

О ЗАПИСИ МЕНЯЮЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ *

Р. Фивег, Берлин

ВВЕДЕНИЕ

Запись изменяющихся процессов так же стара, как точная измерительная физика. Особенности многих физических явлений заставляют вместо наблюдения отдельных моментов производить непрерывную запись длительного процесса. При этом время протекания процесса играет чрезвычайно важную роль. Процессы, происходящие весьма быстро или очень медленно, не могут быть изучены никаким другим способом, кроме непрерывной записи их. Поэтому область регистрирующих приборов охватывает всевозможные процессы, от самых продолжительных до чрезвычайно быстрых; пишущее перо и катодный осциллограф являются двумя границами, определяющими разнообразие приборов, регистрирующих изменяющиеся явления.

1. РАЗДЕЛЕНИЕ СПОСОБОВ РЕГИСТРАЦИИ

В зависимости от используемого метода можно различать три основных группы регистрирующих приборов: первая группа работает при помощи механических записывающих приспособлений; к ней принадлежат собственно самописцы — инструменты, дающие запись чернилами. Ко второй группе принадлежат приборы, в которых используется световой луч, дающий на фотографической пластинке ход исследуемой кривой. Наконец, третья группа пользуется электронным лучом, действующим на флуоресцирующий экран или же фотографический слой.

2. СКОРОСТЬ ЗАПИСИ

При выборе того или иного рода записи большое значение имеют скорость записи, время установки записывающей части и сила, которую приходится прикладывать к пишущему элементу. Успехи, достигнутые за последние годы в области регистрирующих приборов, в значительной степени связаны с разработкой приспособлений, позволяющих все более и более снижать величину силы, действующей на записывающий элемент. Один из важней-

* R. Vieweg, Z. techn. Physik, 14, 441, 1933, перевод Н. Н. Малова.

ших принципов заключается в том, что сам измеряемый процесс используется не для непосредственного воздействия на пишущее приспособление, питающееся от вспомогательного источника энергии, но только для управления последним, благодаря чему почти не приходится расходовать энергии исследуемого процесса. На этом принципе базируется обширная область усилителей. В настоящее время сконструирован целый ряд приборов, содержащих электронные лампы, при помощи которых удастся записывать процессы, недоступные обычным измерительным приборам. Мы не будем здесь останавливаться на деталях усилительной техники и ограничимся лишь одним примером регистрирующего прибора со вспомогательным приспособлением, специального самописца, называемого компенсографом.

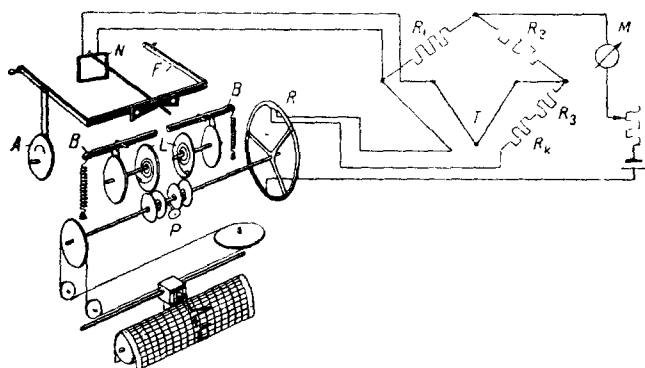


Рис. 1. Компенсограф (схема).

N — нулевой гальванометр, F — падающая дужка, A — привод бугеля, B — тормозящий рычаг, L — бегунки, P — привод для потенциометра, R — потенциометр (кольцевая трубка), R_1 , R_2 , R_3 — сопротивления мостика, R_k — зависящее от температуры сопротивление, T — термоэлемент, M — миллиамперметр.

1. Компенсограф Сименса-Гальске. Согласно рис. 1 измеряемое напряжение, источником которого служит термоэлемент, автоматически включает равное по величине, но противоположно направленное компенсационное напряжение. Для контроля за равенством напряжений применяется нулевой гальванометр, указатель которого периодически опускается вниз при помощи дужки (бугеля) через каждые 3 сек. Если он оказывается отклоненным от нулевого положения, то он прижимается к рычагу, освобождающему пружинный механизм. Благодаря специальному устройству дужки продолжительность освобождения механизма оказывается пропорциональной отклонению прибора. Пружинный механизм при помощи привода вращает согнутую по кругу трубку R , служащую компенсационным сопротивлением до тех пор, пока не восстанавливается равенство напряжений. С этой трубкой связано пишущее перо. Таким

образом компенсированное измеряемое напряжение действует на прибор при помощи дужки; в дальнейшем же прибор работает, как обычный самописец, приводимый в движение маленьким синхронным мотором. Таким образом измеряемое напряжение служит только для управления механизмом, приводимым в движение вспомогательным источником энергии. О преимуществах этого способа управления можно судить по тому, что при полном отклонении обычного самописца с вращающейся катушкой может быть отмечен постоянный ток силой около $0,5 \text{ мА}$, в то время как компенсограф позволяет регистрировать токи порядка 1 мА . Если этот прибор соединить с ограничивающими контактами, то он может быть использован также и для регулирования записываемого процесса.

Еще большее усиление достигается при регистрировании при помощи болометра, предложенном Зеллем ¹.

2. Применение бугельного прибора для регистрации частоты. Задача непрерывного измерения частоты с достаточной точностью сделалась особенно важной благодаря расширению параллельной работы силовых установок. Важность этой задачи ясна из того, что в настоящее время в некоторых сетях оказывается возможным пользоваться с высокой степенью точности синхронными часами. На рис. 2 изображена частота тока в городской сети Берлина, записанная прецизионным самопишущим частотомером Гартмана и Брауна. Постоянство частоты достигает $0,05$ герца, т. е. $0,1\%$. Ночью, как показывает верхняя кривая, оно еще выше. Разумеется, при подобной регистрации предъявляются весьма большие требования к чувствительности самопишущего прибора.

Что касается бугельных приборов, то следует еще указать, что подобные приборы в настоящее время технически разработаны для одновременной записи на одной диаграмме нескольких процессов; примером такого прибора может служить шестичувствительный самописец, одновременно записывающий различными цветами 6 различных процессов. При этом работают только с одним измерительным прибором (типа Дебре или динамическим), который включается поочередно в различные участки цепи.

3. ВРЕМЯ УСТАНОВКИ ПЕРА САМОПИШУЩЕГО ПРИБОРА

Что касается времени установки пера самопишущих приборов, то обычно оно близко к 1 сек., однако, удается понизить его до $0,2$ сек. Существуют также электрические приборы, например, электростатические, обладающие значительным временем установки.

Для дальнейшего повышения чувствительности самопишущих приборов были сделаны попытки уменьшить трение пера о бумагу путем добавочных его вибраций. Само перо играет чрезвычайно большую роль в определении чувствительности самопишущих приборов. Известные трудности, существовавшие у приборов старых конструкций, например, термографов или барографов, в новых конструкциях в значительной степени устранены благодаря надлежа-

ному выбору бумаги, пера и способа подвода чернил. Чрезвычайно прост, но очень надежен в работе и позволяет получить очень тонкую запись способ, предложенный Кейлем, заключающийся в том, что берется капиллярная игла шприца для вспрыскивания, а в качестве стального пера используется лезвие бритвы.

4. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ БУМАГИ

В зависимости от условий работы прибора скорость перемещения бумаги может быть весьма различна, от нескольких миллиметров в час до одного метра в секунду. Некоторые приборы работают с автоматическим переключением скорости в зависимости от характера записываемого процесса. Примером может служить „регистратор искажений“, применяющийся для анализа искажений режима силовых сетей и разработанный различными крупными

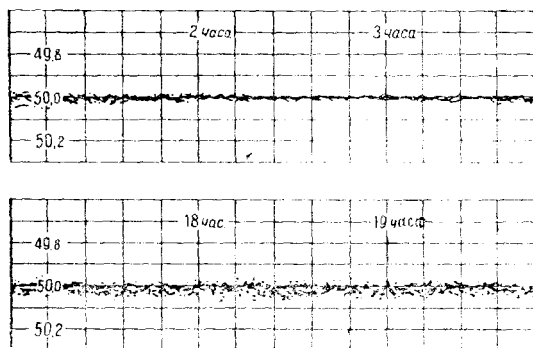


Рис. 2. Частота в Берлинской электрической сети.

фирмами. В нормальных условиях он работает при скорости движения бумаги около 20 мм в час. При возникновении перенапряжения или резком падении напряжения скорость движения бумаги автоматически (при помощи реле) переключается на большую — до 20 мм в секунду. Время переключения несколько зависит от интенсивности искажения и составляет от 35 до 200 миллисекунд.

Весьма большое значение имеет вопрос о равномерности движения бумаги, в особенности у хронографов. В этих приборах смещение производится либо при помощи прецизионного пружинного механизма, либо при помощи синхронного мотора, управляемого, например, кварцем. В часовых механизмах применяется тонкая регулировка при помощи хинповского торможения и колеблющейся пластинки; преимуществами этого способа являются возможность установления очень равномерной регулирующей силы и практически безостановочного движения. Применения хронографов весьма многочисленны: начиная от собственно хронографии — регистрации времени, до баллистики; кроме того они находят применение в физио-

логии и психологии, например, при установлении скорости раздражающего действия, а также на спортивных состязаниях. Новейшие хронографы, снабженные самопишущим пером, позволяют получить запись с точностью до тысячной доли секунды. Заслуживает упоминания кварцевые часы Шайбе и Адлерсберга¹⁴, точность хода которых достигает $\pm 0,001$ сек. в сутки. Они же дают эталонные частоты, неизменные с точностью до $\pm 4 \cdot 10^{-9}$.

5. Способы записи, использующие царапание

Уже с давних пор в физике применялась закопченная стеклянная пластинка, на которой, например, записывались колебания камертона. Хотя в настоящее время этот метод применяется сравнительно мало, однако не следует думать, что он вообще потерял свое значение. Так, например, недавно Томильсон² описал хроно-

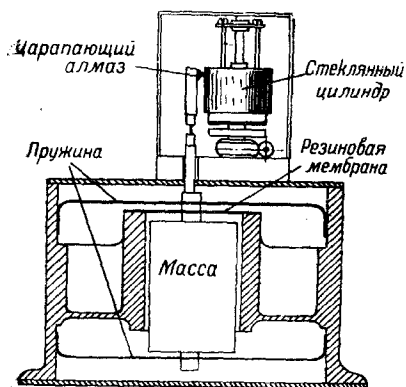


Рис. 3. Измеритель ускорения с царапающим приспособлением; собственная частота 15—20 герц.

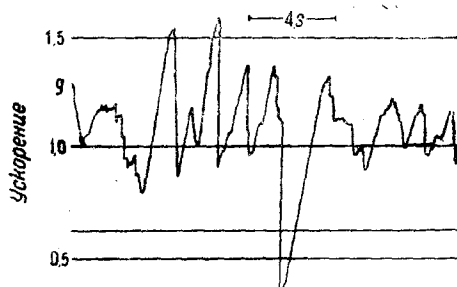


Рис. 4. Диаграмма, полученная царапающим алмазом.

граф весьма высокой точности, в котором отметки времени делаются иглами на законченном барабане; точность этого хронографа достигает 0,0002 сек.

Метод алмазной записи, в котором алмазная игла царапает целлулоидную, стеклянную или стальную пластинку, был в последнее время применен для авиации Зеевальдом³. Алмаз чертит чрезвычайно тонкую линию, амплитуды колебаний кривой составляют всего лишь доли миллиметра, но благодаря исключительной чистоте записи кривая может быть увеличена в 100—500 раз. На рис. 3 изображена схема измерителя ускорений, работающего на подобном принципе и дающего запись на стеклянном цилиндре. Навертывающаяся на цилиндр по спирали диаграмма благодаря мелкости записи занимает очень мало места, так что небольшая поверхность регистрирующего цилиндра оказывается эквивалентной многим сотням метров обычной регистрирующей бумаги. Подобный прибор весьма пригоден для изучения динамики полета, где кроме измерений ускорения можно производить также исследование дефор-

маций, естественно, дающих лишь очень малое смещение пишущего штифта. На рис. 4 изображена кривая ускорения при полете в ветренную погоду. Ординаты кривой увеличены примерно в 100 раз.

6. Самописцы, использующие световой пучок

На первом месте следует поставить шлейфовые осциллографы, которые в последнее время подверглись значительным техническим улучшениям. В настоящее время существуют шлейфы, дающие отброс в 1 м.и при токе в 2 м.а и собственной частоте шлейфа около 20 килогерц. При пониженной собственной частоте (1,2 килогерца) удается сконструировать шлейфы, дающие отброс в 1 м.и при токе, равном всего 20 м.д. Магниты осциллографов делаются в на-

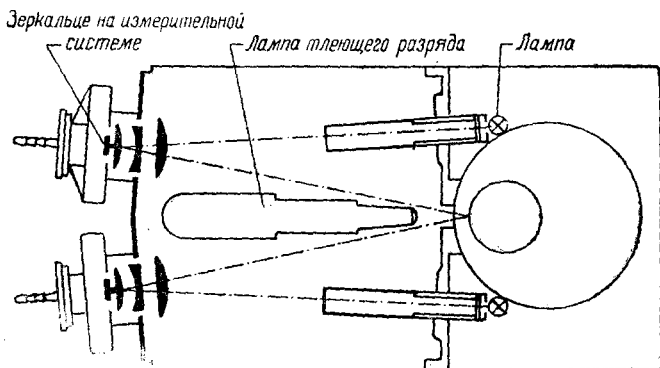


Рис. 5. Оптический многократный самописец.

стоящее время постоянными, оптика значительно улучшена, и создана возможность наблюдения за кривой даже во время снимка.

Другим примером может служить оптический многократный самописец фирмы „Аскания“, изображенный схематически на рис. 5. На рисунке видны источники света, система щелей, оптика и зеркала. Кривая получается на вращающемся барабане, несущем фотографическую бумагу; отметки времени делаются при помощи лампы тлеющего разряда. Зеркала измерительной системы укреплены на мембранах анероида. Этот прибор применяется для записи дыхания пилотов, летающих на больших высотах. Следует отметить, что при помощи механических методов регистрации здесь не удавалось получить хороших результатов. Преимуществами оптической системы являются высокая чувствительность и незначительный вес.

7. Применение пьезоэлектрических сил

При конструкции всех приборов, регистрирующих процесс при помощи светового луча, так же как и при конструкции обычных осциллографов, большим затруднением является необходимость сохранения минимальных размеров зеркала, связанного с измерительной системой, что диктуется механическими соображениями.

Но при уменьшении размеров зеркала падает интенсивность отражаемого им светового пучка. В этом случае иногда удается преодолеть указанное затруднение, сводящееся, в сущности говоря, к тому, что действие исследуемого процесса на систему, несущую зеркальце, может оказаться слишком слабым. На рис. 6 изображен

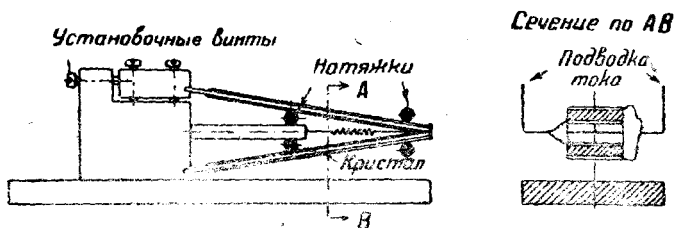


Рис. 6. Пьезоэлектрический осциллограф.

пьезоэлектрический осциллограф Филиппова ⁴. Его важнейшей частью являются два плоских кварцевых стерженька, снабженных обкладками и расположенных в виде лежащей буквы V. К узким сторонам этих стерженьков прикреплено зеркальце. Если на электроды будет наложено электрическое поле, то в кварцах возникнут пьезоэлектрические силы, которые вызовут движение зеркальца. Величина

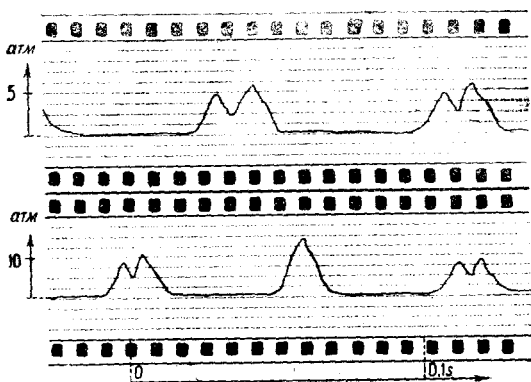


Рис. 7. Ход давления в моторе внутреннего сгорания, записанный пьезоэлектрическим индикатором.

этих сил значительно превосходит силы, развивающиеся в обычных осциллографах, благодаря чему зеркальце пьезоэлектрического осциллографа может быть сделано значительно большим, и осциллограмма, записываемая более сильным пучком света, будет значительно лучше различима. Действительные изменения длины кварца имеют порядок 0,001 мм, так что приходится применять

большие увеличения. Этот прибор находит применение при исследовании формы кривых высокого напряжения, так как несколько тысяч вольт свободно переносятся кварцем. Собственная частота подобного осциллографа, определяющая, как известно, область частот, записываемых без искажения, может быть доведена до 16 кило-

герц.

регистрации. Так, например, в индикаторе Клюге и Линка⁵ давление в камере зажигания мотора действует на кварц, в последнем возникает пьезоэлектрическое напряжение, которое после предварительного усиления в ламповом вольтметре регистрируется брауновской трубкой. На рис. 7 приведены подобные диаграммы. Скорость движения ленты достигала 70 см в секунду. Верхняя осциллограмма снята при удвоенной чувствительности прибора по сравнению с нижней диаграммой, на которой в центральной части виден ход давления при неправильном зажигании.

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

После изобретения трубки Брауна⁶, несмотря на классические исследования высокочастотных процессов, осуществленные Ценнеком, трубка вначале не нашла почти никакого применения. Однако после того, как выяснилась приложимость ее в технике телевидения, возник ряд фирм, изготавливающих брауновские трубки, которые, таким образом, стали дешевым, легко доступным прибором. Одной из важнейших частей катодного осциллографа является система, дающая периодические отклонения электронного луча, пропорциональные времени: система опрокидывающихся колебаний (*Kippschwingungsanordnung*). Успехи последних лет значительно улучшили пропорциональность отклонения и упростили синхронизирующие приспособления для записи периодических процессов. В опрокидывающихся схемах берут в качестве сопротивления, через которое производится зарядка, электронную лампу, а для опрокидывания пользуются тиратроном, т. е. ионной трубкой, снабженной управляющей сеткой. Конструкции подобного рода в настоящее время разработаны настолько хорошо, что ими можно пользоваться даже в эксплуатационных условиях. Преимущество тиратрона перед применявшейся прежде лампой тлеющего разряда состоит главным образом в том, что управляющее напряжение составляет лишь доли вольта, в то время как для лампы тлеющего разряда требуются сотни вольт. Частота опрокидываний, получающаяся в подобном приборе, может достигать 300 килогерц.

Опрокидывающиеся схемы примеряются также для записи весьма быстрых процессов (длящихся 1 микросекунду и меньше), а также для регистрации непериодических, однократных процессов. Наиболее технически совершенным является так называемый мощный катодный осциллограф. При работе с ним наиболее трудной задачей является точная запись процессов, возникающих произвольно, помимо воли экспериментатора. Примером таких процессов может служить молния. Наиболее трудно в этом случае сконструировать опрокидывающееся реле, работающее без искажений. Обычно в этом случае для отклонения используется уже не заряд конденсатора, но весьма кратковременный разряд исследуемого напряжения.

В Германии мощные катодные осциллографы были сконструированы Роговским⁷, а также Матьясом. На рис. 8 изображена схема

катодного осциллографа с холодным катодом. Катодный луч, возбуждаемый напряжением порядка 50 кВ, проходит через предварительную концентрирующую катушку и узкую диафрагму в разреженное пространство, свободное от вспомогательного поля, создающего разряд; здесь он попадает в запирающий конденсатор, устраняющий предварительное освещение экрана. Затем он про-

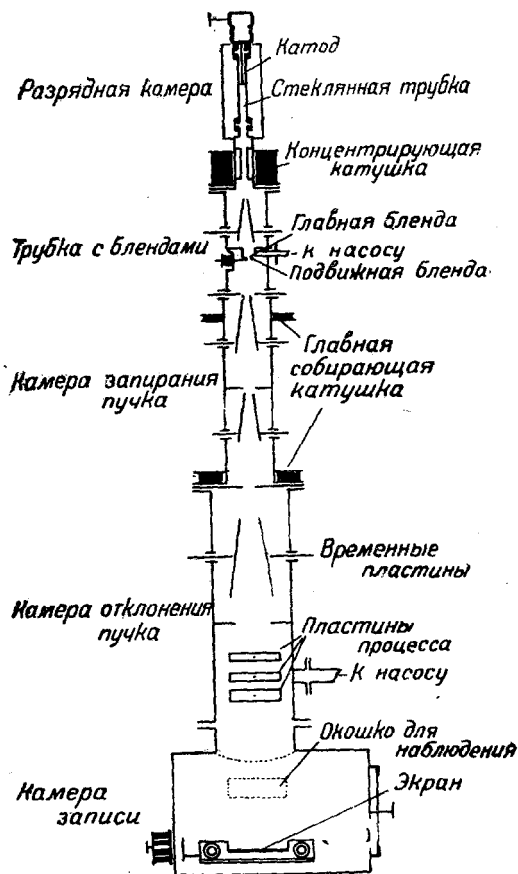


Рис. 8. Катодный осциллограф по Роговскому (схема).

равном 10 кВ. Время возрастания до половины максимального значения достигает 1 микросекунды, а время, в течение которого напряжение остается большим, чем половина максимального значения, составляет около 50 микросекунд. Отметками времени служат колебания трехсотметрового лампового генератора, так что расстояние между двумя максимальными амплитудами нижней кривой соответствует 1 микросекунде.

На рис. 10 изображен катодный осциллограф, позволяющий про-

ходит через пластины, создающие временное отклонение и отклонение, обусловленное исследуемым процессом, и, наконец, приходит к флуоресцирующему экрану или фоточувствительному слою. Предварительная концентрация и запирающие пучка являются весьма важными достижениями техники осциллографов, весьма значительно увеличивающими их разрешающую способность. Типичная катодная осциллограмма нормальной волны изображена на рис. 9. Для исследовательских целей возрастание и спадение используемого толчка напряжения нормализуется, и при подобных исследованиях катодный осциллограф делается незаменимым контрольным прибором. Изображенная на рис. 9 волна записана при максимальном напряжении,

изводить запись четырех процессов одновременно. Катодный пучок при помощи бленд разделяется на отдельные лучки, как это было предложено Кноллем ⁸. В каждой из двух трубок создаются два электронных пучка (одна из трубок представлена на рисунке в разрезе).

Процессы, частота коих не превышает 10 килогерц, могут быть записаны при помощи механической развертки во времени. Кроме того существует возможность при помощи окошка Ленарда пустить пучок на светочувствительный слой нижнего барабана, т. е. область применений этого осциллографа еще расширяется. Наконец, возможна комбинация обоих способов сразу, при которой низкочастотный процесс будет записываться в одной части прибора, в то

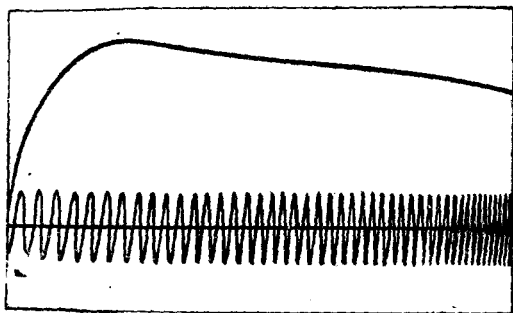


Рис. 9. Нормальная волна.

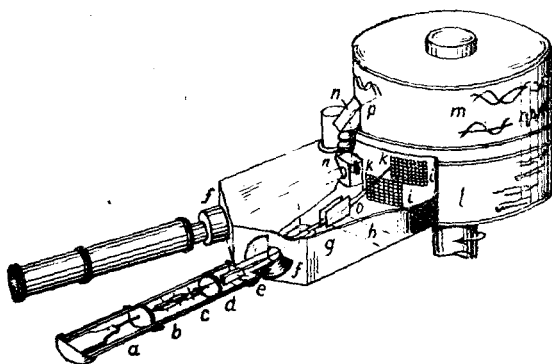


Рис. 10. Четырехкратный катодный осциллограф. *a* — разрядные трубки, *b* — анодная бленда, *c* — запирающие пластины, *d* — запирающая бленда, *e* — установка на нуль, *f* — концентрирующая катушка, *g* — пластины процесса, *h* — временные пластины, *i* — окошко Ленарда с защитной сеткой, *k* — флюоресцирующий экран, *l* — барабан для записи через окошко Ленарда, *m* — барабан для фотографирования, экрана, *n* — оптика для фотографирования экрана, *o* — ход катодного пучка, *p* — ход светового пучка.

время как при помощи опрокидывающегося реле налагающийся на него быстрый процесс будет зарегистрирован в другой части прибора. Скорости записи, доступные на катодном осциллографе, практически не ограничены; в настоящее время достигнуты ско-

рости порядка 60 000 и даже 100 000 км/сек. Значительно большие затруднения представляют вопросы отклонения во времени и управления пучком. Однако уже теперь область применения катодного осциллографа более широка, чем всех прочих измерительных приборов. Однако до настоящего времени катодный осциллограф не является еще столь же простым прибором, как другие измерительные приборы, так как необходимость некоторого навыка в работе с ним несколько препятствует его широкому распространению.

Можно было бы указать на целый ряд дальнейших применений катодного осциллографа, как, например, предложенное Биндером использование осциллографа для непосредственного измерения высоких напряжений без помощи делителя напряжений.

9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Кратковременные меняющиеся процессы, как, например, перенапряжения, могут быть изучены также при помощи ступенчатого искрового промежутка, предложенного Биндером и Гейне⁹. Этот метод, конечно, уступает катодному осциллографу, но представляет интерес как попытка возродить старые искровые хронографы.

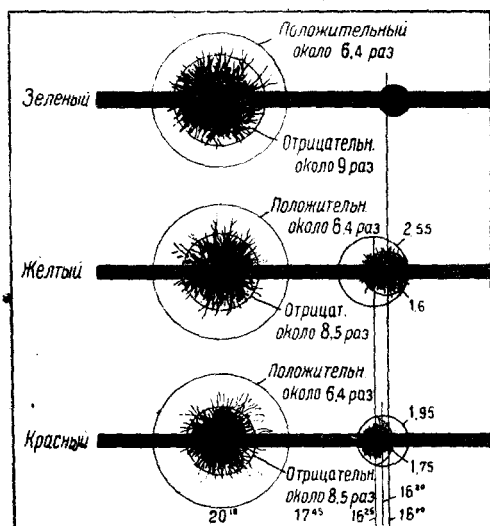


Рис. 11. Клидонограмма.

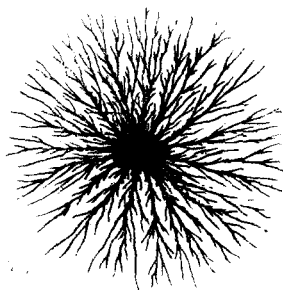


Рис. 12. Положительная фигура Лихтенберга.

Уже давно доказана возможность регистрации кратковременных перенапряжений при помощи клидонографа, т. е. при помощи развешивания картины электрического разряда на фотографическом слое. При помощи градуировочных кривых по диаметру получаемых фигур можно судить о величине напряжения. Можно также включить в высоковольтную сеть клидонограф с медленно движущейся кинолентой и наблюдать моменты образования фигур Лихтенберга и их величину, позволяющую определить бывшие в цепи перенапряжения. На рис. 11 изображены перенапряжения в 10-киловольт.

ной сети при грозе, записанные клидонографом Сименс-Шукерта¹⁰.

Гартге¹¹ в Ганновере удалось путем уменьшения емкости системы (практически — включением промежуточного слоя воздуха) получить значительно большие и отчетливые фигуры, благодаря чему точность измерений удалось довести до 30% вместо обычных 20%. На рис. 12 приводится положительная фигура, соответствующая 45 кв. Время действия напряжения, потребное для образования фигур, исключительно мало — порядка стомиллионных долей секунды. Фигура рис. 12 была получена в течение десятиллионной доли секунды.

10. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Очевидно, что достижения в отношении получения высокочувствительных фильм, пластинок и бумаги весьма благоприятно сказываются на технике регистрирующих методов. Здесь следует упомянуть также телевидение, в котором при образовании изображения из отдельных точек время освещения удается снизить до миллионных долей секунды, что позволяет поставить вопрос о конструкции новых, весьма совершенных приборов.

Наконец, снимки, как таковые, также являются средством регистрации переменных процессов. Действительно, имеется целый ряд весьма важных физических фотографий, как, например, снимков молнии и дуги. Далее следует упомянуть о записи звука, которая может производиться при помощи царапания пластинки или фотографирования конденсатора Керра, а также и другими способами.

11. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

К ним принадлежит суммирование переменных величин счетными механизмами. Например, суммирование разрядов в счетчике Гейгера при помощи тиратрона (Клюге и Егер¹²) позволяет сконструировать быстросчитающее реле, способное регистрировать до 50 импульсов в секунду. Если фотографировать счетчик через короткие промежутки времени, то делается возможной регистрация единичных импульсов.

Наконец, заслуживает упоминания так называемый временной трансформатор Штенбека и Штригеля¹³. Он позволяет, например, изучить статистическое распределение моментов пробивания искрового промежутка. Конечно, можно снять громадное количество катодных осциллограмм и подвергнуть их статистической обработке, однако временной трансформатор работает иначе: в течение коротких промежутков времени (микросекунды) заряжается хорошо экранированная лампа и система конденсаторов (заряд производится полне определенной прямоугольной волной); в дальнейшем система разряжается по обычным законам разряда конденсаторов в промежутки времени порядка секунды, причем разряд отмечается обыч-

ным хронографом, перо которого включается в разрядную цепь. Временной трансформатор позволяет определить время пробивания промежутка с точностью до $10^0/0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работа печатается в Z. Techn. Physik.
2. G. A. Tomlinson, Z. Instrumentenkde 51, 271, 1931.
3. F. Seewald, Maschinenbau 10, 725, 1931.
4. W. v. Philippoff, Elektrotechn. Z. 53, 405, 1932.
5. J. Kluge und H. E. Linckh, Forschung a. d. Geb. Ingenieurwesens 4, 177, 1933.
6. Alberti, Über Braun'sche Kathodenstrahlröhren und ihre Anwendung. Berlin, Jul. Springer 1932; есть русский перевод ГТИИ, 1933; Manfred v. Ardenne, Die Kathodenstrahlröhre und ihre Anwendung in der Schwachstromtechnik. Berlin, Jul. Springer 1933.
7. W. Rogowski, Elektrotechn. Z. 51, H. 17, 1933.
8. Elektrotechn. Z. 53, 1101, 1932.
9. L. Binder und H. Heyne, Arch. Elektrochem. 24, 469, 1930.
10. D. Müller-Hillebrand, Siemens-Z. 7, 547, 1927.
11. F. Hartje, Elektrotechn. Z. 53, 939, 1932.
12. J. Kluge und R. Jäger Z. Instrumentenkde 52, 229, 1932.
13. M. Steenbeck und R. Strigel, Arch. Elektrotechn. 26, 831, 1923.
14. A. Scheibe u. U. Adlersberger, Phys. Z. 33, 835, 1932; Hochfrequ. u. Elektroakustik, 43 37, 1934.