

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Г. И. Берлеев

ВВЕДЕНИЕ

Усилители постоянного тока представляют собой электронные устройства, которые в соединении с гальванометром или другим электроизмерительным прибором позволяют измерять многие из основных электрических величин с высокой степенью точности. В силу этого разработка их имеет большое значение для дальнейшего развития ряда отраслей науки.

Современные усилители позволяют измерять постоянные токи до 10^{-18} а, т. е. меньше тех предельных токов, которые доступны измерению классическими методами; они позволяют измерять разности потенциалов при сколь угодно большом внутреннем сопротивлении источника, до 10^{-6} в, а также большие сопротивления, ёмкости, диэлектрические постоянные и др.

Классические методы измерения основных электрических величин с помощью гальванометров или электрометров ограничены или недостаточной чувствительностью или крайним неудобством в работе.

По современным данным наибольшая чувствительность к току достигнута в гальванометрах магнитоэлектрической системы и составляет 10^6 мм/мкА, что при большом внутреннем сопротивлении источника позволяет измерять токи до 10^{-11} а при удалении шкалы от зеркала гальванометра на один метр. Наряду с высокой чувствительностью такие приборы имеют очень большой период колебаний (~ 40 сек.). Если учесть, что для получения установившегося отклонения требуется времени не менее $1,36 T_0$ при наивыгоднейшем коэффициенте успокоения, то станут очевидными все неудобства в работе с ними (T_0 — период колебаний гальванометра). Таким образом преимущества в чувствительности достигаются ценой увеличения инертности подвижной системы.

Трудности создания высокочувствительных гальванометров возникают как по техническим причинам, так и по причинам ограниченности метода.

Известно, что угол установившегося отклонения рамки в магнитоэлектрических гальванометрах равен

$$\varphi = \frac{HS}{D} I,$$

где φ — угол поворота в радианах, H — плотность магнитного потока через площадь контура S , HS — полный поток сцепления в максвеллах, I — ток в цепи гальванометра в абсолютных электромагнитных единицах, D — удельный момент закручивания подвеса в *динах·см/радиан*.

В этой формуле $\frac{HS}{D} = \alpha$ есть чувствительность гальванометра к току.

Из этого выражения следует, что чувствительность пропорциональна магнитному потоку через контур рамки и обратно пропорциональна удельному моменту закручивания. Казалось бы, что при беспредельном увеличении магнитного потока и уменьшении удельного момента закручивания подвеса можно сколь угодно повышать чувствительность, но этот приём применим не в очень широких пределах. Во-первых, применению сильных полей препятствуют конструктивные трудности и, во-вторых, чем сильнее поле, тем медленнее катушка приходит в новое установившееся положение. При значительном увеличении поля, вследствие электромагнитного торможения, время отклонения рамки становится столь большим, что работать на таком приборе становится невозможно^{1, 2}.

Некоторое расширение пределов измерения основных электрических величин достигается применением электрометров. Среди множества систем электрометров наибольшей чувствительностью обладает вакуумный дуантный электрометр Гофмана³. Малая распространённость таких электрометров обусловлена трудностью юстировки, отсутствием резкости световой марки и чрезвычайной дороговизной.

Все остальные типы электрометров обладают меньшей чувствительностью и потому не могут удовлетворить всё возрастающие потребности в измерении сверхслабых токов.

Острота положения разрешается применением усилителей постоянного тока. По своим свойствам они вполне могут заменить как самые чувствительные электрометры, так и высокочувствительные гальванометры. Целесообразность внедрения усилителей постоянного тока в практику научно-исследовательских учреждений и в промышленность обусловлена не только тем, что они позволяют производить измерения малых токов с высокой степенью точности, но также и потому, что этот прибор при массовом изготовлении является весьма недорогим, значительно более дешёвым, чем электрометры.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСИЛИТЕЛЯ И ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛАМПЫ

1. Типы усилительных схем

Различные схемы усилителей постоянного тока описаны в ряде работ^{4, 5, 6, 7, 8, 9} и др. Эти схемы изображены на рис. 1. Кроме приведённых здесь схем, имеются и другие, которые представляют собой некоторые несущественные их видоизменения. Приведённые здесь схемы рассчитаны на работу с четырёхэлектродной электрометрической лампой. Исключение составляют схемы, изображённые на рис. 1, а и 1, б, в которых цепь катодной сетки может быть исключена, и тогда они допускают использование в них трёхэлектродных электрометрических ламп. В этом случае получается схема, показанная на рис. 1, з.

Приведённые здесь усилительные схемы не являются самыми ранними, они возникли после значительного ряда работ, посвящённых исследованию свойств усилителей и условий их стабилизации.

Вначале развивались компенсационные двухламповые усилители постоянного тока. Примером может служить схема, изображённая на рис. 2 и описанная в работах^{7, 8}. Этот вид усилителей страдает весьма крупными недостатками. По первоначальной идее нестабильность, возникающая одновременно в обоих плечах моста, автоматически гасится. В действительности дело обстоит гораздо сложнее. Для того чтобы возникшая нестабильность гасилась, нужно, чтобы лампы, работающие в паре, обладали свойствами, одинаковыми или очень близкими друг к другу. Однако это необходимое условие ещё недостаточно. Нужно чтобы изменения параметров этих ламп, главным образом эмиссии катода, были бы одинаковыми или очень близкими. В противном случае схема трудно балансируется и очень быстро теряет стабильность. В обход этих весьма больших трудностей в последнее время стали создаваться двойные лампы^{9, 10}.

Характерной особенностью этих ламп является общий прямонакальный катод. Это обстоятельство замечательно тем, что изменение тока эмиссии, связанное со старением лампы или с уменьшением тока накала, вызывает одинаковое изменение в компенсационных плечах, и поэтому состояние стабильности схемы не меняется. Такие схемы обладают рядом преимуществ.

2. Принцип действия усилителя

Схемы усилителей постоянного тока, изображённые на рис. 1, представляют собой разновидности мостика Уитстона. Для примера рассмотрим схему, показанную на рис. 1, б. В ней плечами моста являются:

1. Сопротивление между катодной сеткой и анодом электрометрической лампы.

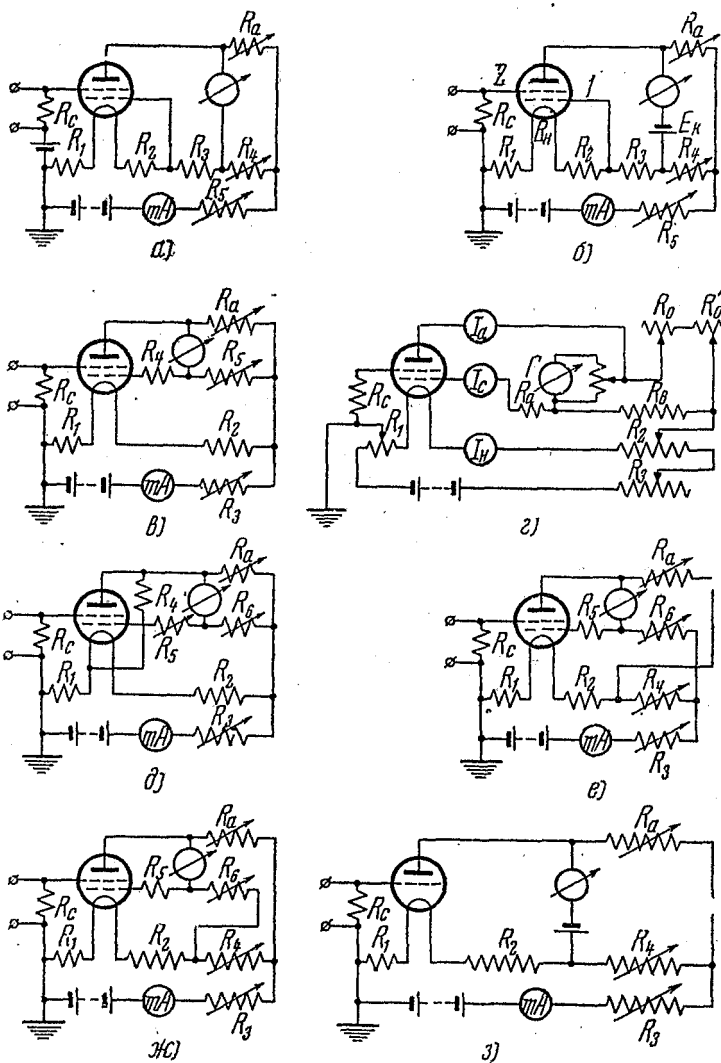


Рис. 1.

2. Суммарное сопротивление, состоящее из нити накала R_H , R_2 и R_3 .
3. Сопротивление R_4 .
4. Сопротивление R_a .

Если схема сбалансирована, то в цепи гальванометра никакого тока нет. Однако если на вход лампы подать некоторое напряжение, то величина анодного тока изменится и вся система выйдет из состояния равновесия. В диагонали моста появится ток, пропорциональный сеточному смещению.

Пусть сеточный потенциал U_c изменится на ΔU_c , тогда изменение анодного тока можно записать следующим образом:

$$\Delta I_a = \Delta U_c \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = \Delta U_c S. \quad (1,1)$$

Здесь $\left(\frac{\partial I_a}{\partial U_c}\right)_{U_a} = S$ есть крутизна характеристики лампы.

Изменение сеточного потенциала можно выразить через изменение сеточного тока

$$\Delta U_c = R_c \Delta I_c, \quad (1,2)$$

где R_c — сопротивление в цепи сетки лампы и ΔI_c — изменение сеточного тока.

После подстановки (1,2) в (1,1) изменение анодного тока можно записать следующим образом:

$$\Delta I_a = R_c \Delta I_c S. \quad (1,3)$$

ΔI_c в выражении (1,3) есть измеряемый ток, величина которого в случае работы на схеме, изображённой на рис. 1, б, может колебаться от 10^{-12} до 10^{-16} а. Например, если крутизна характеристики лампы достигает 130 мкА/В , то для того чтобы вышеуказанные значения ΔI_c могли быть измерены с помощью зеркального гальванометра с постоянной 10^{-9} а/мм , нужно, чтобы сеточное сопротивление R_c имело значение порядка $10^{10} \div 10^{11} \text{ ом}$.

При измерении столь малых токов обязательным условием является стабильность схемы, для достижения которой необходим определённый подбор элементов схемы и режима питания усилителя.

Исследования по этому вопросу изложены в работах ^{11, 12, 13, 14}.

Исходя из выражения (1,3), получаем коэффициент усиления тока, равный

$$K = \frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = R_c S. \quad (1,4)$$

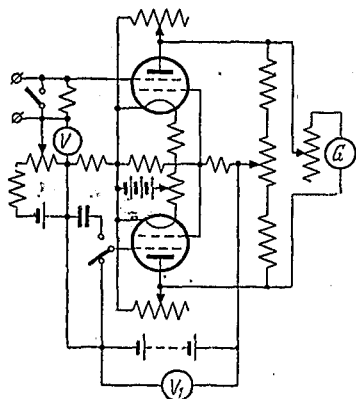


Рис. 2.

Из выражения (1,4) следует, что коэффициент усиления тока зависит от величины сеточного сопротивления и крутизны характеристики лампы. Таким образом, для получения надёжных измерений необходимо обеспечить стабильность сеточного сопротивления и крутизны характеристики лампы. Стабильность R_c зависит от величины температурного коэффициента сопротивления α и от постоянства температуры в процессе измерения:

$$dR_c = \alpha R_c dT. \quad (1,5)$$

Здесь R_{c_0} — величина сопротивления R_c при 0°C , dT — изменение температуры.

Но более существенной причиной нестабильности усилителей является изменение крутизны характеристики лампы S за счёт изменения питающих напряжений.

Действительно, крутизна характеристики есть функция напряжений накала, анода и сетки:

$$S = \varphi(U_n, U_a, U_c). \quad (1,6)$$

Отсюда полный дифференциал функции S

$$dS = \frac{\partial S}{\partial U_n} dU_n + \frac{\partial S}{\partial U_a} dU_a + \frac{\partial S}{\partial U_c} dU_c. \quad (1,7)$$

Производя совместные преобразования (1,6) и (1,7) и вводя численные значения величин, найденных экспериментально, находим¹¹, что

$$\frac{dS}{S} = 10 \frac{dU_n}{U_n} - \frac{D dU_a}{DU_a + U_c} - \frac{dU_c}{DU_a + U_c}. \quad (1,8)$$

Здесь D — проницаемость лампы. Для электрометрических ламп D — близко к единице. Анализируя (1,8), нетрудно увидеть, что главное влияние на изменение крутизны характеристики оказывает изменение напряжения накала, поэтому должно быть уделено особое внимание качеству источников питания. Этот факт отмечается в ряде работ^{12, 13}.

3. Типы электрометрических ламп

Электрометрические лампы отличаются от других электронных ламп тем, что их сеточный ток очень мал и колеблется около 10^{-15} а.

Большинство выпускаемых электрометрических ламп — четырёх-электродные, обладающие двумя сетками. Первая сетка называется катодной или сеткой пространственного заряда и расположена вблизи катода. Вторая сетка является управляющей. На катодную сетку подаётся достаточно большой положительный потенциал, который способствует рассасыванию электронного облака вблизи катода,

Характеристика электрометрических ламп

Таблица 1

Тип	Напряжение накала в в	Ток накала в ма	Анодное напряжение в в	Напряжение катодной сетки U_3 в в	Напряжение управляющей сетки U_c в в	Анодный ток в мка	Крутизна характеристики в мка/в	Сеточный ток в а	Коэффициент усиления μ	Ёмкость сетки в мк.мксф	Литературные ссылки
ЭМ-2	2	80	10	6	-4	300	55	10^{-13}	1,65	2,5	10
ЭМ-3	3	122	6	4	-3	55	50	10^{-15}	1,15	5,2	19
Лампа Хайсера	3	—	8	8	-4	300	300	10^{-12}	—	—	20
T-113	3	100	10	10	-3	—	180	10^{-13}	2,5	—	17,20
T-114	2	90	6	4	-4	—	55	10^{-14}	1,0	—	17,20
T-115	2,8	500	12	12	-3	—	200	10^{-11}	2,5	—	21
D96475	1,0	270	4	4	-3	—	40	10^{-15}	—	—	22
FP-54	2,5	90	6	4	-4	40	25	$5 \cdot 10^{-15}$	1	6	22
UX-54											
VX-41											
4060	1,25	10	4,5	4,5	-3	250	20	$5 \cdot 10^{-15}$	1	—	23
RH505	0,56	1100	4	—	-4,5	50	30	$2 \cdot 10^{-15}$	0,5	—	17
RH506	2,0	250	6	—	-3	300	75	10^{-15}	1,0	3	24
RH507	2,5	250	6	—	-3	400	90	10^{-15}	0,8	4	24
AL51A	2,0	60	6	—	-3	200	60	10^{-12}	0,8	4	24
СК570АХ	1-1,25	170-195	4,75	—	-6	350	50-60	$2 \cdot 10^{-14}$	—	—	23
	0,625	20	12	—	-3	220	125	$5 \cdot 10^{-13}$	1,5	—	23

что позволяет электронам, эмитируемым катодом, достигать анода при очень малом анодном напряжении. Это обстоятельство, в свою очередь, позволяет работать при потенциалах много ниже потенциала ионизации газа, вследствие чего измеряемый ток освобождается от ионной составляющей сеточного тока.

Из трёхэлектродных электрометрических ламп наибольшее распространение получили «платины», у которых анод и управляющий электрод выполнены в виде пластин, расположенных по обеим сторонам катода.

Катоды электрометрических ламп работают при сравнительно низких температурах. Как правило, в электрометрических лампах применяются катоды из торированных или оксидированных нитей. Лампы с торированным катодом в электрометрическом режиме работают при температуре 1500—1700 °К, а с оксидированным — 750—900 °К.

Следует заметить, что электрометрические лампы с оксидированными катодами обнаруживают меньшие флуктуации тока эмиссии, чем лампы с торированным катодом и при одинаковых температурах накала дают больший ток эмиссии.

Сопротивление изоляции электрометрических ламп достигает 10^{14} — 10^{15} ом. С целью дальнейшего уменьшения утечки тока по сопротивлению изоляции на шейку лампы ставят охранное кольцо^{10, 17}. Для этого после обработки поверхности лампы ацетоном или бензином и спиртом наносится графитовое кольцо (лучше с помощью аквадага). На графитовое кольцо надевается кольцо металлическое, на которое подаётся напряжение, равное по величине и противоположное по знаку постоянному смещению управляющего электрода. Для уменьшения фотоэмиссии сетки, а также для уменьшения проводимости по сопротивлению изоляции лампы вследствие конденсации влаги на ней, лампу помещают в специальный непроницаемый металлический баллон, в котором или создают вакуум, или ставят поглотитель влаги.

Характеристики электрометрических ламп собраны в таблице I (см. на стр. 99).

II. ПОДБОР ЭЛЕМЕНТОВ УСИЛИТЕЛЯ И РЕЖИМА СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ

Стабильным режимом работы усилителя постоянного тока нужно считать такой, при котором не наблюдается или почти не наблюдается скольжения нуля гальванометра (дрейф) и флуктуации. Эти условия выполнимы лишь тогда, когда элементы усилителя (его сопротивления) и режим питания подобраны в соответствии с определёнными условиями.

Рассмотрим последовательно принципы, лежащие в основе выполнения поставленной задачи.

1. Первый приём подбора элементов усилителя и режима стабильной работы

Настоящий вариант подбора элементов усилителя рассмотрен в работе³⁰. В основу рассмотрения был положен мост Уитстона (см. рис. 1,б и 3). В результате несложных рассуждений получено два соотношения, выражающих равновесие усилителя, из которых определяются приблизительные значения искомых элементов.

Условия эти следующие:

Для того чтобы в диагонали моста не шёл ток, нужно, чтобы выполнялись равенства:

$$\frac{R_1}{R_6} = \frac{R_7}{R_8} \quad (2,1)$$

и

$$E_B = \frac{R_8}{R_7 + R_8} E_T \quad (2,2)$$

или

$$R_8 = \frac{E_B}{E_T - E_B} R_7. \quad (2,2a)$$

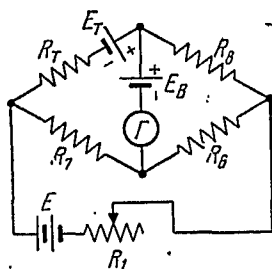


Рис. 3.

Здесь R_7 — эквивалент сопротивления катодная сетка — анод лампы, $R_8 = R_a$, $R_6 = R_4$, $R_7 = R_2 + R_3 +$ сопротивление нити накала R_n , E_T — условный источник эдс. Величина E_T равна падению напряжения на сопротивлении R_7 , E_B — компенсирующая батарея напряжением приблизительно 1,5 в.

Значение анодного сопротивления R_8 (на эквивалентной схеме) находится из формулы (2,2a). Однако путь, предлагаемый авторами для отыскания этой величины, не является строго теоретическим, так как он предполагает знание некоторых эмпирических соотношений, которые для данной лампы находятся экспериментально.

Сперва снимается зависимость анодного тока (в мка) от тока накала и из линейной части кривой по её середине устанавливается наилучшее значение тока накала.

Затем снимается зависимость анодного тока при найденном токе накала от изменения R_1 , т. е. от сеточного смещения. В результате

получается зависимость, изображённая на рис. 4. Здесь по оси абсцисс отложены значения напряжения питающей батареи при изменении значения R_1 от нуля и выше, при котором поддержи-

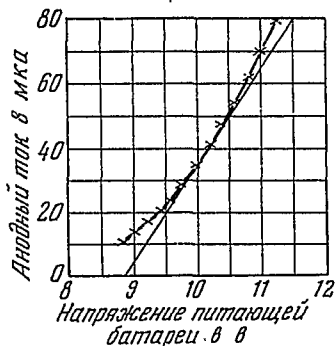


Рис. 4.

вается один и тот же ток накала (~ 100 ма). Полученная кривая аналогична прежней. Середина линейной части этой кривой указывает наилучшее значение напряжения питающей батареи, а пересечение касательной в этой точке кривой с осью абсцисс показывает начальную рабочую точку, соответствующую падению напряжения на R_T в эквивалентной схеме. Для лампы $FP54$ E_T равняется 8,6 в. Найдя значения сопротивлений R_2 , R_3 и R_4 на основании параметров лампы и подставляя их в систему уравнений (2,1) и (2,2), находим, что R_T равно $3,38 \cdot 10^4$ ом, откуда находится и R_8 . Для решения этой системы к найденным значениям нужно ещё добавить значение напряжения компенсирующего элемента E_B . Изложенный здесь путь подбора параметров усилителя не является ни легким, ни точным, так как после проделанных вычислений истинные значения приходится находить путём практической подгонки.

2. Второй приём подбора элементов усилителя и режима стабильной работы

Изложенное в настоящем параграфе относится к схемам, изображённым на рис. 1,б и 1,з²⁴. Схема 1,з получена путём изъятия цепи катодной сетки в схеме 1,б применительно к трёхэлектродной лампе. В этом случае сопротивление R_2 схемы 1,з равно сумме сопротивлений R_2 и R_3 в схеме 1,б.

Основным параметром, относительно которого отыскиваются элементы схемы, является ток накала. Находятся условия, при которых малые изменения тока накала не вызывают смещения нуля гальванометра. Математически эти условия могут быть записаны следующим образом:

$$I_a R_a - I_n R_4 = E_B, \quad (2,3)$$

$$(I_a + \Delta I_a) R_a - (I_n + \Delta I_n) R_4 = E_B. \quad (2,4)$$

Здесь I_n и I_a — соответственно ток накала и анодный ток, ΔI_n и ΔI_a — изменения накального и анодного токов, E_B — напряжение компенсирующей батареи в диагонали моста.

Следует заметить, что при неизменном анодном и сеточном напряжениях причиной изменения анодного тока является изменение тока накала. Решая систему уравнений (2,3) и (2,4) относительно R_a и R_4 , найдём

$$R_a = \frac{E_B \frac{\Delta I_n}{\Delta I_a}}{I_a \frac{\Delta I_n}{\Delta I_a} - I_n}, \quad (2,5)$$

$$R_4 = \frac{E_B}{I_a \frac{\Delta I_n}{\Delta I_a} - I_n}. \quad (2,6)$$

Все остальные параметры усилителя находятся на основании параметров применяемой лампы.

Для вычисления величин сопротивления, согласно формулам (2,5) и (2,6), необходимо знание производной $\frac{\Delta I_H}{\Delta I_a}$, а также тока накала

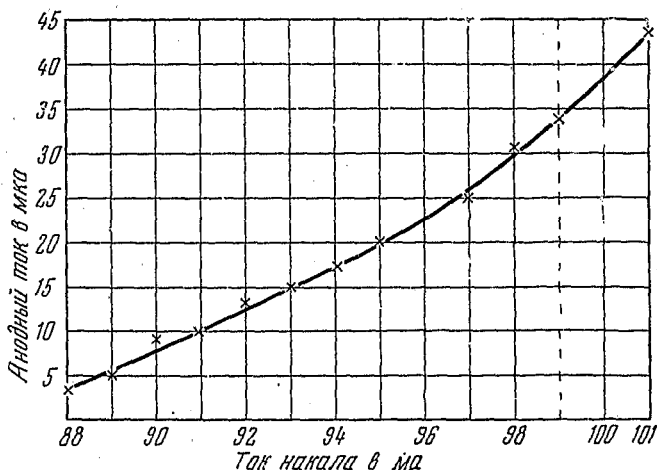


Рис. 5.

и анодного тока для той точки, для которой эта производная найдена. Эти данные находятся путём снятия кривой зависимости анодного тока от тока накала (рис. 5). Снятие этой кривой производится по схеме, изображённой на рис. 6.

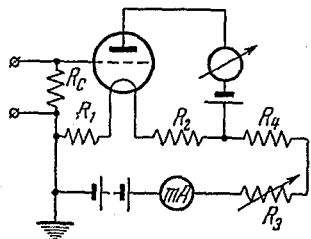


Рис. 6.

Значения сопротивлений, которые могут быть найдены таким путём являются приближительными и требуют дополнительной экспериментальной доводки.

3. Третий приём подбора элементов усилителя и режима стабильной работы

Настоящий приём подбора режима стабильной работы усилителя постоянного тока описан в работе²⁵. В этой работе прежде всего обращено внимание на роль постоянства температуры окружающей среды. Температурные изменения вызывают не только сползание нуля гальванометра, но и изменение тока накала I_n , от которого зависит стабильность схемы. На рис. 7 показано смещение кривой стабильности с изменением температуры на два градуса. Мы видим, что для

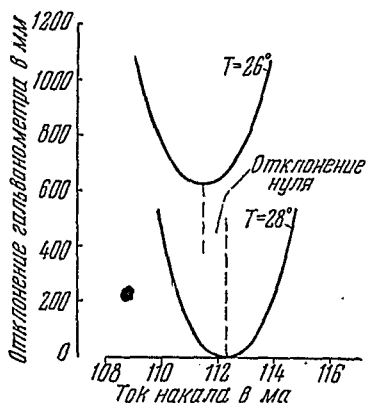


Рис. 7.

того режима, для которого снималась зависимость стабильности от температуры внешней среды, минимум кривой не только переместился на 600 миллиметров вдоль шкалы, но он стал соответствовать другому току накала. Отсюда следует, что на постоянство нуля действуют не только внутренние факторы, но также и внешние, к каковому относится в первую очередь температура. Величину сползания нуля гальванометра, зависящую от изменения внешней температуры, можно сделать сколь угодно малой устройством тепловой изоляции, но уничтожить её совсем практически невозможно.

При сползании нуля гальванометра он возвращается в прежнее положение при помощи изменения анодного сопротивления.

Первоначальные исследования были проведены на схеме, изображённой на рис. 1,б. В результате исследований возникла новая схема, обладающая определёнными преимуществами (см. рис. 1,г). В этой схеме катодная сетка имеет положительный потенциал, и в цепи её течёт ток в 4—5 раз больший анодного. Если под действием внешней причины изменяется ток накала, то это вызывает такие изменения токов в цепях анода и катодной сетки, что их отношение соотвётся постоянным, благодаря чему положение нуля гальванометра сохраняется. Разность потенциалов на клеммах гальванометра равна

$$U = R_B I_c - R_0 I_a. \quad (2,7)$$

Ток, текущий через гальванометр под действием этой разности потенциалов, мал по сравнению с токами I_c и I_a . R_0 — также мало и включено последовательно с R_0 для тонкой настройки. Ток через гальванометр будет равен нулю ($U=0$) при условии, что

$$\frac{I_a}{I_c} = \frac{R_B}{R_0}. \quad (2,8)$$

Если во время флуктуации тока накала отношение $\frac{I_a}{I_c}$ остаётся постоянным, то вторым условием независимости U от изменения напряжения батареи и, следовательно, тока накала I_n является

$$\frac{dU}{dI_n} = 0. \quad (2,9)$$

Беря производную от (2,7) и принимая во внимание (2,9), найдём, что

$$\frac{dI_a}{dI_n} = \frac{R_b}{R_0} \frac{dI_c}{dI_n}. \quad (2,10)$$

Характеристические кривые для лампы 6Р-54 в схеме рис. 1,2 показаны на рис. 8.

Для этого случая предложена следующая методика стабилизации:

1. С помощью балластного сопротивления в цепи накала R_3 установить ток накала I_n согласно параметрам лампы и с помощью анодного сопротивления $R_0 + R_0'$ привести гальванометр к нулю. Гальванометр включить так, чтобы убывание R_0 сопровождалось убыванием отклонения.

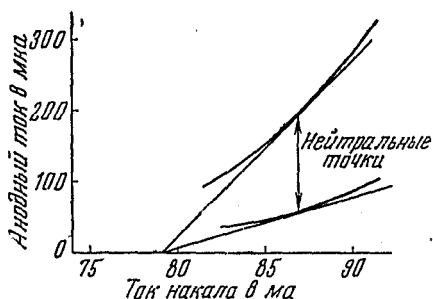


Рис. 8.

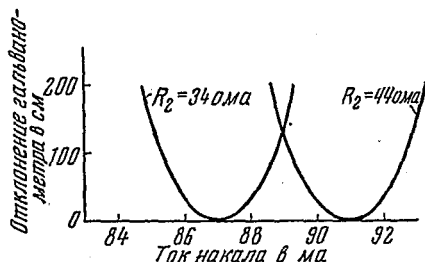


Рис. 9.

2. К гальванометру присоединить шунты, которые делают его чувствительность равной 0,1; 0,01 и т. д. его нормальной чувствительности. Переходя постепенно от меньших чувствительностей к большим с помощью R_3 , подправлять I_n так, чтобы отклонения гальванометра убывали при малых изменениях I_n на ΔI_n . Показания гальванометра должны проходить через минимум. Если отклонения гальванометра лежат за пределами шкалы, то нуль гальванометра нужно сместить с помощью изменения R_0 .

3. Если значения I_n в минимуме отличаются от нормального более, чем на 3—4%, то нужно изменить R_3 и повторить всю процедуру сначала. Основные параметры могут быть найдены после 3—4 испытаний. Типичное смещение минимума кривой стабилизации при изменении сопротивления R_2 показано на рис. 9.

4. При полной чувствительности гальванометра отыскать его минимум с помощью R_3 и с помощью R_0 вывести световую марку на шкалу в нужную точку. После этого схема будет дрейфовать ещё 15—20 минут. В дальнейшем необходимо небольшими изменениями R_0 произвести окончательную балансировку.

4. Дальнейшие исследования условий стабилизации

Дальнейшее исследование несколько видоизменённой схемы, изображённой на рис. 1,2, описано в работе⁹.

Найдено, что если снимать зависимость отклонения гальванометра от тока накала, то можно найти две точки равновесия X и Y , изображённые на рис. 10, где $\frac{d\alpha}{dI_H} = 0$.

В положении равновесия ток, идущий через гальванометр, должен зависеть только от потенциала управляющего электрода при условии, что изменение тока в анодной цепи лампы пропорционально изменению тока в цепи катодной сетки.

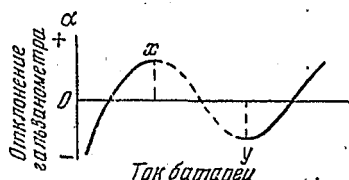


Рис. 10.

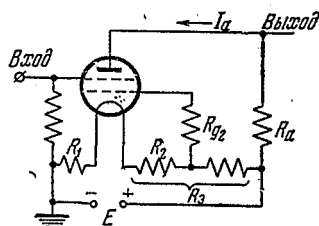


Рис. 11.

Для увеличения разрешающей способности, т. е. для увеличения постоянной усилителя, иногда напряжение, получающееся в диагонали моста, подают на вход последующих каскадов усиления. Такова работа²⁸, в которой описано применение подобного усилителя для сравнения ионных токов при масс-спектрографировании нулевым методом, а также^{14, 29}, в которых даны условия стабилизации такого усилителя. Принципиальная схема изображена на рис. 11. В этой схеме на входе стоит электрометрическая лампа, а в последующих каскадах усиления — обычные электронные лампы. Для того чтобы усилитель сохранял стабильность, подбирают сопротивления такими, при которых потенциал анода не зависит от напряжения питающих батарей и эмиссии лампы. Величины сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_{g2} и R_a находятся из параметров лампы и нижеследующих условий.

Пусть U_H , U_{g1} , U_{g2} и U_a — потенциалы положительного конца нити накала, управляющего электрода, катодной сетки и анода элек-

тронетрической лампы, измеренные относительно отрицательного конца нити накала. Пусть U_0 обозначает выходное напряжение, т. е. разность потенциалов между анодом и отрицательным концом сопротивления R_1 . В стабильном состоянии, при условии, что токи I_{g_2} и I_a малы в сравнении с током накала I_n , выполняется следующая система уравнений:

$$U_{g_1} = -I_n R_1, \quad (2,11)$$

$$U_{g_2} = U_n + I_n R_2 - I_{g_2} R_{g_2}, \quad (2,12)$$

$$U_a = U_n + I_n R_3 - I_a R_a, \quad (2,13)$$

$$E = U_n + I_n (R_1 + R_3), \quad (2,14)$$

$$U_0 = I_n R_1 + U_a. \quad (2,15)$$

Здесь I_n — ток накала, I_a — анодный ток, I_{g_2} — ток катодной сетки, U_{g_2} — напряжение катодной сетки, U_n — напряжение накала, U_{g_1} — постоянное смещение управляющего электрода, U_a — анодное напряжение, U_0 — выходное напряжение.

Анодный ток и ток катодной сетки являются функциями потенциалов анода, катодной сетки и управляющего электрода, а также тока накала. Разлагая их в ряд и ограничиваясь членами первого порядка, получаем

$$I_a = I_{a_0} + \frac{\partial I_a}{\partial U_{g_1}} \Delta U_{g_1} + \frac{\partial I_a}{\partial I_n} \Delta I_n + \frac{\partial I_a}{\partial U_{g_2}} \Delta U_{g_2} + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \Delta U_a,$$

или

$$\Delta I_a = P_{g_1} \Delta U_{g_1} + P_n \Delta I_n + P_{g_2} \Delta U_{g_2} + P_a \Delta U_a; \quad (2,16)$$

здесь

$$P_{g_1} = \frac{\partial I_a}{\partial U_{g_1}}; \quad P_n = \frac{\partial I_a}{\partial I_n}; \quad P_{g_2} = \frac{\partial I_a}{\partial U_{g_2}}; \quad P_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_a};$$

и аналогично для приращения тока катодной сетки

$$\Delta I_{g_2} = S_{g_1} \Delta U_{g_1} + S_n \Delta I_n + S_{g_2} \Delta U_{g_2} + S_a \Delta U_a; \quad (2,17)$$

здесь

$$S_{g_1} = \frac{\partial I_{g_2}}{\partial U_{g_1}}; \quad S_n = \frac{\partial I_{g_2}}{\partial I_n}; \quad S_{g_2} = \frac{\partial I_{g_2}}{\partial U_{g_2}}; \quad S_a = \frac{\partial I_{g_2}}{\partial U_a}.$$

Из уравнений (2,11), (2,12) и (2,13) следует, что

$$\Delta U_{g_1} = -R_1 \Delta I_n, \quad (2,18)$$

$$\Delta U_{g_2} = (r_n + R_2) \Delta I_n - R_{g_2} \Delta I_{g_2}, \quad (2,19)$$

$$\Delta U_a = (r_n + R_3) \Delta I_n - R_a \Delta I_a. \quad (2,20)$$

Сопротивление нити накала может быть выражено, как $r_n = \frac{\partial U_n}{\partial I_n}$. Подставляя из (2,18) значение ΔU_{g_1} и из (2,19) ΔI_{g_2} в (2,17), можно найти

$$\Delta U_{g_2} = \frac{r_n + R_2 + R_{g_2} (S_{g_1} R_1 - S_n)}{1 + S_{g_2} R_{g_2}} \Delta I_n - \frac{S_a R_{g_2}}{1 + S_{g_2} R_{g_2}} \Delta U_a. \quad (2,21)$$

Аналогично

$$\Delta U_a = \frac{r_n + R_3 + R_a (P_{g_1} R_1 - R_n)}{1 + P_a R_a} \Delta I_n - \frac{P_{g_2} R_a}{1 + P_a R_a} \Delta U_{g_2}. \quad (2,22)$$

Тогда из уравнений (2,21) и (2,22), исключая ΔU_{g_2} , можно выразить ΔU_a

$$\Delta U_a = \left\{ \frac{(1 + S_{g_2} R_{g_2}) [r_n + R_3 + R_a (P_{g_1} R_1 - P_n)]}{(1 + R_a P_a)(1 + R_{g_2} S_{g_1}) - P_{g_2} R_a S_a R_{g_2}} - \frac{P_{g_2} R_a [r_n + R_2 + R_{g_2} (S_{g_1} R_1 - S_n)]}{(1 + R_a P_a)(1 + R_{g_2} S_{g_1}) - P_{g_2} R_a S_a R_{g_2}} \right\} \Delta I_n. \quad (2,23)$$

Условие независимости выходного напряжения U_0 от напряжения батареи E может быть написано согласно уравнению (2,15)

$$\Delta U_0 = R_1 \Delta I_n + \Delta U_a = 0. \quad (2,15a)$$

Подставляя в (2,15a) значение ΔU_a из (2,23), получим следующее уравнение:

$$(1 + S_{g_2} R_{g_2}) [r_n + R_3 + R_a (P_{g_1} R_1 - P_n)] - P_{g_2} R_a [r_n + R_2 + R_{g_2} (S_{g_1} R_1 - S_n)] + R_1 [(1 + P_a R_a)(1 + S_{g_2} R_{g_2}) - P_{g_2} S_a R_a R_{g_2}] = 0. \quad (2,24)$$

Уравнения (2,11), (2,12), (2,13) и (2,24) представляют систему четырёх уравнений с пятью неизвестными R_1 , R_2 , R_3 , R_a и R_{g_2} . Эта система может быть сведена к одному уравнению с двумя неизвестными. Токи и потенциалы войдут в это уравнение как параметры, выбираемые на основании данных электрометрической лампы. Если из этой системы исключить, например, R_1 , R_a , R_{g_2} , то получится уравнение, содержащее неизвестные R_2 и R_3 , которые могут быть выражены одно через другое. Зная нормальный ток и напряжение накала, можно определить из уравнения (2,14) необходимые напряжения источника питания. Если из расчёта получится, что R_3 меньше R_2 , то следует при найденных значениях остальных сопротивлений поменять местами концы сопротивлений R_a и R_{g_2} , присоединённые к сопротивлениям R_2 и R_3 (см. рис. 11).

Параметры, входящие в приведённую систему уравнений, определяются экспериментально. Измеренные для одной из ламп FP-54, они

привели к следующим значениям:

$$\begin{aligned} P_{g_1} &= 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, & P_H &= 0,0026 \text{ а/в}, \\ P_{g_2} &= 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, & P_a &= 16,2 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, \\ S_{g_1} &= -8,75 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, & S_H &= 0,0185 \text{ а/в}, \\ S_{g_2} &= 65 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, & S_a &= 11 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}, \\ I_a &= 34,9 \cdot 10^{-6} \text{ а}, & U_H &= 2,47 \text{ в}, \\ I_{g_2} &= 219 \cdot 10^{-6} \text{ а}, & r_H &= 25 \text{ ом}. \end{aligned}$$

Рабочие напряжения этой лампы в электрометрическом режиме следующие:

$$U_a = 6 \text{ в}; \quad U_{g_2} = 4 \text{ в}; \quad U_{g_1} = -4 \text{ в}; \quad I_H = 0,09 \text{ в}.$$

Если подставить эти данные в уравнения (2,11), (2,12) и (2,13), то получится, что

$$R_1 = 44,4 \text{ ома}, \quad R_{g_2} = 411 \text{ ом}, \quad R_2 = 6990 \text{ ом} \text{ и } R_a = 2580 \text{ ом}, \quad R_3 = 101000 \text{ ом}.$$

После подстановки этих значений в (2,24) можно выразить R_2 через R_3 :

$$R_2 = \frac{7,62 R_3 - 371}{0,19 R_3 - 3,62} \text{ ом}. \quad (2,25)$$

Минимальное значение R_2 находится из предположения, что R_{g_2} равно нулю. В этом случае R_2 должно быть около 17 ом, а R_3 оказывается больше 70 ом. Из этих условий и на основании уравнений (2,14) E должно быть больше 14,8 в.

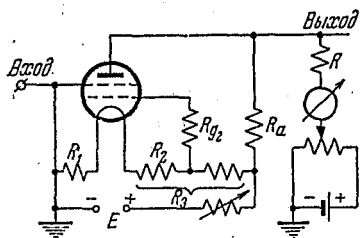


Рис. 12.

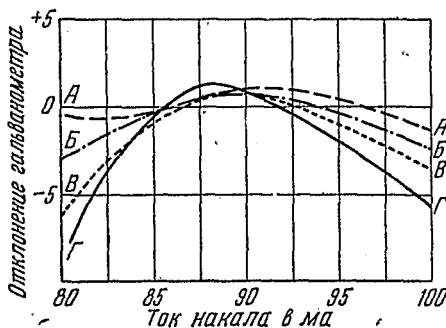


Рис. 13.

Меняя значение R_3 так, чтобы R_{g_2} оставалось положительным, можно рассчитать значения остальных сопротивлений схемы по вышеприведённым формулам. Эти данные в последующем проверяются экспериментально при помощи схемы, показанной на рис. 12. Изменяя напряжение батареи E и снимая зависимость тока, протекающего через гальванометр, от тока накала, можно судить о компенсационных свойствах схемы (рис. 13).

На рис. 13 даны кривые, снятые при следующих данных:

Кривая А:	$R_3 = 70 \text{ ом},$	$R_2 = 17 \text{ ом},$
	$R_{g2} = 0,$	$R_a = 92,5 \cdot 10^3 \text{ ом},$
Кривая Б:	$R_3 = 75 \text{ ом},$	$R_2 = 20,5 \text{ ом},$
	$R_{g2} = 1430 \text{ ом},$	$R_a = 92,5 \cdot 10^3 \text{ ом},$
Кривая В:	$R_3 = 100 \text{ ом},$	$R_2 = 27,5 \text{ ом},$
	$R_{g2} = 4310 \text{ ом},$	$R_a = 157 \cdot 10^3 \text{ ом},$
Кривая Г:	$R_3 = 400 \text{ ом},$	$R_2 = 39,6 \text{ ом},$
	$R_{g2} = 9350 \text{ ом},$	$R_a = 931 \cdot 10^3 \text{ ом}.$

Из приведённых кривых видно, что условие стабильности наилучшим образом осуществляется в режиме А. Об этом можно судить по величине плато, вдоль которого изменения тока накала, а следовательно, и тока эмиссии не влияют на величину выходного напряжения.

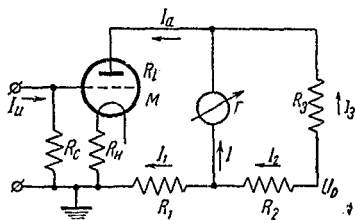


Рис. 14.

Описанный здесь приём компенсации нестабильности имеет ряд преимуществ перед другими приёмами, но и он не лишён недостатков. Основным недостатком обусловлен большим различием между токами, протекающими в цепи анода и катодной сетке электро-

метрической лампы. Отсюда же нетрудно усмотреть, что относительно малые изменения в цепи питания усилителя, в котором смещения элементов схемы задаются потенциометрически, могут создавать условия большого изменения тока эмиссии и, следовательно, нарушения режима стабильной работы. Происходит это потому, что при изменении тока эмиссии отношение токов анодного и экранной сетки не сохраняется. В силу этих причин поиски путей лучшей стабилизации тока эмиссии продолжаются. В частности, поиски направлены по линии создания двойных электрометрических ламп для компенсационных схем. В случае одноламповых усилителей разрабатываются также методы компенсации нестабильности введением отрицательной обратной связи. Такие схемы отличаются меньшим коэффициентом усиления, однако для измерения не очень малых токов они могут быть рекомендованы 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 48. В качестве образца рассмотрим схему, приведённую на рис. 14.

Параметры этой схемы могут быть подсчитаны, исходя из следующей системы уравнений:

$$U_0 + \mu U_g = I_a (R_i + R_n) + I_3 R_3, \quad (2,26)$$

$$U_0 = I_2 R_2 + I_1 R_1, \quad (2,27)$$

$$I r = I_3 R_3 - I_2 R_2, \quad (2,28)$$

$$I_2 = I_1 + I, \quad (2,29)$$

$$I_a = I + I_3. \quad (2,30)$$

Здесь μ — статический коэффициент усиления лампы, U_0 — падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 , I — ток в цепи гальванометра, U_g — разность потенциалов между сеткой и катодом лампы.

Подставляя $U_g = U_c - I_a R_n$ в уравнение (2,26) и принимая во внимание, что $U_c = I_u R_c$, где I_u — измеряемый ток, в результате решения вышеприведенной системы относительно I получим

$$I = \frac{-R_3 (R_1 + R_2) \mu U_c + U_0 \{-R_1 R_3 + R_2 [R_i + R_n (1 + \mu)]\}}{R_3^2 (R_1 + R_2) - [R_i + R_3 + R_n (1 + \mu)] [(R_2 + R_3 + r) (R_1 + R_2) - R_2^2]}. \quad (2,31)$$

В случае, если лампа работает в линейной части характеристики т. е. внутреннее сопротивление R_i в достаточно широких пределах не зависит от питающего напряжения, то из выражения для тока I можно найти условие, при котором он не зависит от величины питающего напряжения U_0 , и, следовательно, коэффициент при U_0 в числителе (2,31) должен обратиться в нуль:

$$-R_1 R_3 + R_2 [R_i + R_n (1 + \mu)] = 0. \quad (2,32)$$

При $R_2 = R_3$ условие (2,32) можно переписать так:

$$R_1 - [R_i + R_n (1 + \mu)] = 0. \quad (2,33)$$

Так как для неэлектрометрических ламп $\mu \gg 1$, то (2,33) можно записать в окончательном виде так:

$$R_1 = [R_i + R_n (1 + \mu)] = R_i + \mu R_n. \quad (2,34)$$

Если внутреннее сопротивление гальванометра $r \ll R_i$, а также $r \ll R_2$ и $r \ll R_3$, то после подстановки в (2,31) выражений (2,32), (2,33) и (2,34) и принимая во внимание приведенные здесь условия, выражение для тока I получит следующий вид:

$$I = \frac{\mu U_c}{2 (R_i + \mu R_n)}. \quad (2,35)$$

Коэффициент усиления по току для данного усилителя выразится

$$k = \frac{I}{I_u} = \frac{\mu R_c}{2 (R_i + \mu R_n)}. \quad (2,36)$$

Для обычного усилителя постоянного тока

$$k_0 = SR_c, \quad (2,37)$$

где S — крутизна характеристики лампы.

Отношение $\frac{k_0}{k}$ даёт возможность сравнить усилительные возможности этих схем

$$\frac{k_0}{k} = \frac{2S(R_i + \mu R_n)}{\mu}. \quad (2,38)$$

Но $S = \frac{\mu}{R_i}$, и поэтому (2,38) окончательно перепишется в виде

$$\frac{k_0}{k} = 2(1 + SR_n). \quad (2,39)$$

Из выражения (2,39) видно, что схемы с компенсацией неустойчивости менее чувствительны, чем схемы без компенсации. Даже при отсутствии отрицательной обратной связи ($R_n = 0$) схемы с компенсацией неустойчивости имеют коэффициент усиления по току, вдвое меньший соответственного коэффициента усиления для схем без компенсации. В случае $R_n > 0$ коэффициент усиления k делается ещё меньше. Однако ценность усилителей этого типа не снижается в случае применения их для целей измерения не очень малых токов, таких, например, какие возникают в лампе ионизационного манометра.

Постоянство тока в цепи гальванометра при колебании напряжения источника питания возможно только при строгом постоянстве внутреннего сопротивления лампы R_i и независимости статического коэффициента усиления μ от напряжения батареи. Практически это условие для электронных ламп (особенно экранированных) не выполняется. Компенсация непостоянства напряжения источника питания осуществляется частично, так как при изменении параметров лампы нарушается компенсация моста вследствие того, что изменяется сопротивление одной ветви, в то время как сопротивление других ветвей остаётся неизменным. Это условие было причиной разработки двухламповых схем.

5. Современное состояние вопроса о принципах подбора элементов усилителя и условиях стабилизации

Вышеизложенные принципы подбора элементов усилителя постоянного тока и условий стабилизации страдают внутренней ограниченностью, обусловленной тем, что развиты они без учёта природы неустойчивости. Между тем знание причин, вызывающих возникновение неустойчивости, позволяет сделать правильный выбор параметров, которые могут быть признаны за независимые, а также правил стабилизации.

Нужно различать два вида неустойчивости: медленный дрейф и быстрые колебания нуля гальванометра. Причины, вызывающие

нестабильность, можно разбить на две группы: внешние (не зависящие от состояния усилителя) и внутренние (связанные с самим усилителем). Каждая из этих групп причин может вызывать как медленный дрейф, так и быстрые колебания ^{9, 10, 38, 39, 40}.

К наиболее существенным из внешних причин нужно отнести такие, как переменные электрические и магнитные поля, переменная внешняя температура, вибрации электрометрической лампы, вызванные внешними колебаниями, и др.

Влияние переменных внешних электрических и магнитных полей, а также влияние переменной внешней температуры устраняются созданием соответственной экранировки. Влияние же вибраций устраняется при помощи амортизаторов.

Гораздо более существенную роль играют внутренние причины, вызывающие скольжение нуля гальванометра (дрейф) и мелкие колебания. Дрейф нуля гальванометра обусловлен постепенным возрастанием или убыванием анодного тока без изменения всех остальных параметров схемы. Он может быть обусловлен также увеличенной скоростью саморазряда питающей батареи.

Первая причина этого явления состоит в следующем.

Как известно, все электрометрические лампы являются лампами прямого накала и, следовательно, между концами катода имеется некоторое падение напряжения. Анодное и сеточное напряжения задаются относительно отрицательного конца нити накала. В силу этого обстоятельства эмиссия электронов с отрицательного конца больше, чем с его положительного конца.

Общий анодный ток зависит от температуры катода, а последняя зависит от тока накала и тока эмиссии. Так как эмиссия с отрицательного конца нити накала больше, чем с положительного конца, то отрицательный конец разогревается сильнее, чем положительный. Это, в свою очередь, вызывает увеличение эмиссии электронов с катода и т. д. Происходит процесс саморазогревания катода, вследствие чего анодный ток увеличивается, в то время, как анодное и сеточное смещения остаются неизменными. Этот процесс саморазогревания длится до тех пор, пока не наступит состояние теплового равновесия между катодом и окружающей средой. Длительность такого процесса достигает нескольких десятков часов. В течение всего этого времени наблюдается дрейф.

Мелкие колебания обусловлены следующими причинами:

1) дробовым эффектом эмиссии; 2) недостаточной активацией катода; 3) током положительных ионов, эмитируемых катодом; 4) нестабильностью сеточного входного сопротивления ^{9, 39, 40}.

Влияние мелких колебаний в значительной мере можно снизить включением на выходе гальванометра с относительно большим периодом.

Итак, в чём же состоит ограниченность методов стабилизации, изложенных выше?

Во всех предыдущих случаях при отыскании стабильного режима работы усилителя в качестве независимого переменного параметра выбирался ток накала. При этом во всех случаях имелись в виду схемы с потенциометрическим питанием элементов усилителя. При изменении тока накала изменяется эмиссия катода, но вместе с ней изменяются также сеточные и анодные напряжения. Так как малым изменениям смещения управляющего электрода соответствуют большие изменения анодного тока, то существует такое соотношение между током накала и смещениями управляющего электрода и анода, при котором кривая изменения тока в диагонали моста имеет максимум (рис. 15). При дальнейшем увеличении тока накала ток в диагонали моста не только не увеличивается, но начинает убывать. Стабильный режим в этом случае определяется шириной максимума. Поэтому если в процессе саморазогревания катода лампы анодный

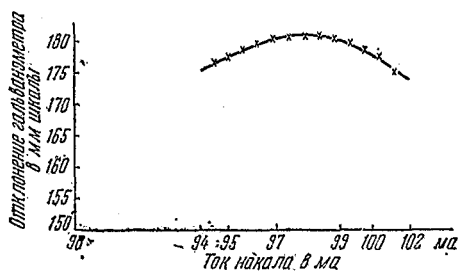


Рис. 15.

ток возрастает на величину, меньшую той, на которую он должен был бы возрасти при изменении тока накала, равного половине ширины максимума, то усилитель останется в стабильном состоянии, если же в процессе саморазогревания катода ток эмиссии превзойдёт этот предел, то по истечении некоторого времени вновь

начнёт наблюдаться дрейф, и поэтому необходимо вновь повторить всю процедуру стабилизации сначала. Таким образом, предлагаемая мера не гарантирует режима стабильной работы. Одновременно она исключает возможность варьировать чувствительностью усилителя по желанию экспериментатора.

Действительно, как было установлено выше, токовая чувствительность усилителя зависит от величин выходного сеточного сопротивления и крутизны характеристики лампы. Но последняя в значительной мере зависит от тока накала. Она растёт, и довольно быстро, с ростом тока накала. Таким образом, меняя ток накала, мы вместе с ним меняем и крутизну характеристики и, следовательно, чувствительность усилителя. Кроме того, в момент окончания балансирования система остаётся в состоянии отсутствия теплового равновесия между катодом и окружающей средой.

Суммируя всё вышеизложенное, нужно сделать следующие выводы:

1. Стабилизацию усилителя нельзя проводить с помощью тока накала, так как всякое изменение тока накала выводит режим лампы из теплового равновесного состояния.

2. С помощью тока накала должна быть задана чувствительность, которая необходима экспериментатору для данных измерений, и в дальнейшем этот режим должен строго поддерживаться.

3. Усилитель на протяжении всего времени измерений должен находиться во включённом состоянии. Всякое изменение режима питания должно сопровождаться последующим временем установления.

4. После установления равновесного режима стабилизация усилителя должна состоять в том, чтобы с помощью анодного сопротивления и сопротивления компенсации вывести нуль гальванометра на шкалу. В случае схемы, показанной на рис. 1, 3, сопротивлением компенсации является плечо R_4 .

III. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ДВУХ ИЛИ СДВОЕННЫХ ЛАМПАХ

1. Компенсационные схемы на двух электрометрических лампах

В ранней стадии разработки усилителей постоянного тока и ламп для них в качестве меры борьбы с нестабильностью была выдвинута идея компенсации быстрых колебаний эмиссии. Суть этой идеи состоит в том, что если возмущения, возникающие одновременно в обеих лампах, направить навстречу друг другу, то они погасятся, и на выходе эти возмущения наблюдаться не будут^{35, 36} (рис. 16). Как видно из этого рисунка, схема усилителя представляет мостик, два плеча которого являются сопротивлениями заданной величины и два других являются лампами. До включения измеряемой величины мостик уравновешен. Это достигается подбором тока накала.

Действительно, сеточные смещения относительно катодов ламп задаются общей батареей, и тогда неравновесность в плечах может быть обусловлена только различными токами эмиссии, которые, в свою очередь, зависят от тока накала.

На вход первой лампы в цепь сетки (управляющего электрода) ставится большое сопротивление ($\sim 10^{10}$ ом). Малый ток, который нужно измерить, пропускают через это сопротивление. Благодаря большой величине сопротивления малый ток на нём создаёт большое падение напряжения, что сильно меняет анодный ток, и схема выходит из равновесного состояния. Величина измеряемого тока может быть отсчитана по отклонению гальванометра, если эти отклонения прокалиброваны по какому-либо постоянному источнику. Такой

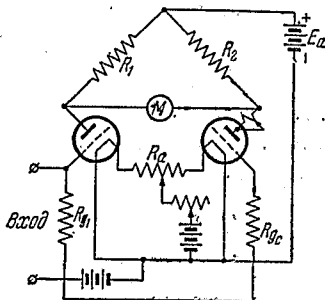


Рис. 16.

усилитель позволяет измерять токи до 10^{-11} а. Однако точность невелика из-за нестабильности, причина которой состоит в том, что подводимый ток течёт не только по сеточному сопротивлению, но также и по стеклу лампы, сопротивление которой не остаётся постоянным. Кроме того, колебания эмиссии в лампах не могут быть строго одинаковыми.

Дальнейшее усовершенствование состояло в том, что влияние сопротивления утечки было сделано постоянным и известным при помощи сеточного смещения от батареи, включённого через сеточное сопротивление. На такой схеме впервые была выявлена вредная роль больших сеточных токов лампы, и тогда родилась идея создания специальных электрометрических ламп с малым сеточным током.

Рассмотрим несколько подробнее влияние сеточных токов на измеряемую величину тока.

Как уже отмечалось выше, основным источником флуктуаций тока в диагонали моста являются шумы в лампе и во входном сеточном сопротивлении. Среди причин, вызывающих шумы в электрометрических лампах и особенно в лампах с оксидированным катодом, работающим при весьма низкой температуре, является дробовой эффект эмиссии.

Абсолютная величина среднего значения флуктуации эмиссии катода лампы может быть вычислена по формуле

$$\overline{U}_{фэ} = R_c \sqrt{2 i_{эм} e \Delta f}. \quad (3,1)$$

Здесь R_c — входное сопротивление сетки электрометрической лампы; $i_{эм}$ — ток эмиссии катода; Δf — ширина полосы частот, пропускаемых усилителем, и e — заряд электрона. Δf связана с постоянной времени входа усилителя $\theta = R_c C$, где C — входная ёмкость, следующим соотношением:

$$\Delta f = \frac{1}{2\theta}. \quad (3,2)$$

После подстановки (3,2) в (3,1) получим:

$$\overline{U}_{фэ} = R_c \sqrt{\frac{e \cdot i_{эм}}{\theta}}. \quad (3,3)$$

Напряжение U_c , развиваемое измеряемым током I_c на сопротивлении R_c , равно

$$U_c = I_c R_c. \quad (3,4)$$

Таким образом, отношение величины флуктуации напряжения к полезному сигналу

$$\frac{U_{фэ}}{U_c} = \sqrt{\frac{e \cdot i_{эм}}{I_c^2 \theta}}. \quad (3,5)$$

Влиянием флуктуации тока эмиссии можно пренебречь, если положить $\frac{\bar{U}_{\text{фэ}}}{U_c} = \frac{1}{10}$. В этом случае

$$\frac{I_c^2}{i_{\text{эм}}} = \frac{16,0 \cdot 10^{-18}}{\theta},$$

или

$$I_c = 4 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{i_{\text{эм}}}{\theta}}. \quad (3,6)$$

Из выражения (3,6) следует, что предельное значение тока, доступного измерению данным усилителем, понижается вместе с ростом постоянной входа усилителя. Казалось бы, что, идя этим путём, можно получить возможность измерения сколь угодно малых величин токов. Однако в действительности этот путь ограничен. С ростом θ растёт и инерция системы. Время для установившегося отклонения становится столь большим, что производство измерений делается невозможным.

Пользуясь формулой Найквиста, можно написать величину эффективного напряжения тепловых флуктуаций $\bar{U}_T$

$$\bar{U}_T = 2 \sqrt{kTR_c \Delta f}. \quad (3,7)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-23}$ вт/градус; T — абсолютная температура. Для комнатных температур

$$\bar{U}_T = 8,8 \cdot 10^{-11} \sqrt{\frac{R_c}{\theta}}. \quad (3,8)$$

Отношение (3,8) к (3,4) даёт

$$\frac{\bar{U}_T}{U_c} = 8,8 \cdot 10^{-11} \frac{1}{I_c R_c \sqrt{C}}. \quad (3,9)$$

Полагая, как и раньше, $\frac{\bar{U}_T}{U_c} = \frac{1}{10}$, получим, что

$$I_c = 8,8 \cdot 10^{-10} \frac{1}{R_c \sqrt{C}} = 8,8 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{1}{R_c \theta}}. \quad (3,10)$$

Из выражения (3,10) видно, что для повышения токовой чувствительности усилителя нужно повышать R_c и уменьшать C .

При учёте обоих вышеизложенных факторов минимальный ток, доступный измерению, может быть выражен следующим образом.

Полное флуктуационное напряжение на выходе

$$\sqrt{U_{\text{ш}}^2} = \sqrt{\bar{U}_T^2 + \bar{U}_{\text{фэ}}^2} = \sqrt{\frac{kT}{C} + \frac{eI_c}{2} \cdot \frac{I_c}{C}}. \quad (3,11)$$

Принимая во внимание (3,4), найдём отношение

$$\frac{U_c}{\sqrt{U_{\text{ш}}^2}} = \frac{I_c R_c}{\sqrt{\frac{kT}{C} + \frac{eI_c}{2} \cdot \frac{R_c}{C}}}, \quad (3,12)$$

или

$$\frac{U_c}{\sqrt{U_{\text{ш}}^2}} = \frac{I_c}{\sqrt{\frac{kT}{R_c^2 C} + \frac{eI_c}{2} \cdot \frac{1}{R_c C}}}. \quad (3,12')$$

На основании принятого соотношения между полезным сигналом и шумом

$$I_c = 100 \sqrt{\frac{kT}{R_c^2 C} + \frac{eI_c}{2} \cdot \frac{1}{R_c C}}. \quad (3,13)$$

Если принять во внимание, что R_c может быть равно собственному сопротивлению утечки лампы и C — её входная ёмкость, то в данном случае I_c есть собственный сеточный ток лампы. Как видно из (3,13), он тем меньше,

чем больше постоянная времени входа усилителя. Таким образом, сеточный ток и постоянная времени входа усилителя являются конкурирующими величинами, ограничивающими возможность измерения малых величин тока. Для этой цели построены специальные лампы с малым сеточным током ($\sim 10^{-15}$ а) при малой постоянной времени входа, названные электрометрическими.

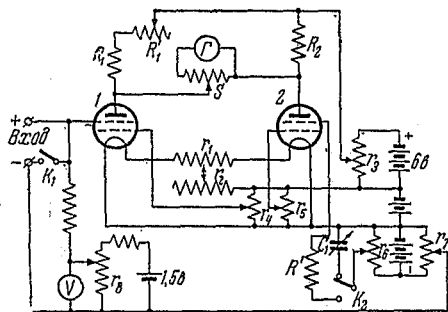


Рис. 17.

В связи с появлением специальных электрометрических ламп было предложено несколько мостовых двухламповых схем^{37, 38}. Одна из таких схем, изображённая на рис. 17, была описана в работе³⁹. При сеточном сопротивлении, равном 10^{10} ом, она даёт возможность измерять токи до $5 \cdot 10^{-18}$ а, или 30 электронов в секунду. Точность измерений 15%. Верхний предел, как утверждает автор, достигает $5 \cdot 10^{-19}$ а, или 3 электрона в секунду. Применяв короткопериодный гальванометр, можно измерить присутствие одного электрона.

Для целей практического измерения малых токов и больших сопротивлений была предложена⁸ двухламповая компенсационная схема, изображённая на рис. 2. Принципиально эта схема ничем не отличается от схемы, изображённой на рис. 17, но благодаря спе-

циальному подбору параметров она является весьма устойчивой и в ней может быть использован на выходе гальванометр чувствительностью 10^{-10} а/мм при сеточном сопротивлении в 10^{11} ом. При этих условиях токовая чувствительность может быть доведена до величины, равной $8 \cdot 10^{-17}$ а/мм. Коэффициент усиления может быть сделан равным $1,2 \cdot 10^6$. Такой усилитель позволяет измерять потенциалы до 10^{-4} в и сопротивления до 10^{12} ом.

Наряду с разработкой компенсационных двухламповых схем на специальных электрометрических лампах разрабатывались также компенсационные схемы на лампах типов 954 и 959 (жолудь)^{11, 46, 47, 48, 49}. Усилители, собранные на этих лампах, обнаружили достаточную чувствительность и стабильность. Они позволяют измерять токи от 10^{-7} до 10^{-13} а.

Как уже раньше отмечалось, полная стабильность компенсационных усилителей, собранных на двух лампах, не может быть достигнута из-за неодинаковых изменений токов эмиссии у обеих ламп в процессе саморазогревания, т. е. дрейф двухлампового усилителя обусловлен различием свойств катодов у разных ламп.

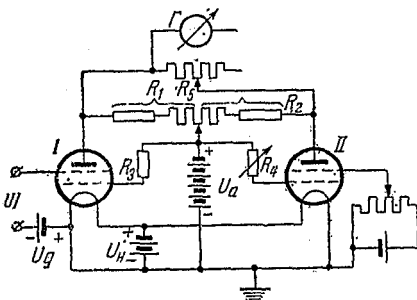


Рис. 18.

Параллельно с описанными мерами стабилизации двухламповых усилителей постоянного тока применяется и следующая. Влияние неодинаковости флуктуации тока эмиссии в лампах можно погасить, если катодную сетку одной лампы использовать для управления анодным током^{50, 51}. Такая схема изображена на рис. 18. Принцип управления анодным током осуществляется введением последовательного сопротивления в цепь катодной сетки. Напряжение, фактически приложенное к ней, будет меньше рабочего напряжения на величину падения напряжения на этом сопротивлении. С увеличением накала лампы растёт ток эмиссии, и одновременно возрастает ток катодной сетки. Падение напряжения на сопротивлении увеличивается, и соответственно уменьшается положительный потенциал катодной сетки. Тем самым катодная сетка управляет током эмиссии, так как падение потенциала её вызывает уменьшение тока. Соответствующим подбором сопротивления в цепи катодной сетки одной лампы можно добиться того, чтобы уменьшение тока эмиссии вызывало одинаковое изменение (ослабление) анодного тока обеих ламп. Таким образом удалось добиться компенсации при различном накале ламп.

Как видно из рис. 18, в цепях сеток стоят сопротивления R_3 и R_4 , из которых R_4 — переменное. В качестве напряжения питания катодных сеток используется полное анодное напряжение U_a . Сделано

это потому, что падение напряжения отдельной батареи, питающей катодные сетки, воздействовало бы в различной степени на анодный ток и вызывало бы нарушение равновесия. При использовании же для питания катодных сеток анодной батареи нарушение равновесия моста не происходит вследствие того, что различное влияние падения напряжения этой батареи на обе лампы уже заранее компенсировано подбором сопротивления R_1 и R_2 .

Сеточные начальные смещения U_{g_1} и U_{g_2} задаются с одной и той же батареей. Для изменения чувствительности гальванометр шунтируется.

По данным работы⁴⁹ при правильной регулировке достигается хорошее постоянство нулевого положения гальванометра. Так, за пять часов работы, как пишут авторы, нуль гальванометра сместился на величину, соответствующую смещению при подаче на сетку 0,5 милливольт. Авторы не пишут, какова была вольтовая чувствительность, но если предположить, что она имела порядок 10^{-5} в/мм, то это соответствует сползанию нуля гальванометра на 50 мм, или дрейф составляет 10 мм/час. При отсутствии флуктуации такой дрейф можно считать вполне приемлемым.

2. Компенсационные схемы на сдвоенных лампах

Для устранения возникшей трудности стабилизации усилителей на двух лампах были сконструированы двойные лампы с общим катодом. Таковы двойной триод и двойные тетроды^{9, 10, 50, 52}. Эти лампы сделаны таким образом, что в одном баллоне и на общем катоде выполнен монтаж двух ламп, т. е. имеются два анода и две управляющие сетки. В мостовой компенсационной схеме, собранной на такой сдвоенной лампе, достигается достаточно полная компенсация флуктуации эмиссии.

Двойные четырехэлектродные электрометрические лампы позволяют осуществлять мостовые схемы, как показано на рис. 19. Колебание тока эмиссии вызывает согласованное изменение анодного тока в обеих цепях анода. Таким образом, если мост сбалансирован, то его стабильность не зависит от тока эмиссии. Условия равновесия схемы могут быть записаны следующим образом:

$$I_1 = I_2, \quad (3,14)$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial E} = \frac{\partial I_2}{\partial E}, \quad (3,15)$$

$$R_1 - r = R_2. \quad (3,16)$$

Выражение (3,14) является лучшим условием стабильности без дрейфа и флуктуаций тока эмиссии.

Выражение (3,15) удовлетворяет условию баланса независимо от малых флуктуаций напряжения питающей батареи.

Предполагая, что уравнение (3,14) удовлетворено, требование баланса в мосте дано выражением (3,16). Согласно рис. 20 ток

накала регулируется сопротивлением R_{15} . Сопротивления R_8 и R_9 дают возможность подбирать анодное напряжение и напряжение катодной сетки. Сеточное смещение регулируется посредством R_{11} и R_{12} . Метод балансирования состоит в выполнении условий (3,14)—(3,16). В нормальном режиме сеточное смещение должно быть задано согласно характеристике лампы. Ток накала I_3 меняется при изменении R_{15} , при этом наблюдается изменение I_1 и I_2 . Если I_1 больше I_2 , то нужно увеличить R_{14} , если же I_1 меньше I_2 , то R_{14} нужно уменьшить.

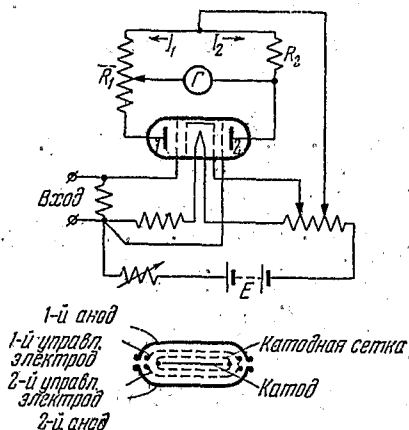


Рис. 19.

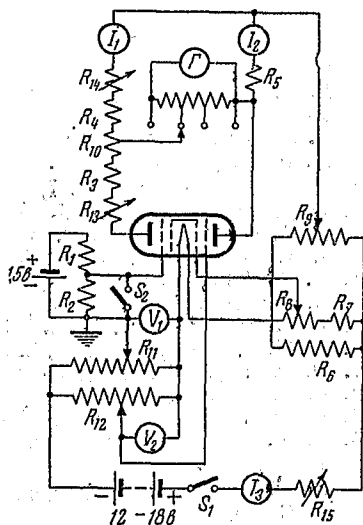


Рис. 20.

Изменением I_3 в том и другом направлении добиваются того, чтобы выполнилось равенство (3,14) ($I_1 = I_2$). Операцию эту продолжают до тех пор, пока ток I_1 будет оставаться постоянным при изменении I_3 приблизительно на 15%. Для того чтобы выполнялось условие (3,16) в левой части схемы, сопротивление R_{10} дополняется сопротивлениями R_3 и R_4 . Окончательная балансировка производится путём наблюдения за поведением гальванометра.

Конечной задачей является полное устранение дрейфа, который исчезает, когда I_1 становится равным I_2 . Окончательное устранение дрейфа производится при помощи R_{13} и R_{14} , причём R_{13} является тонкой настройкой R_{14} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усилители постоянного тока, работающие на электрометрических лампах, являются весьма чувствительными и стабильными измерительными приборами, позволяющими производить измерения многих электрических величин с высокой степенью точности.

Чувствительность усилителей постоянного тока выше, чем у самых чувствительных электрометров.

Принимая во внимание простоту обращения с ними, их универсальность и относительную дешевизну, можно надеяться, что в самое ближайшее время усилители постоянного тока станут неотъемлемым измерительным прибором в научно-исследовательских институтах, лабораториях и на производстве.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Г. Шрамков, Электрические и магнитные измерения, ОНТИ, 1937.
2. О. Вернер, Чувствительные гальванометры постоянного и переменного тока, КУБУЧ, 1933.
3. Физический словарь, т. I, ОНТИ, 1936.
4. D. B. Penick, Rev. Sci. Instr., 6, 115 (1935).
5. L. A. Du-Bridge a. H. Brown, Rev. Sci. Instr., 4, 532 (1933).
6. I. A. Beardeen, Rev. Sci. Instr., 4, 271 (1936).
7. C. E. Winn-Williams, Phil. Mag., 6, 324 (1928).
8. К. Хелней, Электронные приборы в промышленности, ОНТИ, 1937.
9. I. M. Lafferty a. K. H. Kingdon, J. Appl. Phys., 17, 894 (1946).
10. Б. М. Царёв, УФН, 35, 251 (1948).
11. Н. О. Чечик, Заводская лаборатория, 14, 423 (1948).
12. Н. О. Чечик, ДАН СССР, 56, 157 (1947).
13. Методы экспериментальной электроники, ИЛ, 1949.
14. К. К. Аглинцев, Дозиметрия ионизирующих излучений, Гостехиздат, 1950.
15. В. Никонов и П. Куликовский, Астрономический журнал, 16, 54 (1939).
16. Н. Н. Павлов, Труды ГАО в Пулкове (1946).
17. И. Шинтльмейстер, Электронная лампа как прибор для электрических измерений, Гостехиздат, 1949.
18. K. W. Hauser, R. Jaeger u. W. Wahle, Wiss. Veröffentlich. a. d. Siemenskonzern, 2, 325 (1922).
19. H. Daene u. W. Husman, A. E. G. Mitteilungen, № 10 (1947).
20. D. B. Penick, Bell Laboratory Record, 14, 74 (1935).
21. G. E. Metkalf u. R. I. Thomson, Phys., Rev. 36, 1489 (1930).
22. C. D. Gould, Electronics, 20, 106 (1947).
23. Д. Г. Финк, Электроника, 1941.
24. L. A. Turner a. C. O. Siegelin, Rev. Sci. Instr., 4, 429 (1933).
25. Гарнвелл и Ливингуд, Экспериментальная атомная физика, ОНТИ, 1936.
26. Taylor a. Kerr, Rev. Sci. Instr., 4, 28 (1933).
27. A. O. Nier, E. P. Ney a. M. G. Ingraham, Rev. Sci. Instr., 18, 294 (1947).
28. P. A. Coldwell, Rev. Sci. Instr. 19, 85 (1948).
29. В. В. Круссер, ЖТФ, 27, 63 (1947).
30. Г. С. Цикин, Отрицательная обратная связь и её применение, Связьиздат, 1940.
31. D. G. Prinz, Journ. Sci. Instr., 24, 328 (1947).
32. Ф. А. Драпкина, ИЭСТ, 2, 50 (1940).
33. А. А. Ризкин, Электросвязь, 2, 7 (1938); 3, 88 (1939).
34. П. В. Брауде и Д. И. Воскобойник, ИЭСТ, 6, 21 (1941).
35. H. A. Thomas, Electronics, 12, 130 (1946).

36. M. Artzt, Electronics, Август 1945, стр. 112.
37. L. A. Turner, Rev. Sci. Instr. 4, 655 (1933).
38. Б. М. Царёв, Контактная разность потенциалов, Гостехиздат, 1949.
39. Г. Герман и С. Вагнер, Оксидный катод, Гостехиздат, 1949.
40. Wynn-Williams, Proc. Camb. Phil. Soc., 23, 810 (1927).
41. I. M. Englin, J. O. S. A., 18, 393 (1929).
42. Nelson, Rev. Sci. Instr., 1, 281 (1930).
43. Nottingham, Journ. Frankl. Inst., 209, 287 (1930).
44. Du-Bridge, Phys. Rev., 37, 392 (1931).
45. Н. О. Чечик, Заводская лаборатория, 4, 439 (1949).
46. Н. С. Хлебников, УФН, 29, 201 (1946).
47. С. А. Фридман и Н. О. Чечик, ЖТФ, 18, 35 (1948).
48. I. G. Brentano a. P. Inglebi, Journ. Sci. Instr., 16, 81 (1939).
49. I. A. Darbyshire, Electronics Engin., 18, 277 (1946).
50. G. C. Little, Electronics Engin., 19, 365 (1947).
51. В. Ф. Власов, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1949.

ОБМЕН

На стр. 122 и 123 в списке цитированной литературы по вине типографии номера всех литературных ссылок, начиная с 18, ошибочно уменьшены на единицу (следует читать 19 вместо 18 и т. д.).

Зак. 1461