

КАТОДНЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ *

Дж. Б. Джонсон, Нью-Йорк

Существует несколько различных типов осциллографов. Тот тип, которому посвящена эта статья, использует поток катодных лучей и потому называется катодным осциллографом. Принцип его действия весьма прост. Мы имеем в этом осцил-

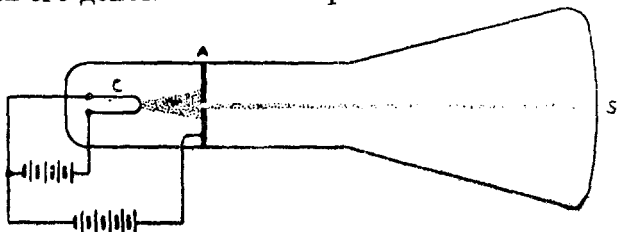


Рис. 1. Схема катодной трубки.

лографе два электрода в длинной evacuated стеклянной трубке (рис. 1); один из этих электродов может быть накаливаемой нитью, другой представляет собою пластинку с малым отверстием. Если между электродами приложена разность потенциалов, так что нить является катодом, а пластинка анодом, то электроны, испускаемые накаливаемой нитью, увлекаются к аноду. Некоторые из них проходят сквозь тонкое отверстие в аноде и идут в виде тонкого пучка электронов, в виде катодных лучей, вдоль трубки. На конце трубки располагается экран из флуоресцирующего вещества, который ярко светится в точке, где на него падают катодные лучи. Таким образом мы можем видеть место, где катодные лучи попадают на экран. Кроме того, в трубке помещается еще одна пара электродов в виде двух пластинок

* J. B. Johnson, The Bell System, «Technical Journal», 11, 1, 1932.

P и P_1 , так что катодные лучи проходят между этими пластинками (рис. 2). При помощи батареи или каким-либо иным путем мы налагаем потенциал между этими пластинками, так что одна из них будет положительной по отношению к другой. Так как электроны катодного луча являются отрицательными зарядами, то они, проходя между пластин-

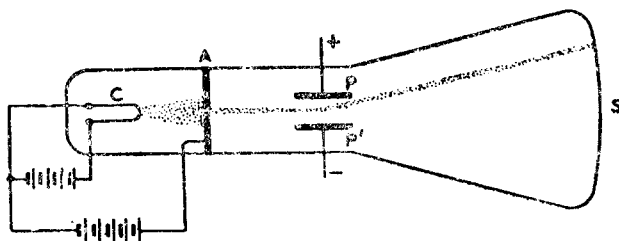


Рис. 2. Трубка с электростатическим отклонением.

ками, притягиваются к положительной пластинке и выходят, изменив свое направление под влиянием приложенного потенциала. Равным образом магнитное поле NS (рис. 3), расположенное перпендикулярно к пути катодного луча и

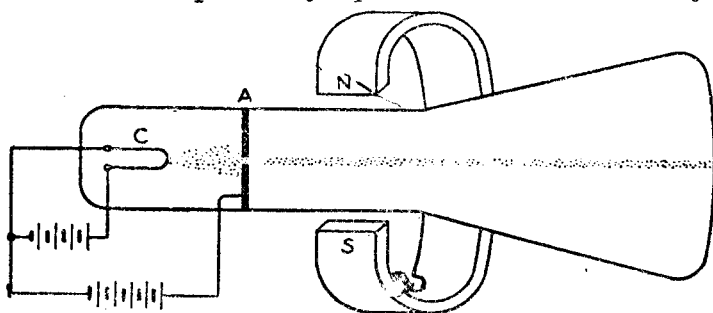


Рис. 3. Трубка с магнитным отклонением.

в плоскости чертежа, заставляет катодный луч, пройдя через поле, отклониться из плоскости чертежа. Величина отклонения служит мерой интенсивности приложенного магнитного или электрического поля. Таким образом мы имеем в этом катодном луче указатель, который нам показывает величину поля, отклоняющего его. Но эта стрелка замечательна тем, что она почти не обладает массой и инер-

цией. Поэтому она может следовать за изменениями приложенного поля чрезвычайно быстро. Ввиду такой особенности этот прибор весьма широко применяется при изучении электрических явлений в самых разнообразных видах, как в электрических машинах, телефонных аппаратах, радио-передатчиках и электрических волнах. Одно из в высшей степени эффектных применений катодного осциллографа связано с исследованием молнии; это, — по всей вероятности, наиболее интересная работа, посвященная молнии, с тех пор как ее электрическая природа была открыта Франклином 180 лет назад.

Рассмотрим ближе действие этой трубки. Скорость электронов по выходе их из отверстия в аноде может быть определена из уравнения энергии.

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV,$$

где V есть потенциал между катодом и анодом, e — заряд электрона, m и v — его масса и скорость. Из этого уравнения мы получаем такое соотношение между скоростью и ускоряющим потенциалом:

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} V}.$$

Величина $\frac{e}{m}$, как известно, равняется $1,77 \cdot 10^7$ CGSM, 1 вольт составляет 10^8 CGSM, а потому скорость электронов выражится

$$v = 5,95 \cdot 10^7 \sqrt{V} \text{ см/сек.}$$

Если ускоряющий потенциал равен 300 V, то скорость электронов по этой формуле в круглых числах будет $20 \cdot 10^9$ см/сек. В трубке длиной в 20 см электронов проходит от отклоняющих пластинок до экрана в $20 \cdot 10^9 = 1/50\,000\,000$ сек. $= 5 \cdot 10^{-8}$ сек. Если приложенный потенциал равен 30 000 V, то скорость приблизительно в 10 раз больше, нежели при 300 V; она будет поэтому равна $1/3$ скорости света. Изменение направления луча, сообщаемое ему отклоняющими пластинками, передается поэтому концу

луча в весьма короткий промежуток времени, и луч безопытно передает весьма быстрые колебания потенциалов пластинок.

Посмотрим теперь, каким образом луч реагирует на потенциал, приложенный к пластинкам. Пусть луч распространяется нормально вдоль трубки со скоростью v , и пусть (рис. 4) он проходит между двумя пластинками длиной l , отстоящими на расстоянии d и обладающими разностью

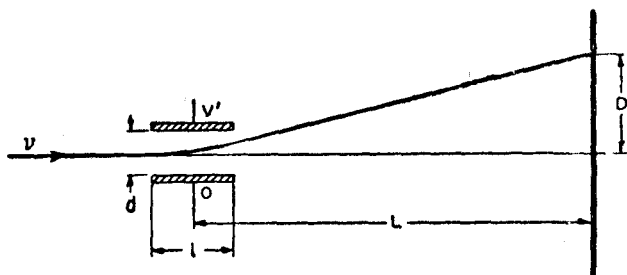


Рис. 4. Электростатическое отклонение.

потенциалов V' . В то время, когда луч проходит между пластинками, электроны испытывают ускорение

$$a = \frac{e}{m} E = \frac{e}{m} \cdot \frac{V'}{d}.$$

Это продолжается в течение времени $t = \frac{l}{v}$. Поэтому скорость в перпендикулярном направлении, приобретаемая за это время, будет:

$$v' = at = \frac{e}{m} \frac{V'}{d} \cdot \frac{l}{v}.$$

После этого луч идет по прямой линии к экрану, который он пересекает на расстоянии D от нормального положения. Отклонение D определяется из следующего очевидного соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{D}{L} = \frac{v'}{v} &= \frac{e}{m} \cdot \frac{V'}{d} \cdot \frac{l}{2 \frac{e}{m} V} = \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V'}{V}, \\ D &= \frac{1}{2} \cdot \frac{lL}{d} \cdot \frac{V'}{V}. \end{aligned}$$

Полученное выражение дает следующее интересное конструктивное указание: для высокой чувствительности пластинки должны быть длинными и быть расположены близко друг к другу, но они не должны пересекать пути отклоненного луча. Если мы хотим получить некоторое максимальное отклонение D с трубкой определенной длины L , то соотношение между расстоянием пластинок и их длиной должно быть следующее:

$$\frac{d}{l} = \frac{D}{L},$$

как это легко видеть из рис. 4.

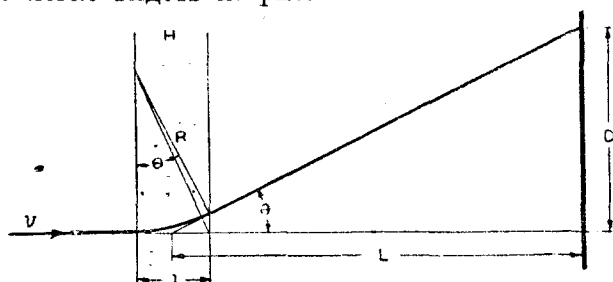


Рис. 5. Магнитное отклонение.

Магнитная чувствительность трубки является более неопределенной, потому что границы магнитного поля менее резки, нежели границы электрического поля. Если луч, создаваемый ускоряющим потенциалом V , проходит сквозь область шириной l (рис. 5), в которой имеется поперечное магнитное поле напряженностью H , то путь пучка будет дугою круга радиусом

$$R = \frac{mv}{eH} = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2mV}{e}}.$$

Выйдя из магнитного поля, луч продолжает свой путь прямолинейно до экрана, где полное отклонение его от нормали пусть будет D . Если угол отклонения θ невелик, то мы имеем с большим приближением:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{D}{L} = \frac{l}{R} = lH \sqrt{\frac{e}{2mV}},$$

откуда

$$D \approx lLH \sqrt{\frac{l}{2mV}}$$

Если ввести вместо электромагнитных практические единицы, то выражение приобретает вид:

$$D \approx \frac{3lLH}{V \sqrt{V}}$$

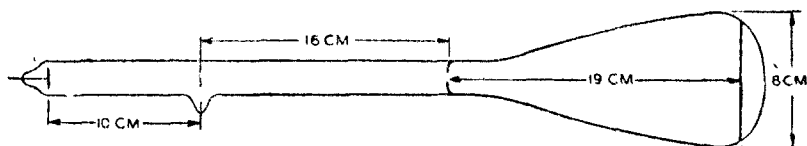


Рис. 6. Первый катодный осциллограф, Ф. Браун, 1897.

После этого элементарного изложения действия катодного осциллографа обратимся к истории развития этого прибора.

Первое указание на идею о том, что катодные лучи могут быть использованы для измерения магнитного поля, отно-

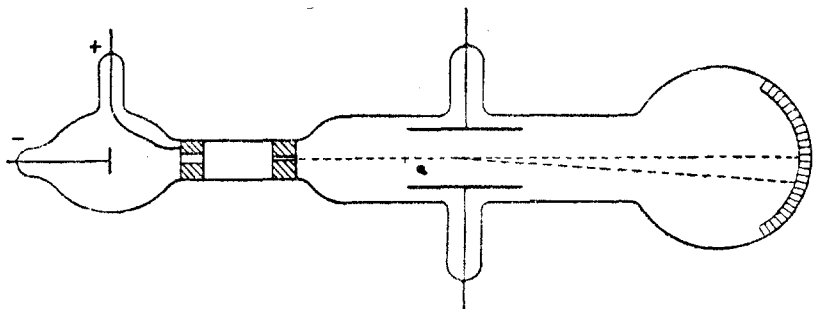


Рис. 7. Трубка для измерения, Дж. Дж. Томсон, 1897.

сится к 1894 г., когда Гесс² во Франции предложил пользоваться такой трубкой для вычерчивания кривых. Однако первое применение этой идеи принадлежит Фердинанду Брауну (1897)³, с тех пор прибор стал называться трубкой Брауна.

Трубка Брауна имеет весьма простое устройство (рис. 6).

Катодом в ней служит диск, анодом — проволока, спаянная сбоку; далее, имеется диафрагма в виде просверленного отверстия и флуоресцирующий экран из сернистого цинка. В трубке имеется воздух при пониженном давлении. Ток от электростатической машины создает разряд в остатках газа, в результате чего появляются катодные лучи.

Интересно отметить, что изобретение трубки было сделано до того, как была разгадана природа катодных лучей. Это произошло в том самом году, когда Дж. Дж. Томсон в Англии и Кауфман в Германии, тот и другой пользуясь трубками, почти идентичными с трубкой Брауна, показали, что катодные лучи обладают зарядом и массой. Трубка Томсона показана на рис. 7.

Трубка Брауна немедленно нашла себе различные применения.

Одна из наиболее плодотворных областей для такого применения оказалась область передачи по радио. Многочисленные работы в этом направлении были сделаны Ценнеком и его школой.

После изобретения этой трубки в нее были внесены различные усовершенствования, которые сделали ее применение более удобным. Рис. 8—12 показывают некоторые конструкции трубок того времени. В 1905 г. Венельт предложил пользоваться горячим катодом, покрытым окисью

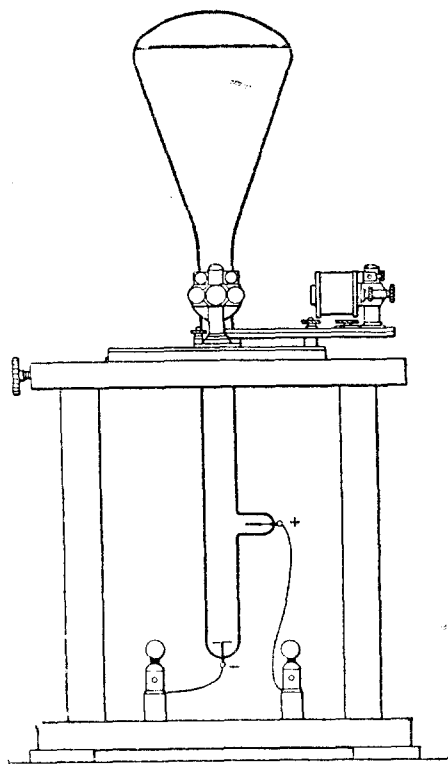


Рис. 8. Эберт и Гофман, 1898 — Трубка Гейслера.

какого-либо щелочноземельного металла; такие катоды за несколько лет до того оказались удобными источниками интенсивного электронного излучения. Венельт сконструировал

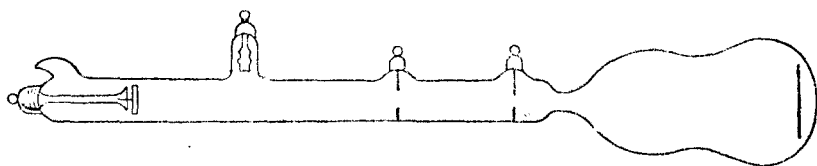


Рис. 9. Мак Грегор — Моррис, 1902 — Трубка Коссора ⁶.

ровал трубку (рис. 13), которая могла работать в сети при 220 V. Это было, вероятно, первое применение оксидных катодов. В следующие годы было построено известное количество экспериментальных трубок с накаливаемыми катодом,

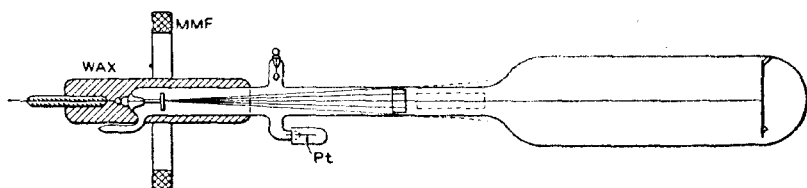


Рис. 10. Райан, 1903 — трубка Мюллер — Ури ⁷.

дами, но прошло почти 20 лет, прежде чем была сконструирована действительно удачная трубка с накаливаемым катодом, пригодная для работы в сети низкого напряжения. Это была

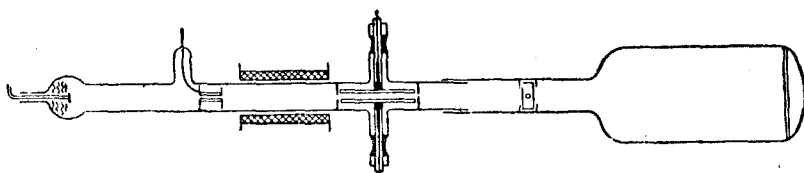


Рис. 11. Рожанский, 1911 ⁸.

трубка Вестерн-Электрик № 224¹¹, которую в дальнейшем мы опишем подробно.

Другая трубка этого типа, построенная Арденом и Гартелем¹², показана на рис. 14.

После Брауна и Венельта наиболее существенное изменение в конструкции было сделано Дюфуром во Франции

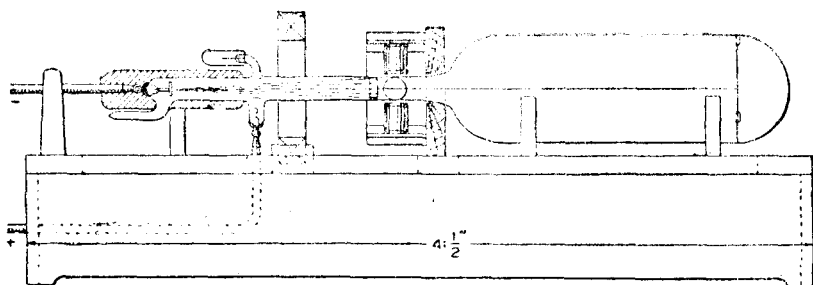


Рис. 12. Бреугтон, 1913 — трубка Макса Коля ⁹.

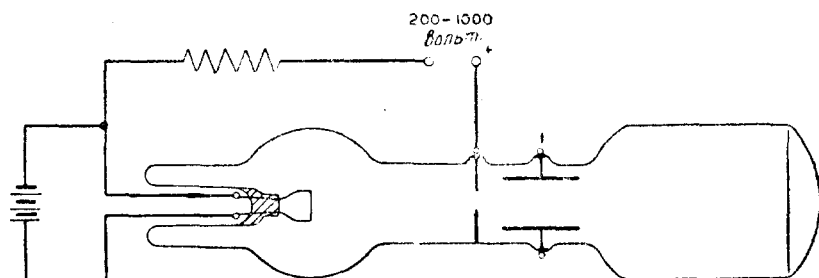


Рис. 13. Венен, 1905.

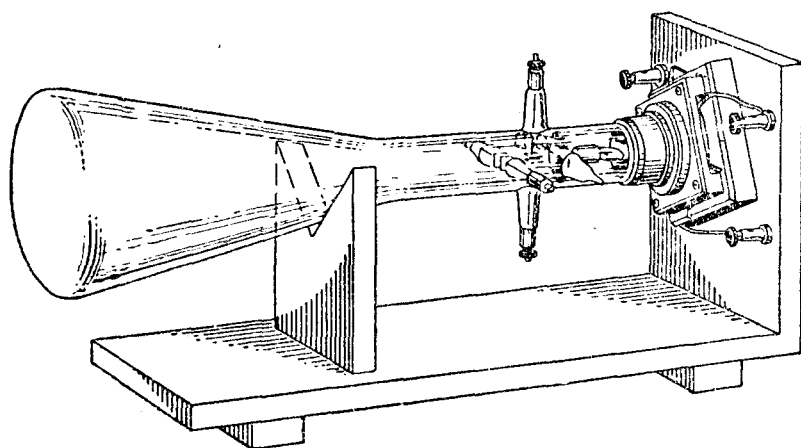


Рис. 14. Арден-Гартель, 1930 — трубка Лейбольда.

в 1914 г. До этого времени фиксирование картины, получающейся на флуоресцирующем экране, производилось с помощью фотографической камеры. Это обычно требовало многократного повторения картины, происходящей при быстром процессе, для того чтобы получить достаточную экспозицию.

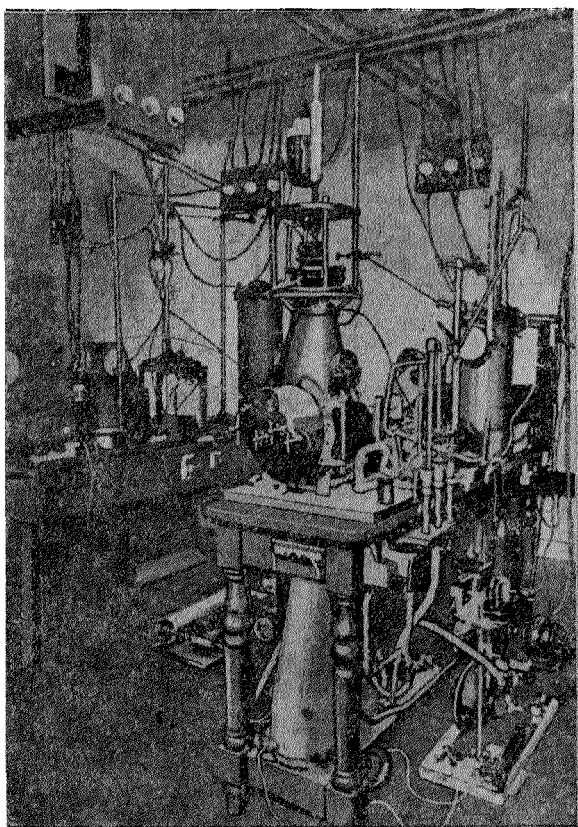


Рис. 15. Осциллограф-Дюфура, 1923 ¹⁴.

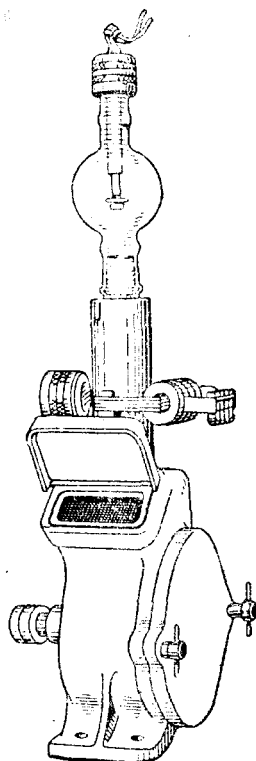


Рис. 16. Вуд, 1923 ¹⁵.

Дюфур опустил флуоресцирующий экран и расположил фотографическую пластинку внутри трубки так, что катодные лучи могли действовать непосредственно на пластинку. Если катодные лучи попадают непосредственно на фотографическую эмульсию, то запись может быть сделана в значительно более короткий промежуток времени, нежели в том

случае, когда свет флуоресцирующего экрана фокусируется при помощи линзы на фотографической пластинке. Внесение фотографической пластинки внутрь прибора, конечно, влекло за собой некоторое усложнение конструкции: появилась необходимость в механизме для движения пластинки внутри трубки для вынимания и помещения на место пластинок; появилась необходимость также в насосах для получения и поддержания вакуума. Прежние стеклянные конструкции были почти целиком оставлены и заменены металлическими. Все в совокупности приняло вид сложной аппаратуры, которая, однако, оказалась весьма полезной.

За последние несколько лет было развито несколько конструкций трубок этого типа. Наряду с трубкой Дюфура можно назвать

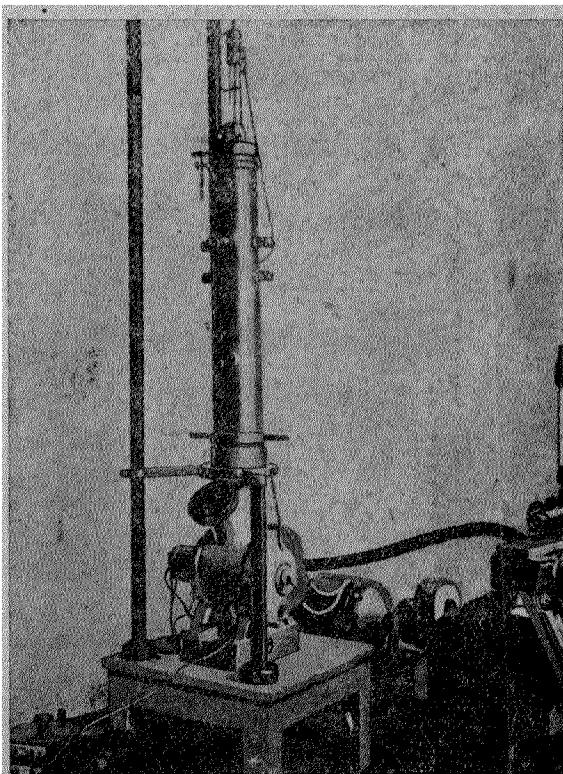


Рис. 17. Вестингауз-Нориндер, 1928 ¹⁷.

трубку Роговского в Германии, Вуда в Англии, Бергера в Швейцарии, Нориндера в Швеции, компании Вестингауз и Всеобщей электрической компании в Америке (рис. 16 — 18, 21). Во всех этих приборах мы имели сложную конструкцию трубки и контрольной сети. Некоторые трубки были построены так, что они работали во время одного только импульса волны в 60 периодов. В других

имелось остроумное переключающее приспособление, которое включало трубку в самом начале изучаемого электрического импульса, и трубка затем работала, записывая остальной импульс. Если мы примем во внимание, что им-

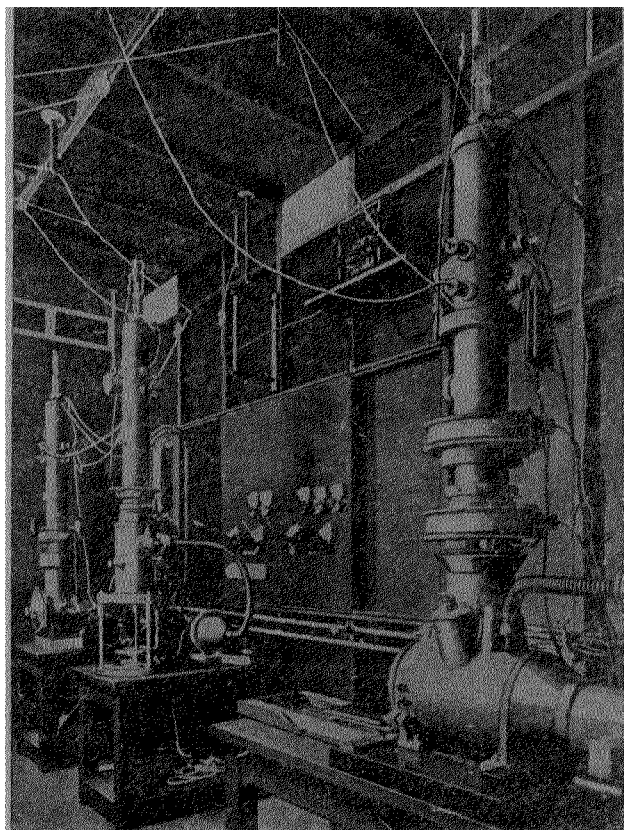


Рис. 18. Нориндер, 1930 — трубка осциллографов.¹⁸

пульсы могут возникать вследствие удара молнии в линию, то мы поймем, что может существовать нечто „быстрее молнии“.

За последние годы дальнейший шаг вперед был сделан Максом Кнолем¹⁶. Он значительно упростил работу трубки, снабдив конец ее тонким окошком наподобие катодной

трубки Кулиджа. Таким образом катодные лучи, пройдя через тонкий экран из металла или целофана, падали на фотографическую пластинку, расположенную вне трубки.

Таким образом мы имеем три типа катодных осциллографов: 1) осциллограф типа трубки Брауна, состоящей из стеклянной трубки с флюоресцирующим экраном и требующей относительно высокого вольтажа; 2) трубки типа только что описанной трубки Дюфура с непосредственной записью на фотографической пластинке или фильме; 3) трубки с горячим катодом и с относительно низким действующим потенциалом.

К этому последнему типу относится катодный осциллограф Вестерн-Электрик № 224. Так как это и есть та трубка, над которой я непосредственно работал, то я остановлюсь на некоторых проблемах, связанных с ее конструкцией и действием.

Схема этой трубки, приведенная на рис. 19, в настоящее время широко известна *, и я буду описывать ее лишь по стольку, поскольку необходимо остановиться на обосновании тех или иных ее особенностей.

Прежде всего мы нуждаемся в удобной трубке для работы на ба-

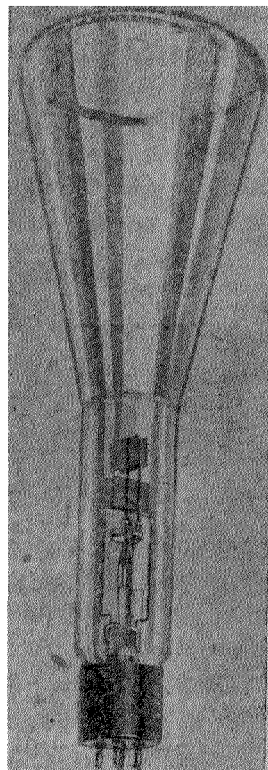


Рис. 19. Трубка Вестерн-Электрик. Western Electric.

* После того как этот доклад был прочитан, трубка была в некоторых отношениях изменена. Стеклянная оболочка для нити была заменена металлической, анод и отклоняющие пластинки укреплены на штампованных изолированных подставках. Эти изменения делают конструкцию более устойчивой и обеспечивают в большей степени точную установку различных частей. Конец трубки изменен таким образом, что поверхность его сделана цилиндрической вместо сферической, что допускает более непосредственный контакт между флюоресцирующим экраном и фотографическим фильмом.

тарях обычных вакуумных трубок. Поэтому необходим катод в виде накаливаемой нити. Анод представляет собою металлическую трубку, расположенную на коротком расстоянии от катода, причем между ними расположен металлический диск с отверстиями, через которые электроны проходят к аноду. Эти электроды представлены на рис. 20 и обозначены, соответственно, буквами *C*, *A*.

Электроны идут от катода внутрь анода, причем некоторые из них проходят сквозь анод и образуют электронный пучок. Далее, по причинам, которые будут указаны ниже, в трубке находится некоторое количество газа, и это

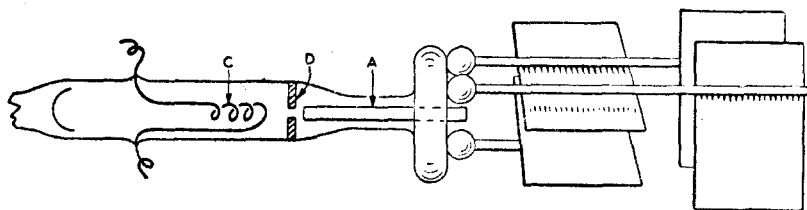


Рис. 20. Диаграмма электронной пушки.

предъявляет два требования к конструкции электронной пушки. Во-первых, присутствие газа создает значительную ионизацию внутри трубки, когда туда попадают электроны. Вследствие этого большая часть тока направлялась бы к диску и шла бы вне анода. Поэтому катод и анод заключены в маленькой трубке, имеющей размеры меньше свободного пути электрона в газе, вследствие чего не может возникнуть заметная ионизация. Однако некоторая ионизация получается в пространстве между катодом и анодом и положительные ионы направляются к нити. Если нить не защищена, то оксидный слой разрушается под действием этой бомбардировки в два или три часа. Поэтому нить навита в форме спирали, расположенной коаксиально с анодом и с отверстием в диске так, что она оказывается вне пути ионов. Таким путем нить сохраняется в течение нескольких сот часов работы.

Этим истощаются внутренние части электронной пушки. Снаружи на ней смонтированы две пары отклоняю-

щих пластинок, которые управляют движением электронов после того, как они вылетают из пушки. Для того чтобы избежать больших разностей потенциала между анодом и отклоняющимися пластинками, одна пластинка из каждой пары соединяется непосредственно с анодом и только другая приобретает сообщаемый ей переменный потенциал. Что

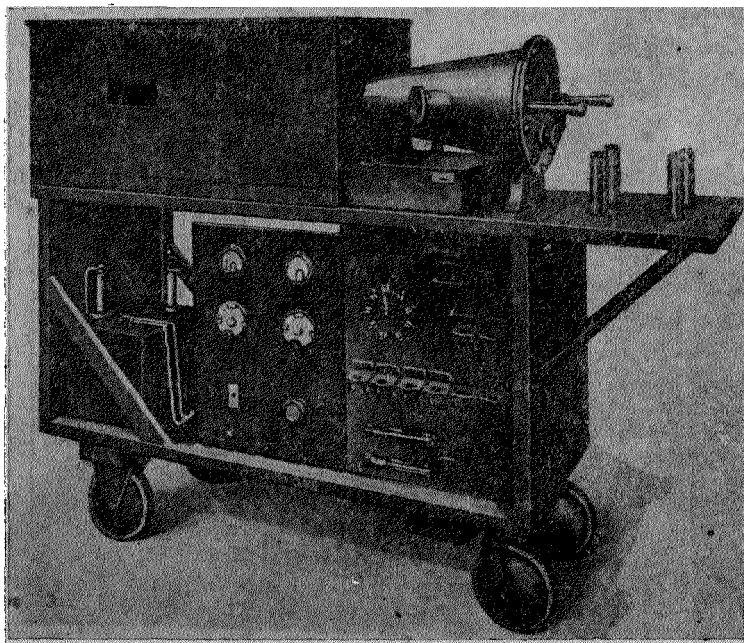


Рис. 21. Осциллограф General Electric, 1928 ¹⁹.

касается размеров и расстояния пластинок, то они рассчитаны так, чтобы создать максимальную чувствительность для данного полного отклонения. Чувствительность составляет приблизительно 1 мм отклонения на каждый приложенный вольт к отклоняющим пластинкам, или 1 мм на каждый ампервиток в паре малых катушек, расположенных вне трубки. Эти цифры даны для нормального ускоряющего потенциала в 300 V.

Плоский конец трубки, куда ударяет электронный пучок, покрыт флуоресцирующим веществом. Флуоресцирую-

ший порошок представляет собою смесь кремнекислого цинка и вольфрамовокислого кальция, специально приготовленных для получения максимальной люминесценции. Кремнекислый цинк дает зеленое свечение, к которому глаз весьма чувствителен, а вольфрамовокислый кальций — фиолетовое свечение, отличающееся большой фотографической активностью, так что при данной смеси одна и та же трубка может быть использована как для фотографических, так и для визуальных наблюдений.

Как было сказано раньше, в трубке остается некоторое количество газа. Назначение этого газа — создать небольшую ионизацию в трубке для того, чтобы не допускать скопления чрезмерно больших зарядов на стеклянных стенках и экране. Электроны, оседающие на стекле, нейтрализуются положительными ионами, создаваемыми в газе. Электронный ток, равный току в пучке, идет в обратном направлении сквозь газ к аноду. Главный результат этого перемещения электронов состоит в том, что в трубке образуется отрицательный пространственный заряд, который уменьшает скорость электронов, прежде чем они попадут на экран, как если бы ускоряющий потенциал был уменьшен приблизительно на 50 V.

Другое более важное назначение газа состоит в том, чтобы свести электроны в пучке в более резкий фокус на экране. Пучок является расходящимся по двум причинам: во-первых, потому, что он является таковым с самого начала, а во-вторых, — вследствие естественного электростатического отталкивания отдельных электронов в пучке. Газ служит для компенсации этих действий следующим образом: когда пучок электронов идет вдоль трубки, некоторые электроны сталкиваются с атомами газа и разбивают эти атомы на электрон и положительный ион. Удар электрона практически не смещает массивный положительный ион с положения, которое он занимал в момент удара, между тем как два электрона непосредственно выбрасываются с пути. В результате вдоль длины пучка получается колонна положительной ионизации с окружающим ее отрицательным пространственным зарядом. Это создает радиаль-

ное электростатическое поле, которое стремится искривить траекторию внешних электронов пучка внутрь, к центру. Величина этого действия зависит от степени дифференциальной ионизации. Последняя, в свою очередь, тем больше, чем выше давление газа и чем сильнее ток в пучке. Давление газа должно быть достаточно низким для того, чтобы большая часть электронов достигла экрана, а ток в пучке должен быть таким, чтобы получилось желательное фокусирующее действие. Чем тяжелее ионы, тем ниже может быть давление. Таким образом условия для фокусировки зависят от рода и давления газа, скорости электронов, силы тока в пучке и длины трубки. В трубке 224, наполненной аргоном при давлении 0,01 мм, фокусировка наступает приблизительно при токе в 20 μ A в пучке. Меньшие токи образуют большое нефокусированное пятно, большие токи образуют фокус, не дойдя до экрана с соответствующим увеличением пятна на экране. Таким образом пятно на флуоресцирующем экране фокусируется регулировкой тока накала катода.

Помимо фокусировки электронов и предупреждения скопления зарядов на трубке газ играет роль, также и в различных других отношениях. Весьма любопытный эффект газа состоит в том, что он понижает чувствительность трубки при малых отклоняющих потенциалах. Если к паре отклоняющих пластинок приложить равномерно изменяющийся вольтаж, так чтобы пятно перемещалось по экрану, то пятно на мгновение как бы колеблется около центра экрана и кажется там более ярким. Эффект этот наблюдался всегда, но особое внимание ему было уделено недавно проф. Беделлем²⁰. Объяснение связано с пространственным зарядом между отклоняющими пластинками. Пучок электронов создает медленно движущиеся положительные ионы и электроны в газе вдоль своего пути между пластинками. Когда к пластинкам прикладывается вольтаж, то положительные ионы направляются из пучка к отрицательной пластинке, а такое же количество электронов направляется к положительной пластинке. Пространственный заряд, образуемый электронами и ионами, создает электрическое поле, противо-

положное полю, обусловленному наложенным потенциалом. Наибольший пространственный заряд создается у отрицательной пластинки, где скопляются медленно движущиеся положительные ионы. Пространство между пластинками в середине остается почти свободным от поля, и здесь отклонение пучка незначительно до тех пор, пока вольтаж не станет больше того, при котором все образованные ионы будут увлечены к пластинкам. Вычисление в согласии с опытом показывает, что этот вольтаж составляет от 2—3 V в ту и другую сторону от нуля.

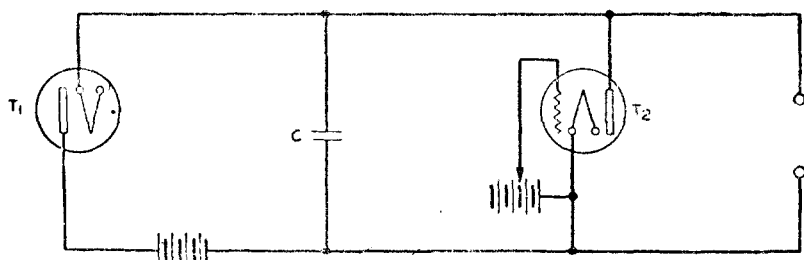


Рис. 22. Схема для регулировки заряда конденсатора ¹¹.

Теперь мы закончим описание устройства и действия некоторых осциллографов и перейдем к рассмотрению их применений.

Катодный осциллограф есть, по существу, прибор, вычерчивающий в прямоугольных координатах кривые, дающие связь между двумя количествами, представляемыми полями между отклоняющими пластинками. Часто одним из этих количеств является время, как и в обыкновенном осциллографе с движущимся зеркалом, тогда как другим является некоторая электрическая величина. В таком случае мы говорим, что мы записываем форму волны. Для подобной записи мы должны иметь возможность заставлять пятно двигаться с постоянной скоростью. Один из наиболее простых и подходящих способов для создания линейной оси времени ²¹, пригодных, по крайней мере, для маловольтных трубок, основан на использовании двух термоионных ламп с целью регулировки заряда конденсатора, как показано на рис. 22. Одна лампа здесь является простой

двухэлектродной трубкой T_1 , ограничивающий заряджение конденсатора C , так чтобы вольтаж на конденсаторе возрастал линейно с течением времени по уравнению

$$V = Cit.$$

Вторая трубка T_2 наполнена газом и имеет свойство пропускать ток только в том случае, если вольтаж на ней достигает определенного значения, которое, в свою очередь, регулируется потенциалом сетки. Когда потенциал конденсатора

достигает этой величины, лампа сразу дает возможность разрядиться конденсатору, и затем процесс равномерного заряджения начинается вновь. Конденсатор соединен с од-

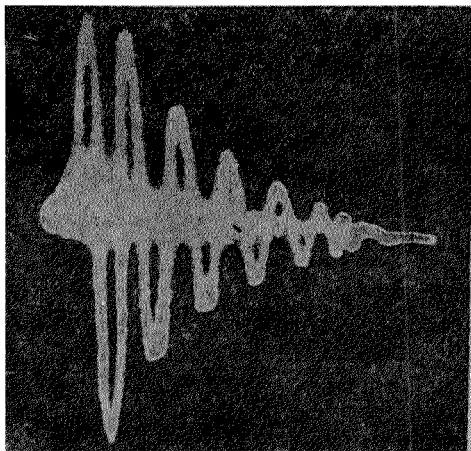


Рис. 23. Разряд конденсатора через индуктивное сопротивление.

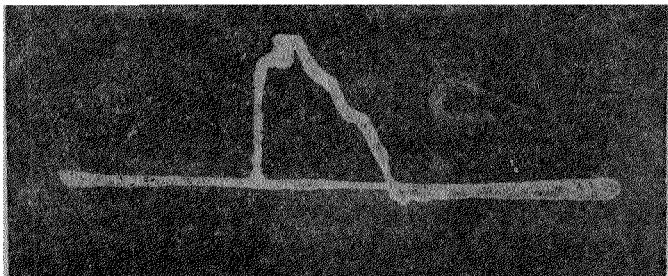


Рис. 24. Разряд конденсатора через вибрирующий контакт.

ной парой пластинок осциллографа, так что пятно под влиянием возрастающего потенциала конденсатора равномерно перемещается по экрану в одном направлении и затем со значительно большей скоростью возвращается в обрат-

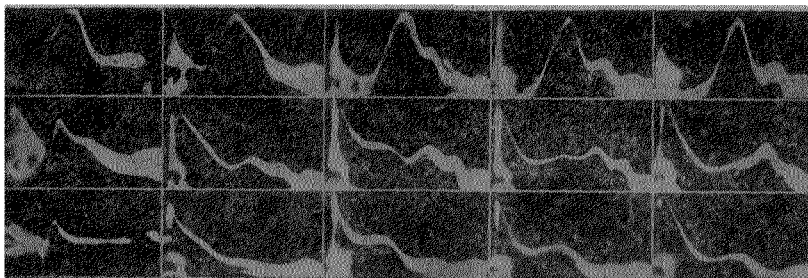


Рис. 25. Токи действия возбужденного нерва лягушки ²².

ном направлении. Этот процесс может повторяться один раз в секунду или много тысяч раз в секунду, в зависи-

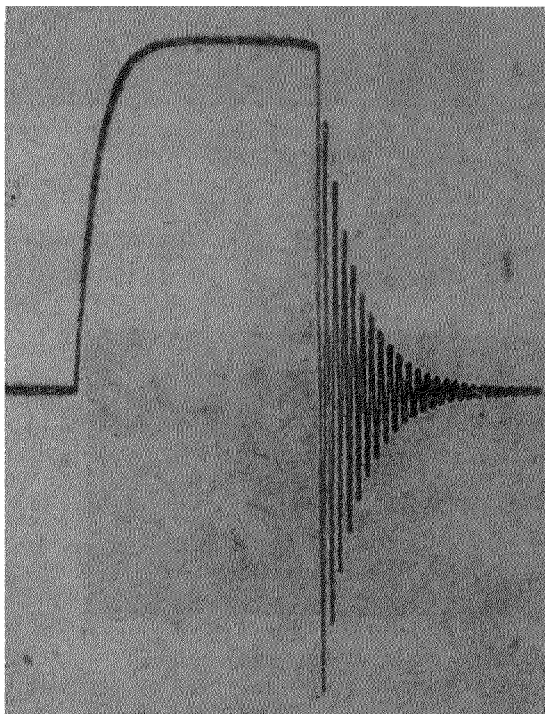


Рис. 26. Замыкание тока непосредствен. контактом и размыкан. через настроенную колебательную цепь, — Дюфур ¹⁴.

мости от частоты исследуемой волны.

На рис. 23—29 приведены записи, сделанные в шкале времени. Рис. 23—25 представляют фотографии, сделанные при помощи осциллографа „Вестерн-Электрик“, рис. 26—27 — при помощи осциллографа Дюфюра и рис. 28—29 — при помощи осциллографа типа Роговского.

Другой путь применения осциллографа состоит в записыва-

нии соотношений вне зависимости от времени. В качестве простого примера можно указать кривую тока — напряже-

ния для сопротивления, сквозь которое проходит переменный ток. Пятно перемещается взад и вперед по прямой линии, наклон которой характеризует обратную ве-

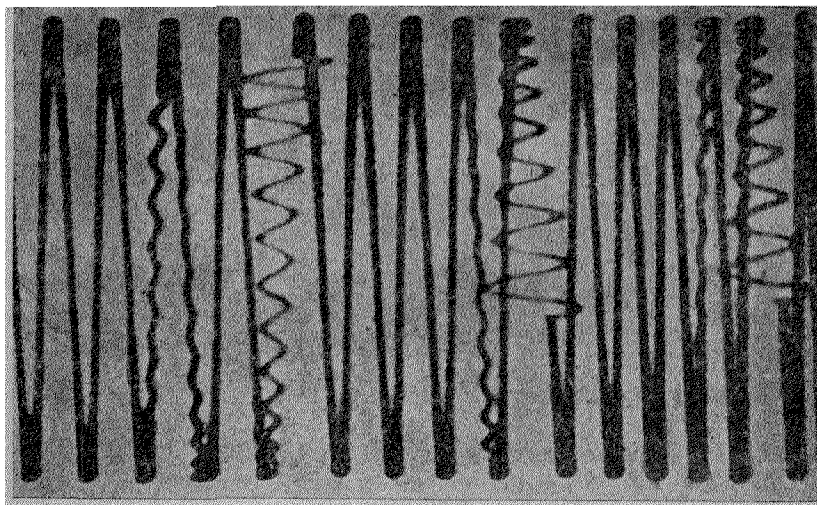


Рис. 27. Форма волны, при 8 500 000 циклов — Дюфур, 1914.

личину сопротивления (рис. 30а). Если к сопротивлению присоединена самоиндукция, то пятно уже не перемещается по одной прямой; получающийся эллипс говорит нам о величине индуктивного сопротивления (рис. 30b). Этот метод открывает весьма разнообразные возможности применения. Например, вместо сопротивления мы можем взять газовый разряд, свойства которого мы желаем изучить. Одним из применений этого метода является запись кривых гистерезиса ферромагнитных материалов²⁵ (рис. 31). Рис. 32 иллюстрирует применение этого метода к изучению искажения в усилителе.

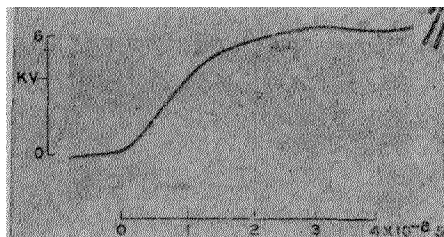


Рис. 28. Фронт волны потенциала, распространяющейся в проводнике.

Предположим, что мы налагаем на каждую пару отклоняющих пластинок потенциал от двух различных осцилляторов. Если осцилляторы делают в точности одно и то же число колебаний в секунду, то картина в трубке остается в стационарном состоянии, но если частоты осцилляторов различаются хотя бы ничтожно мало, картина изменяется в соответствии с

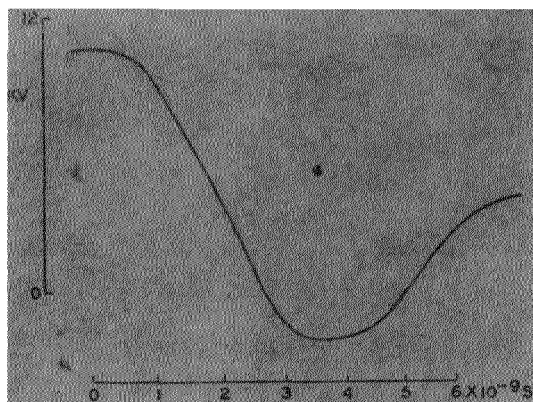


Рис. 29. Начало искры в газе ²⁴.

различными соотношениями фаз обоих осцилляторов. Этот способ является одним из наиболее чувствительных для сравнения и калибрования точных осцилляторов; мы можем назвать его методом фигур Лис-

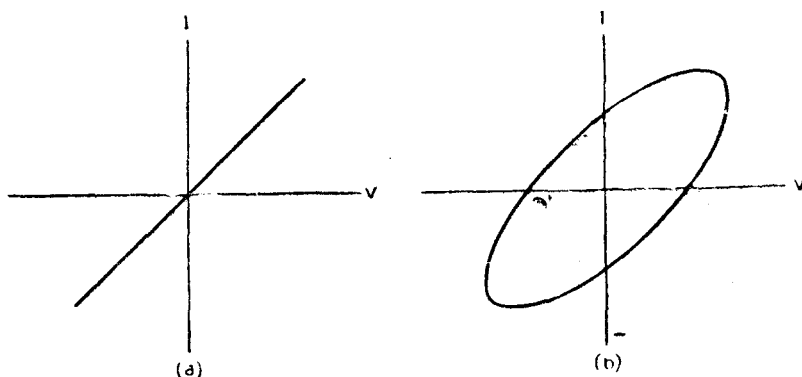


Рис. 30. Диаграмма кривой тока — напряжения.

сажу. Рис. 33 показывает вид некоторых из этих стационарных фигур Лиссажу.

Другой метод сравнения частот осциллятора был назван методом „зубчатки“. В этом методе потенциал от источника низкой частоты расщепляется на две равные

компоненты, различающиеся по фазе на 90° . Эти два потенциала накладываются на отклоняющиеся пластинки причем получается на экране стационарный круг. Потенциал от осциллятора более высокой частоты вводится в цепь между катодом и анодом трубки, так что чувствительность трубки изменяется в соответствии с большей из сравнимых частот. Поэтому круг искажается в зубчатку, как это изображено на рис. 34, при условии если большая частота является точным кратным меньшей. Если отношение частот не является рациональным числом, зубчатка вращается, обнаруживая недостаток синхронизации.

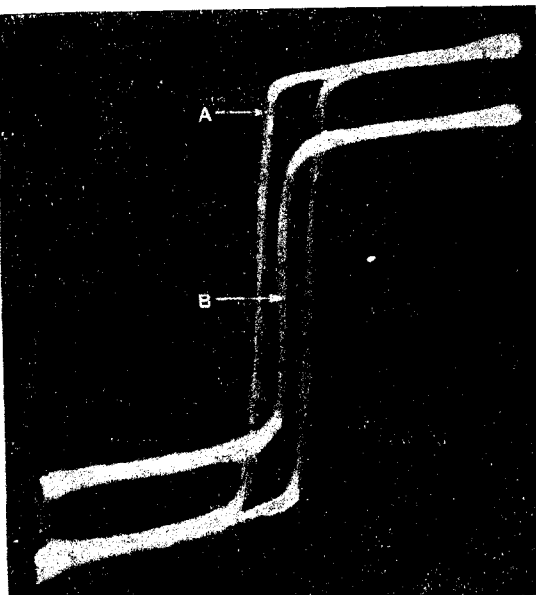


Рис. 31. Кривая гистерезиса: а) железа, в) пермаллой.

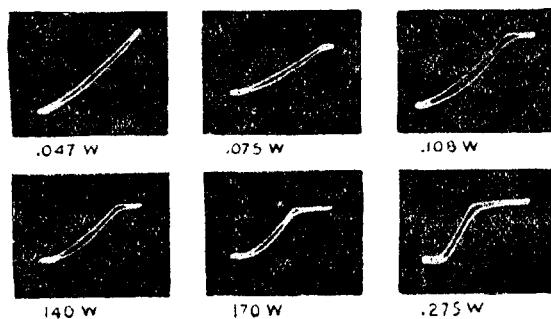
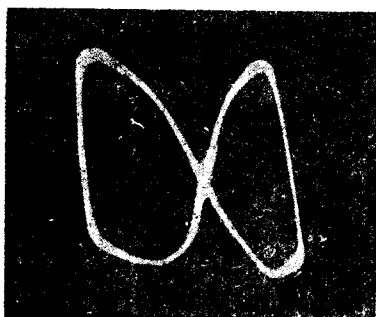
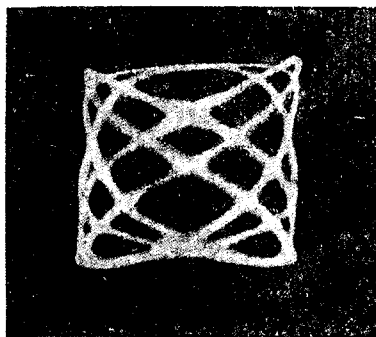


Рис. 32. Искажение в катодном усилителе ²⁶.

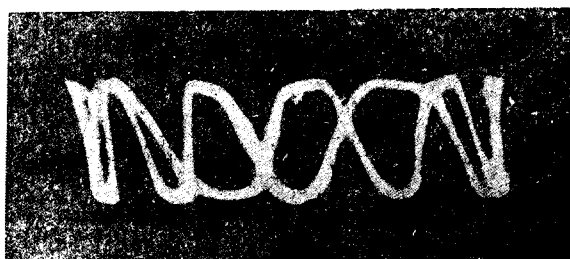
Два интересных применения к радиотелефонии иллюстрируются рис. 35 и 36. Рис. 35 дает две характери-



2 : 1



5 : 4



8 : 1

Рис. 33. Сравнение частот.

стики трансатлантической связи; здесь трубка регистрирует амплитуду приходящего сигнала в зависимости от количества модулирующих частот. На рис. 36 дана диаграмма величины и направления атмосферных помех как они обнаруживаются на экране трубки осциллографа.

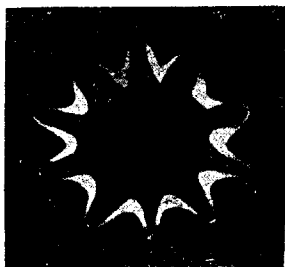


Рис. 34. Сравнение частот при помощи „шестерни“.

Для цели демонстрации трубка может быть использована для определения отношения заряда электрона к массе e/m . Классический метод очевиден из вывода чувствительности

трубки, данного выше. А именно, величина $\frac{c}{m}$ быть может получена из двух основных соотношений

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV; \quad mv = eHR.$$

Метод этот связан с некоторыми ошибками, так как отклоняющее поле не может быть определено точно: кроме того, ошибки вызываются пространственным зарядом трубки.

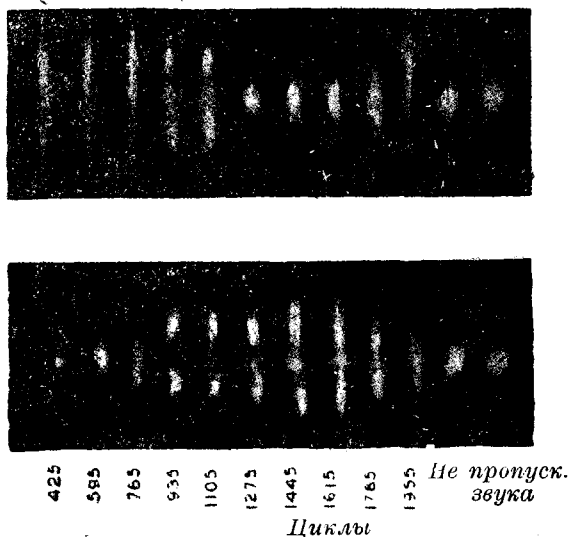


Рис. 35. Характеристика пропускания транс-атлантической коротковолновой радиосвязи ²⁷.

Более точный метод определения e к m принадлежит Г. Бушу²⁸. Длинный соленоид, по которому проходит постоянный ток, создает однородное магнитное поле в трубке параллельно ее оси. Электроны идут в этом поле по спиралям таким образом, что когда поле имеет одно из ряда определенных значений, электроны фокусируются на экране. Эти критические значения магнитного поля даются уравнением

$$H = \frac{2\pi}{L} \sqrt{\frac{2m}{e}} V;$$

где $n = 1, 2, 3$ и т. д., L — длина пучка и V — ускоряющий потенциал.

В этом методе получаются меньшие ошибки, если ток накала сделать настолько малым, чтобы получалось едва заметное пятно после магнитной фокусировки.

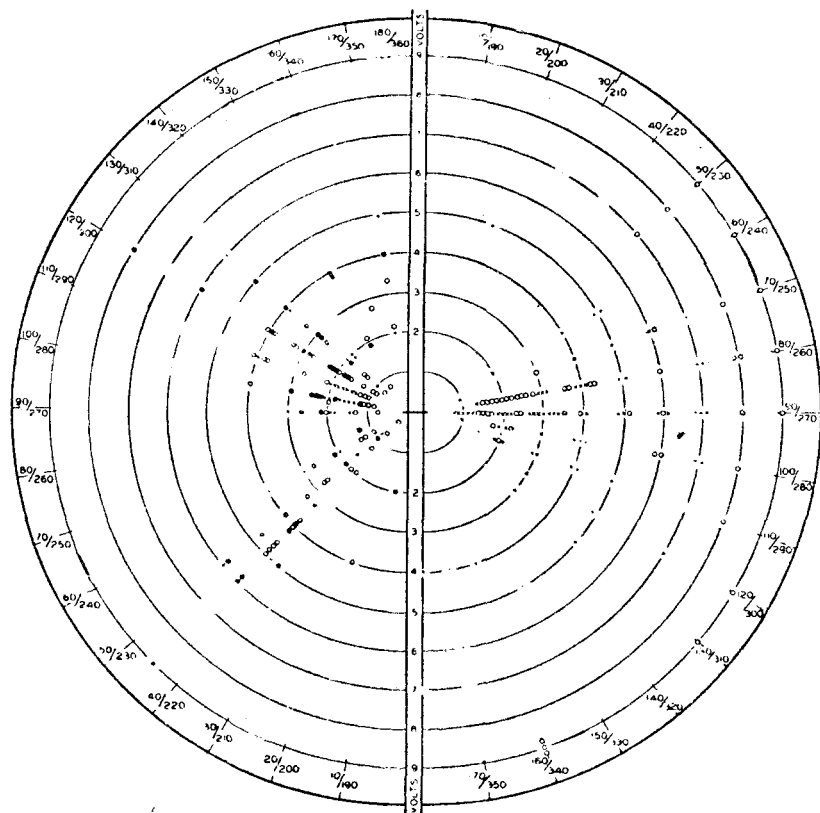


Рис. 36. Азимутальное распределение атмосферных помех.

С самого начала катодный осциллограф был признан прибором, обещающим большие возможности применения. Однако, его применение было ограничено трудностями поддержания постоянного вакуума, нахождения подходящего источника высокого потенциала, а также громоздкостью аппаратуры. Мы видели, что почти за 30 лет, прошедших

со времени изобретения трубки, были внесены весьма существенные улучшения как в конструкцию трубки, так и в приемы ее использования. Введение трубок, работающих при низких потенциалах, обладающих высокой чувствительностью и умеренной стоимостью, быстро обеспечило распространение катодного осциллографа, так что в настоящее время они применяются почти в каждой лаборатории, где производятся измерения высокой частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Более подробное изложение истории катодного осциллографа дано Паусратом („Apparatus and Technique for Producing and Recording Curves of Alternating и т. д.“, Helios, 1912) и Мак Грегор Моррисом и Майнсом („Measurements in Electrical Engineering by Means of Cathode Rays“), JI. Inst. El. Eng., **63**, стр. 1656, 1925.
2. Hess A., Compt. rend. **119**, стр. 57, 1894.
3. Braun F., Nied. Ann., **60**, стр. 552, 1897.
4. Thomson J. J., Phil. Mag., **44**, стр. 293, 1897.
5. Ebert u. Hoffmann, E. T. Z. **19**, стр. 405, 1898.
6. Mc. Gregor-Morris. Engineering, **73**, стр. 754, 1902.
7. Ryan. H. J., Am. Ins. E. Eng. Trans., **22**, стр. 539, 1903.
8. Roschansky D., Ann. d. Phys., **36**, стр. 281, 1911.
9. Broughton H. H., Electrician, **72**, стр. 171, 1913.
10. Wehnelt A., Phys. Zeit., **6**, стр. 732, 1905.
11. Johnson J. B., JI. Am. Opt. Soc. R. S. I., **6**, стр. 701, 1922.
12. Hartel H. von, Zeit. f. Hochfr. Techn., **34**, стр. 227, 1929.
13. Dufour A., Comptes rend., **158**, стр. 1339, 1914.
14. Dufour A., Oscillographe cathodique, Etienne Chiron, Paris 1923.
15. Wood A. B., Phys. Soc. Lond. Proc., **35**—2, стр. 109, 1923.
16. Knoll Max., Z. f. tech. Phys., **10**, стр. 23, 1929.
17. Norinder H., A. I. E. E. Trans., **47**, стр. 446, 1928.
18. Norinder H., Zeit. f. Phys., **63**, стр. 672, 1930.
19. Lee E. S., C. E. Rev., **31**, стр. 104, 1928.
20. Bedell F. u. Kuhn J., Phys. Rev., **36**, стр. 993, 1930.
21. Samuel A. L., Rev. Sci. Inst., **2**, стр. 532, 1932.
22. Gasser u. Erlanger, Am. JI. Physiol., **73**, стр. 613, 1925.
23. Krug, W. E. Tz., **51**, стр. 605, 1930.
24. Krug, W. Zeits. f. techn. Phys., **11**, стр. 153, 1930.
25. Johnson J. B., Bell System Tech. JI., **8**, стр. 286, 1929.
26. Willis u. Melhuish, Bell System Tech. JI., **5**, стр. 573, 1926.
27. Potter R. K., Inst. Radio Eng., **18**, стр. 581, 1930.
28. Busch H., Phys. Zeit., **23**, стр. 438, 1922.
29. Watson, Watt u. Herd. JI. I. E. E., **64**, стр. 611, 1926.