T. Weigert a. A. Joung, Science 118, № 3055, 82 (1953).
34. A. Müller, Helv. Physiol. et Pharm. Acta 12, 300 (1954).
35. Г. М. Жданов, Телеизмерение, Госэнергоиздат, М. — Л., 1952.