

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОМЕТР*)**

Если не считать некоторых детекторов специального типа, применяемых при работе с ионными пучками, то для измерения очень малых токов или малых зарядов в настоящее время употребляются электрометры двух типов — механические и ламповые. К достоинствам механических электрометров следует отнести высокую стабильность, малую подверженность влиянию внешних полей, непревзойденную чувствительность (например, у электрометра Гофмана). Их недостатки — сложность и необходимость в стационарной установке с целью обеспечения прибору полного механического покоя. Ламповые электрометры, в противоположность этому, представляют собой приборы, механически достаточно „грубые“.

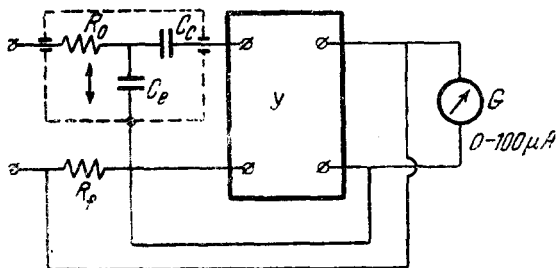
Специфические недостатки их как при работе на специальных лампах, так, в большей степени, и при применении обычных ламп в „электрометрическом“ режиме, заключаются в неустойчивости нуля и в сильной подверженности влиянию внешних электромагнитных полей.

Неустойчивость нуля является наиболее неприятным фактом, весьма затрудняющим работу с прибором. Если в механическом электрометре, где это явление, конечно, тоже имеет место, за смещение нуля ответственные, в основном, два фактора — изменение со временем контактной разности потенциалов и наличие неупругих натяжений в подвесе, то в ламповом электрометре таких факторов несравненно больше. Помимо неустойчивости источников питания, это, главным образом, сеточные токи различного происхождения¹, непостоянство эмиссии катода, а также влияние изменения контактных потенциалов. Сползание нуля делает работу ламповых электрометров недостаточно устойчивой ещё задолго до достижения ими уровня флуктуационных шумов.

Был предложен третий тип электрометров — так называемые „динамические конденсаторные электрометры“, которые, используя преимущества лампового усиления слабых токов, вместе с тем не имеют основных недостатков обычных ламповых электрометров. Известно всего несколько попыток построить такой прибор; две из них относятся к 1932 г., и одна — к 1941 г.² Эти модели, однако, были выполнены недостаточно совершенно и далеко не реализовали возможностей приборов такого типа. Поэтому представляет интерес описание двух новых конструкций „динамического электрометра“, содержащиеся в реферируемых статьях. Принцип действия „динамического конденсаторного электрометра“, общая схема которого приведена на рисунке, состоит в том, что измеряемый постоянный или медленно меняющийся заряд, подводимый к прибору, преобразуется в переменную эдс с помощью конденсатора C_e с периодически меняющейся ёмкостью. Всё усиление происходит дальше, как усиление переменных

*) H. Palevsky, R. Swank and R. Grenchik, R.S.I. 18, 298 (1947); S. Scherbatskoy, T. Gilmartin and G. Swift, R.S.I. 18, 415 (1947).

токов. Этим обеспечивается: 1) исключение влияния на устойчивость нуля всех факторов, связанных с источниками питания и лампами; 2) высокая стабильность коэффициента усиления ламповой схемы; 3) снижение уровня флуктуационных шумов за счёт существенного сужения пропускаемой полосы частот и выбора наиболее благоприятной рабочей частоты; 4) обеспечение высокого активного входного сопротивления прибора без применения специальных электрометрических ламп; 5) ослабление требований к экранировке, которые здесь не выходят за рамки требований к экранировке нормального усилителя низкой частоты; в частности, отпадает необходимость специальной экранировки батарей питания, что является обязательным при обычной схеме лампового электрометра; 6) благодаря последнему обстоятельству увеличивается портативность прибора и достигается значительно большая гибкость конструкции; 7) наконец, прибор становится значительно менее чувствительным к механическим сотрясениям, в частности вследствие ослабления влияния микрофонного эффекта ламп.



Наиболее важной деталью прибора является „динамический конденсатор“ с периодически меняющейся ёмкостью. В одной из упомянутых ранних работ он выполнялся в виде цилиндрического конденсатора с вращаемым электромотором ротором. Более простым и целесообразным является вибрационный тип динамического конденсатора, при котором подвижная обкладка колеблется относительно неподвижной обкладки с частотой, равной её собственной частоте. Колебания возбуждаются электромагнитом, питаемым от сети переменного тока или от специального лампового генератора требуемой частоты. Выполняется подвижная обкладка либо в виде стального язычка, либо — в наиболее портативной модели — в виде круглой тонкой стальной диафрагмы (диаметр 50 мм, толщина 0,18 мм). От качества динамического конденсатора зависят основные свойства прибора — стабильность и, в значительной степени, чувствительность.

Чувствительность определяется отношением сигнала к шуму на выходе прибора. Отвлекаясь от некоторых дополнительных причин шума, как микрофонный эффект, чувствительность лампового электрометра надо считать ограниченной уровнем флуктуационных шумов — термическими флуктуациями на входе и дробовым эффектом в первой усилительной лампе. При достаточно высокой рабочей частоте динамического электрометра (частоте вибраций конденсатора) и достаточно большой постоянной времени доля шума за счёт дробового эффекта может быть сделана малой сравнительно с тепловыми флуктуациями. При этом допустимый сеточный ток первой лампы может быть на три порядка выше максимального сеточного тока, допустимого для электрометрических ламп (10^{-12} а вместо 10^{-15} а). Предел чувствительности электрометра, обусловленный только термическими флуктуациями, определяется при этом известным выражением:

$$Q_0 = \sqrt{u i C_e} = 450 e \cdot \sqrt{C_e}$$

где e — заряд электрона, C_e — средняя ёмкость динамического конденсатора в пФ, а полоса пропускания усилителя принимается равной бесконечности. Наименьшая ёмкость C_e в одном из описываемых приборов равнялась

25 μF , что даёт для Q_0 величину $2250 e$ или $3,6 \cdot 10^{-16}$ кулона. Это соответствует чувствительности электрометра Гофмана (см., например³). В действительности, такая чувствительность не была достигнута ни в одном из изготовленных экземпляров электрометра. При конструировании, по словам авторов, преследовалась цель не столько получения рекордных параметров, сколько создания достаточно чувствительных, но в то же время простых и не слишком „нежных“ приборов. В результате, описанные в статьях электрометры имели средний уровень шумов порядка 50 μV , или $Q_0 \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-15}$ кулона. Постоянная времени составляла от 0,2 до 5 секунд.

Следующей весьма важной характеристикой электрометра является стабильность нуля. Прибор может обладать очень высокой чувствительностью, но если во время измерения нуль у него не стоит на месте, эта чувствительность не может быть использована.

У электрометра описываемого типа главным источником нестабильности нуля является контактная разность потенциалов входа. В случае, если бы эта величина оставалась постоянной, она давала бы некоторый нулевой заряд на обкладках динамического конденсатора. Поэтому всякие изменения в величине контактной разности влекут за собой „дрейф“ нуля при замкнутом входе. При разомкнутом входе дополнительный источник дрейфа возникает за счёт ионизации воздуха в пространстве между обкладками (причина — проникающие излучения или случайные радиоактивные загрязнения в материале конденсатора). Поле контактной разности потенциалов осаждает ионы на обкладки конденсатора, вызывая ток между ними. Наконец, механические или электрические остаточные напряжения в изоляторах также могут служить источником малых токов, вызывающих смещение нуля. Конструкция и технология динамического конденсатора были тщательно разработаны с точки зрения борьбы со всеми этими причинами. Величина и стабильность контактной разности потенциалов сильно зависит от состояния контактирующих поверхностей. Недопустимы механические повреждения поверхности, царапины или шероховатости на ней. Как указывают авторы, влияние подобных факторов, например, маленьких островков загрязнения на уже очищенной поверхности конденсатора приводит к искажению формы волны генерируемой эдс, к появлению на ней пиков. Обработка рабочих поверхностей динамического конденсатора велась следующим образом: после полировки до степени зеркального блеска и промывания спиртом стальные обкладки немедленно погружались в электролитическую ванну и на них двухкратным осаждением наносился слой золота толщиной 0,025–0,050 мм. После промывания и просушки наносился второй слой золота катодным распылением. Возможно быстрее после этого обе обкладки конденсатора монтировались на своё место в установке, причём для предупреждения окисления и случайного оседания пыли монтаж вёлся в струе азота. После окончания сборки из герметического кожуха, куда помещён конденсатор, откачивался воздух и пространство наполнялось аргоном при атмосферном давлении. Стенки кожуха и все находящиеся внутри него металлические детали также тщательно очищались, и в некоторых случаях — золотились.

В результате этой процедуры контактную разность потенциалов между обкладками удавалось снизить до величины, не превышающей 20 милливольт. Постоянная величина этой разности устанавливалась не сразу, и её „дрейф“ через одну неделю после сборки конденсатора ещё составлял 0,1 милливольт в сутки.

Остальная часть схемы динамического электрометра состоит из усилителя низкой частоты (на рисунке обозначен, как У), генератора колебаний, питающего электромагнит (если не используется непосредственно сеть), и детектора с тем или иным индикатором на выходе. Характерной особенностью приводимых в реферируемых статьях конструкций является исполь-

зование в усилителях большого коэффициента отрицательной обратной связи по напряжению. Как известно, это делает усилитель нечувствительным ни к значительным изменениям в эдс источников питания, ни к смене ламп и, таким образом, оба эти фактора перестают влиять на чувствительность и стабильность динамического электрометра.

Для того чтобы электрометр давал не только величину, но и знак измеряемого заряда, на выходе усилителя низкой частоты ставится полярный детектор. В наиболее портативной модели, где в качестве индикатора используется микроамперметр, полярным детектором служит лампа-пентагрид, на одну из управляющих сеток которой подаётся усиленная эдс „сигнала“, на другую — колебание от генератора, питающего электромагнит, и таким образом учитывается фаза эдс сигнала. В некоторых моделях на выходе ставится непосредственно пишущий прибор. В этом случае в качестве полярного детектора применяется двухфазный сельсин-мотор. На рисунке схематически показана модель первого типа. R_f — сопротивление обратной связи, C_c — разделительный конденсатор и R_0 — развязывающее сопротивление, необходимое для того, чтобы при присоединённом источнике заряд на динамическом конденсаторе не изменялся при колебаниях ёмкости. C_c и R_0 замонтированы в кожухе динамического конденсатора.

Электрометры рассматриваемого типа нашли применение при работе с ионизационными камерами. В частности, они применялись для измерения радиоактивности горных пород непосредственно в буровых скважинах⁴. Электрометр с камерой может быть опущен в скважину на большую глубину, а на поверхности земли ведётся непрерывная автоматическая регистрация.

Нам кажется, что идея „динамического конденсаторного электрометра“ заслуживает всяческого внимания.

Б. Багаряцкий

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Царёв, УФН, **35**, вып. 2, стр. 251 (1948).
2. R. Gunn, Phys. Rev., **40**, 307 (1932); Kirkpatrick, RSI, **3**, 430 (1932); H. Le Caine and J. Waghorne, Can. J. Research, **19**, 21 (1941).
3. B. Zipprich, Phys. Zeits., **37**, 36 (1936).
4. Scherbatskoy and Fearon, Phys. Rev., **70**, 90 (1946).