

В. А. ЛОМАНОВИЧ

ХИМОТРОНИКА

В. А. ЛОМАНОВИЧ

ХИМОТРОНИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1965



Scan AAW

В 1965 году серия «Техника» знакомит своих читателей с химотроникой, которую академик А. Н. Фрумкин и профессор П. Д. Луковцев называют соратницей электроники (см. «Наука и жизнь», 1963, № 6, стр. 12—15). Речь идет об использовании в различных приборах не традиционных твердых тел, а жидкостей определенного состава; слово химотроника расшифровывается как химическая электроника.

Первоначальные сведения об этой чрезвычайно важной теме читатели серии «Техника» получили из недавно вышедшей брошюры профессора П. К. Мицкевича «Жидкости и электроника». В. А. Ломанович расширяет тему, приводит описание многих основных химотронных приборов, разработанных за рубежом, и показывает перспективы развития химотроники — молодой науки, возникшей на стыке электроники и электрохимии.

СОДЕРЖАНИЕ

Союзнница электроники	3
Ионы в растворе	5
Ток идет через электролит	7
Химотронные приборы	12
Химотроны-выпрямители	14
Химотроны-электросчетчики	15
Химотроны-«органы чувств»	19
Химотронные насосы	23
Химотроны-усилители	27
Химотронный умножитель	29
Заключение	31

ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ ЛОМАНОВИЧ

Редактор С. М. Иванов
Художеств. редактор Е. Е. Соколов
Техн. редактор М. Т. Перегудова
Корректор Р. В. Савина
Обложка В. Кузнецова

Сдано в набор 24/VIII-1965 г. Подписано к печати 13/X-1965 г. Изд. № 250.
Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,93.
А 01484. Цена 6 коп. Тираж 50 300 экз. Заказ 2868.

Опубликовано тем. план 1965 г. № 137

Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., 3/4.

СОЮЗНИЦА ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника как область науки и техники знакома многим, но далеко не все еще знают, что такое химическая электроника, или химотроника. Возможно, некоторые только впервые слышат это странное и несколько необычное слово: слишком молода еще химотроника, незаметно возникшая почти на наших глазах. Такое скромное появление на свет новой науки объяснить нетрудно; для нашей эпохи это в порядке вещей. Порой даже самое необычное сегодня уже завтра становится для нас таким же простым и необходимым, как электролампа или радиоприемник.

В наши дни случается и так: вдруг молодеет и бурно расцветает какой-нибудь раздел старой науки, кажется, давно освоенной и привычной. Именно это и произошло с электрохимией. С точки зрения нашего современника, электрохимия — наука более чем почтенная, ей уже почти двести лет. Можно ли ожидать от нее неожиданностей?

Но вот при глубоком изучении электрохимических процессов и овладении их механизмом оказывается, что перед наукой и техникой наших дней открываются новые, неограниченные возможности. Тут и топливные элементы (новые электрохимические генераторы) с коэффициентом полезного действия до 80%, и всевозможные электрохимические преобразователи, и многое другое. Недаром одни из наших ведущих электрохимиков академик А. Н. Фрумкин недавно сказал: «Электрохимия сейчас переживает вторую молодость».

Так что же такое химотроника, эта дочь электротехники и электрохимии? Какова сейчас ее роль и взаимоотношения со знакомой нам электроникой? Каким представляется нам взаимный союз и будущее этих наук? Электроника, микроэлектроника, радиоэлектроника — все эти термины вошли в обиход науки, техники и даже быта. Электроника вездесуща. Она присутствует и в миниатюрном радиоприемнике, и в огромных радиотелескопах. Богат, неисчерпаем и разносторонен электрон, но неспроста ученые и инженеры все чаще и чаще

заглядывают в «конструкторское бюро» природы, стараясь как можно лучше распознать биологические закономерности и перенести их в мир техники. Оказывается, если внимательно приглядеться, многие самые совершенные и точные инженерные устройства, созданные человеком, уж далеко не так точны, а главное не так надежны, как простейшие «живые механизмы», вышедшие из мастерской природы. Лучший пример тому наш мозг.

Ученых и инженеров занимает вопрос: почему природа даже в самых примитивных своих творениях, не говоря уже о наиболее совершенных, использует только жидкостные элементы? Природа ведь очень строга и разборчива в выборе материалов. Только самому лучшему и совершенному дает природа «путевку в жизнь». Так почему же, в какой бы биоэлемент мы ни заглянули, мы везде встретим электропроводные растворы? Почему все известные нам природные биологические творения так непохожи на наши инженерные устройства, где используются электронные процессы в твердых телах и газах?

Не логично ли попытаться сконструировать жидкостные элементы? Так появилась химотроника, использующая жидкостные проводники-растворы и идущие в них электрохимические превращения.

За последние пять-шесть лет был создан целый ряд электрохимических преобразователей — химотронов, приборов, основанных на использовании электрохимических закономерностей. За рубежом они получили название солионы (ионы в растворе). Оказывается, что эти приборы могут с успехом выполнять роль различных выпрямителей, стабилизаторов, математических элементов, реле, генераторов, усилителей постоянного и переменного тока, преобразователей электрической энергии в механическую и т. д.

Возможно, с их помощью удастся значительно упростить построение различных схем в устройствах контроля и управления, а в некоторых случаях и успешно разрешить задачи, бывшие камнем преткновения для электроники. Например, при выпрямлении очень слабых электрических сигналов, когда полупроводниковые приборы становятся уже неэффективными. В ряде случаев химотроны значительно выигрывают по сравнению с электронными приборами. Для их производства не нужен сверхчистый неорганический материал, с «атомным» допуском примеси, без которого не может существовать полупроводниковая техника. Энергии химотроны потребляют в сто, а иногда и в тысячу раз меньше полупроводниковых приборов.

Прежде чем перейти к описанию некоторых современных химотронных приборов, нам придется совершить небольшой экскурс в область физической химии. Это необходимо для то-

го, чтобы немного узнать о свойствах веществ, используемых в химотронах, и об основных электрохимических явлениях, которые имеют место при прохождении электрического тока через растворы или расплавы веществ, состоящих полностью или частично из ионов.

ИОНЫ В РАСТВОРЕ

Известно, что некоторые растворы солей, кислот и оснований способны проводить электрический ток. Растворы, или расплавы, обладающие ионной проводимостью, называют электролитами, или проводниками второго рода, в отличие от металлов и полупроводников, обладающих электронной проводимостью (проводники первого рода). В таких жидких проводниках с подвижными частицами носителями электрических зарядов являются ионы, которые в тысячи раз превосходят по величине электроны. Сам процесс, связанный с прохождением электрического тока через электролит, называется электролизом.

Различные процессы электролиза широко используются в науке и технике. С их помощью из поваренной соли получают едкий натр и хлор. Электролиз воды применяется для получения водорода и кислорода. Электролизом получают или очищают (рафинируют) ряд цветных металлов. Очень широко практикуется электролитическое покрытие одних металлов другими для защиты от коррозии, для повышения твердости поверхностного слоя или изменения внешнего вида (электролитическое лужение, цинкование, кадмирование, меднение, серебрение, никелирование, хромирование и т. д.).

Все химические превращения при электролизе происходят только на поверхности электродов, подводящих ток к раствору. Объясняется это тем, что на границе двух сред (твердое тело — жидкость) изменяется способ передачи электрического тока. Иными словами, на поверхности электродов электронная проводимость сменяется ионной. Таким образом, в этом пространстве ионы могут разряжаться, а нейтральные атомы приобретать заряд (на катоде всегда будет избыток электронов, так как он соединен с отрицательным полюсом источника тока, а на аноде — недостаток электронов). При рассмотрении электрохимических процессов частицы, движущиеся по направлению к аноду, принято называть анионами, а идущие к катоду — катионами.

Отметим, что все процессы электролиза строго подчиняются законам, открытым английским физиком Майклом Фарадеем в 30-х годах прошлого века. Суть их заключается в том, что при любом электродном процессе количество вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшего через раствор. Особо-

го пояснения тут не требуется: поскольку в том или ином процессе каждый ион может отдать (или принять) только строго определенное количество электронов, естественно, что общая сумма прореагировавших ионов (а значит, и количество вещества, выделившегося из раствора) будет увеличиваться в зависимости от силы тока и времени его воздействия на раствор. Короче говоря, чем дольше мы будем пропускать ток через электролит, тем больше вещества выделится на электроде. Чем сильнее будет ток, тем больше осядет вещества за то же время.

В 1887 г. шведский ученый Сванте Аррениус разработал теорию электролитической диссоциации. Согласно теории, при растворении некоторые вещества, например поваренная соль в воде, распадаются (диссоциируют) на ионы, независимо от того, проходит через такой раствор электрический ток или нет. Молекулы кислот при этом распадаются на положительные ионы водорода и отрицательные ионы кислотного остатка, а основания — на положительные ионы металла и отрицательные гидроксильные ионы. Соли обычно диссоциируют на положительные ионы металла и отрицательные ионы кислотного остатка. В 1891 г. теория Аррениуса была развита и дополнена известным химиком И. А. Каблуковым.

Каковы же причины диссоциации? Чем объяснить эту «самоионизацию» растворов? Оказывается, все обстоит довольно просто. Достаточно вспомнить, что молекулы многих химических соединений состоят не из нейтральных атомов, а из ионов; при их взаимодействии с полярными молекулами растворителя нарушается ионная связь внутри молекул растворяемого вещества. Иными словами, распад молекул вещества на заряженные ионы происходит под воздействием одного растворителя, разъединяющего молекулы растворяемого вещества на ионы, из которых ранее состояла молекула. Объясняется это особой структурой молекул растворителей. Их обычно называют д и п о л я м и, так как центры положительных и отрицательных зарядов у них значительно смещены по отношению друг к другу. Известно, что подобная структура сопровождается высокой диэлектрической проницаемостью вещества, т. е. его способностью к ослаблению напряженности поля, создаваемого в нем электрическими зарядами. Обычная вода — прекрасный растворитель, так как она обладает очень высокой диэлектрической проницаемостью (в десятки раз превышающей диэлектрическую проницаемость воздуха, принимаемую при расчетах за единицу). Поэтому при растворении в воде происходит значительное ослабление молекулярных и ионных связей внутри вещества. Этим и объясняется столь высокая способность воды к растворению в ней различных веществ. Такие вещества, как сахар, в ней распа-

даются на молекулы, другие же — на отдельные ионы. Первые ток не проводят, вторые являются электролитами.

Вот как выглядит, например, растворение молекулы поваренной соли (хлористого натрия) в воде. Под воздействием электрических полей, создаваемых ионами натрия и хлора, полярные молекулы воды, притягиваясь, ориентируются около ионов. Но так как диполи в свою очередь притягивают ионы натрия и хлора, то, естественно, связь между ними ослабляется. Окружив ионы Na^+ и Cl^- гидратной оболочкой, вода препятствует обратному соединению этих ионов и молекулы поваренной соли. Процесс этот носит название гидратации ионов.

ТОК ИДЕТ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОЛИТ

Какие же явления наблюдаются в электролитах при прохождении через них электрического тока? Как ведут себя ионы в растворе?

При отсутствии воздействия внешнего поля движение ионов в растворе будет таким же беспорядочным, как хаотическое тепловое движение свободных электронов в металле. Известно, что при подобном движении электрических зарядов (электронов или ионов) их поля взаимно компенсируются, и ток в проводнике равен нулю. Движение ионов приобретает совершенно иной характер при воздействии на раствор внешнего электрического поля. Помимо хаотического движения, теперь возникает упорядоченное перемещение ионов в направлении, определяемом знаком поля. Таким образом, одно из прежних направлений движения ионов становится преобладающим, и ток в цепи будет расти с увеличением внешнего поля. Кстати, по скорости движения ионы в растворе в тысячи раз уступают электронам в металле. Виной этому очень большие размеры ионов, окруженных, к тому же, оболочкой из полярных молекул растворителя (в воде — гидратной оболочкой).

Итак, некоторые растворы — это своеобразные проводники, в которых ионы являются переносчиками электрических зарядов. Способность растворов проводить электрический ток, как и у металлов, может определяться по их проводимости или, наоборот, сопротивлению. Электропроводность зависит от ряда причин — от концентрации диссоциированных ионов, абсолютной скорости их движения и температуры раствора. С увеличением концентрации раствора электропроводность его возрастает. Однако с увеличением концентрации ионов все больше и больше будет сказываться их взаимное притяжение. При высоких концентрациях ионные связи в молекулах начинают восстанавливаться, и количество свободных ионов, способных переносить электрические заряды, падает. Или, как говорят химики, уменьшается степень диссоциации.

Естественно, что электропроводность раствора в этом случае также снижается и дальнейшее повышение концентрации раствора вызывает уже не уменьшение, а увеличение его сопротивления электрическому току.

Заметим, что при прохождении тока через раствор ионы на электроде либо отдают электроны (ионы окисляются), либо их принимают (восстановление ионов). Другими словами, электролиз всегда связан с определенными окислительно-восстановительными процессами. Напомним хотя бы об электролитическом восстановлении металлов, открытом в 1837 г. Б. С. Якоби. Теперь гальванотехника получила широкое распространение. Гальваностегия дает возможность покрывать металлические изделия слоем любого другого металла, а гальванопластика служит для получения металлических копий с различных рельефных предметов.

В гальванотехнике электрический ток используется для осаждения на отрицательном электроде металлических ионов из раствора соли. В электрохимии подобные процессы получили общее название катодного восстановления. Если, например, в раствор медного купороса опустить два электрода, подключенных к источнику постоянного тока, то катод начнет быстро покрываться совершенно чистым слоем красной меди. Дело в том, что при прохождении тока через раствор медного купороса ионы меди теряют свой заряд и превращаются в нейтральные атомы, как только войдут в соприкосновение с катодом, обладающим избытком электронов. Иными словами, на катоде все время будет происходить восстановительный процесс. На аноде же идет окислительный процесс. Либо на нем выделяется газообразный кислород в результате разложения воды, водород которой соединяется с отрицательными ионами кислотного остатка, образуя серную кислоту, либо он сам растворяется. Первый случай характерен для инертного электрода, материал которого не участвует в электрохимической реакции, например, для угольного электрода. Во втором случае состав электролита останется прежним, так как произойдет растворение медного анода (на аноде медь перейдет в раствор, а на катоде выделится такое же ее количество). Короче говоря, медный анод непрерывно пополняет убыль ионов меди, осаждающихся при электролизе на катоде.

В гальванических элементах электрический ток тоже получают в результате окислительно-восстановительной реакции, идущей на электродах. Так, например, в угольноцинковых элементах ФБС (сухой элемент для карманного фонаря) цинковый электрод постепенно растворяется в результате химической реакции. При этом в нем все время накапливаются электроны, остающиеся от атомов цинка, которые покидают

этот электрод в виде положительных ионов. Второй, угольный, электрод в реакции не участвует, являясь лишь проводником электронов. Иначе говоря, в элементе ФБС в ходе окислительно-восстановительной реакции химическая энергия превращается в электрическую и между электродами возникает разность потенциалов.

В зависимости от состава электролита и материала электродов при электролизе могут происходить самые различные химические превращения. Из приведенных примеров окислительно-восстановительных процессов, идущих при прохождении электрического тока через электролит, мы видим, что либо электролит, либо сами электроды претерпевают изменения. В самом деле, ведь у электролита изменяется состав или объем, на электродах выделяется газ, сами электроды или растворяются, или же покрываются каким-нибудь металлом. Однако нас в дальнейшем в основном будут интересовать только такие окислительно-восстановительные процессы, при которых не происходит ни изменения поверхности электродов (они служат только для передачи электронов), ни выделения газов, ни изменения состава или объема электролита. Оказывается, что существуют и такие окислительно-восстановительные реакции, когда процесс превращения одних ионов в другие полностью компенсируется обратным процессом, происходящим на другом электроде. Такие устройства известны под общим названием обратимых окислительно-восстановительных систем.

Теперь нам осталось разобрать некоторые специфические процессы электролиза, играющие крайне важную роль в химотронике. Посмотрим, как же происходит при электролизе подача реагирующих веществ к поверхности электродов, что происходит с этими веществами далее и куда деваются продукты реакции, идущей на электродах.

Попытаемся для этого рассмотреть последовательно все изменения, происходящие в приэлектродном пространстве во время электролиза. Пока на электродах не появится разность потенциалов, концентрация растворенных веществ в электролите будет одинаковой во всех точках. При электролизе это равновесие нарушается, так как возникает разность концентраций растворенных веществ у поверхности электродов и в глубине раствора. Следствием этого будет диффузия (перемещение ионов от большей концентрации к меньшей) и возникновение у поверхности электродов пограничного диффузионного слоя, в котором концентрация электролита будет уменьшаться по мере приближения к поверхности электрода. Это связано с тем, что на поверхности электродов ионы либо окисляются, либо восстанавливаются (на катоде ионы приобретают недостающие им электроны, а на аноде, разряжаясь, отдают электроны). Другими словами,

в приэлектродном пространстве идет непрерывный «расход» диссоциированных (свободных) ионов из электролита и их концентрация падает по мере приближения к поверхности электрода. Толщина диффузного слоя, в котором начинается сказываться это местное изменение концентрации электролита, довольно велика — доли миллиметра.

Помимо диффузионного движения ионов во время электролиза, возможно также их конвективное и миграционное перемещение в электролите. Первое связано с конвекцией (перемешиванием) жидкости, вызываемой тепловыми явлениями. Под вторым подразумевается движение заряженных ионов под действием электростатических сил в направлении, определяемом знаком поля. Таким образом, мы различаем три способа подведения ионов к электродам — диффузию, конвекцию и миграцию.

В самом электродном процессе мы можем наблюдать три фазы: подвод ионов из глубины раствора к электродам, восстановление или окисление ионов на электродах и отвод продуктов реакции от электродов в глубь раствора.

Посмотрим теперь, что же будет определять скорость всего процесса, состоящего из ряда звеньев. От чего зависит скорость процесса в целом? Как влияют на него отдельные звенья?

Известно, что скорость какого-либо сложного процесса определяется в основном скоростью наиболее медленной его стадии. Представьте себе на миг, что вы находитесь на небольшом островке, километрах в двадцати от континента и обычная веселая лодка — ваше единственное средство связи. Если вам вдруг срочно понадобится передать что-нибудь другу, находящемуся в это время в дальнем плавании, то, очевидно, прежде всего придется воспользоваться лодкой. На ней вы доставите свое послание на телеграф, оттуда его передадут на радиостанцию, дальше оно пойдет на корабль. Если не произойдет непредвиденной задержки на телеграфе или радиостанции, то больше всего уйдет времени на преодоление такого, казалось бы, незначительного в общем пути расстояния, как первые двадцать километров. Последующие сотни и тысячи километров по проводам и радио отнимут так мало времени, что ими вообще можно пренебречь.

В электролизе такой «лодкой» будет самая медленная его стадия — диффузия, обеспечивающая подачу ионов к электродам и отвод от них продуктов реакции. Скорость диффузии прямо пропорциональна поверхности электродов и концентрации электролита.

Скорость восстановления и окисления ионов возрастает с увеличением силы тока, идущего через электролит. При определенной плотности тока наступает момент, когда все ионы, находящиеся у поверхности электродов, будут реагировать с

ними. Поэтому концентрация ионов у поверхности электродов станет равной нулю и дальнейшее увеличение напряжения на электродах ничего не изменит. Скорость диффузионных процессов теперь уже будет недостаточной, чтобы обеспечить своевременную доставку к электродам реагирующих веществ и отвод от них продуктов реакции. Максимальный ток, обеспечиваемый скоростью диффузии, называется предельным током диффузии.

Вспомним теперь о перепаде концентраций раствора, о распределении в нем диссоциированных ионов и значительном уменьшении концентрации в приэлектродном диффузионном слое во время электролиза. Очевидно, что если каким-либо способом увеличить перемешивание (конвекцию) жидкости, то распределение концентраций в электролите изменится, толщина диффузионного слоя станет меньше и скорость доставки ионов к электродам значительно возрастет. Естественно, что при этом предельный ток диффузии также увеличится. Достигнуть этого можно путем механического перемешивания или нагревания электролита. Следует заметить, что с повышением температуры происходит увеличение скорости движения ионов в электролите. Поэтому увеличение электропроводности электролитов при нагревании является характернейшим отличием проводников второго рода от проводников первого рода, у которых с повышением температуры увеличивается сопротивление, а не проводимость.

Знакомясь с процессами, происходящими в химотронах, мы довольно часто сталкиваемся с явлениями поляризации, то есть с возникновением между электродами химотронов некоторой собственной разности потенциалов, по своему знаку противоположной напряжению, поступающему на прибор из внешней цепи (химотрон сам превращается в источник встречной электродвижущей силы). В процессах электролиза принято различать химическую и концентрационную поляризацию. Химическую поляризацию мы наблюдаем в том случае, когда продукты электролиза способны создать гальваническую цепь, то есть когда система в результате электролиза превращается в гальванический элемент. Концентрационная поляризация возникает во время электролиза из-за различия концентраций электролита в анодном и катодном пространстве. В результате образуется так называемый концентрационный элемент, в котором электрический ток возникает за счет разности концентраций ионов у катода и анода. Очевидно, что концентрационная поляризация значительно снижается при искуственном перемешивании электролита.

Часто при конструировании различных химотронных приборов требуется исключить или ограничить какой-нибудь из способов подведения ионов к электродам. В случае необходимости максимально ограничить возможность перемешивания

жидкости в междуэлектродном пространстве устанавливают капиллярные трубки или диффузионные (пористые) перегородки. Этим совершенно исключают конвективное движение раствора, не создавая в то же время существенного препятствия для перемещения в растворе ионов. Если же требуется ограничить миграционное движение ионов в электролите, его составляют таким образом, чтобы лишь незначительная его часть принимала активное участие в электродном процессе.

Имеется еще ряд специфических особенностей, обуславливающих выбор того или иного электролита, материала и конструкции электродов и корпусов для различных химотронных приборов. С этим мы встретимся при рассмотрении принципа работы и устройства некоторых типов электрохимических преобразователей — химотронов.

ХИМОТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Как же использовали инженеры те электрохимические закономерности, с которыми мы немного познакомились в предыдущем разделе? Как они сумели «запрячь» такие огромные и, казалось бы, неповоротливые (с «электронной точки зрения») частички, как ионы? А ведь инженеры заставили ионы работать в химотронах ничуть не хуже проворных малюток-электронов, работающих в радиолампах и транзисторах.

Основой для ряда электрохимических приборов служит знакомая нам обратимая окислительно-восстановительная система. Мы уже установили, что электроды в ней должны быть инертными, чтобы химически не реагировать с электролитом. Чаще всего они изготавливаются из платины (иногда из графита). В качестве электролита получил распространение водный раствор йодистого калия с небольшой добавкой йода.

Простейший химотронный прибор представляет собой небольшую стеклянную или пластмассовую ампулу с впаянными в нее платиновыми электродами. Ампула заполняется уже известным нам электролитом, в котором в результате электролитической диссоциации образуются положительные ионы калия и отрицательные ионы йода. Последние вместе с ионами триодида (молекулярным йодом) и будут носителями электрических зарядов в нашем устройстве. Условимся в дальнейшем называть подобные устройства с системой электродов в растворе электрохимическими ячейками или просто ячейками.

Посмотрим теперь, что произойдет с таким прибором, если подключить к нему источник постоянного тока. При электролизе молекулярный йод, существующий в электролите в виде отрицательных ионов триодида (J_3^- , присоединяя к себе два электрода на катоде, восстанавливается в ионы йодида (J^-). Одновременно на аноде ионы йодида, теряя электроны,

окисляются до молекулярного йода. Следовательно, на аноде у нас все время будет происходить процесс окисления ионов йода, а на катоде восстановление молекул йода, то есть в целом состав электролита изменяться не будет. При этом, правда, существует одно ограничение: величина напряжения на электродах ячейки не должна быть больше 1 в, так как при 1,07 в начнется процесс разложения воды и в электролите возникнут необратимые изменения.

Вспомним теперь, что сила тока, протекающего через нашу ячейку, зависит от приложенного к ней напряжения, площади электродов, концентрации реагирующих веществ и скорости их подачи из глубины раствора к электродам. Невольно возникает мысль: нельзя ли управлять силой тока, проходящего через ячейку, путем воздействия на один из перечисленных факторов, допустим, меняя скорость притока реагирующих веществ к электродам? В самом деле, если скорость их подачи почему-либо возрастет, то увеличится и скорость электродных процессов, а значит и сила тока, идущего через наш прибор, станет больше. Или же, наоборот, ток во внешней цепи станет значительно меньше, если в результате какого-то внешнего воздействия в ячейке снизится концентрация электролита. Иными словами, в основу общего принципа действия химотронных приборов положено воздействие на ионный поток различных внешних факторов. В зависимости от конструкции химотроны могут использоваться в качестве чувствительных элементов (датчиков) для измерения давления, ускорения, температуры, звукового и светового воздействия. Эти и некоторые другие механические воздействия преобразуются в химотронах в сигналы электрического тока.

Процессы, происходящие в химотронах, имеют некоторое сходство с процессами в полупроводниковых приборах. Действительно, как в электролитах, так и в полупроводниках электрический ток обусловлен движением положительных и отрицательных носителей зарядов. Некоторые авторы пытаются продолжить эту аналогию, сравнивая кислоты с полупроводниками, имеющими «Р» (положительную) проводимость, а щелочи с полупроводниками, обладающими N-проводимостью (отрицательной).

Мы уже отмечали, что подвижность носителей зарядов (ионов) в электролитах значительно меньше, чем в полупроводниках. Поэтому химотроны в отличие от полупроводниковых приборов, прекрасно работающих даже на сверхвысоких частотах (сотни и даже тысячи мегагерц), пригодны только для самых низких частот. Пределом для них будет самый начальный участок частот звукового спектра. Зато при медленных процессах с постоянной во времени в несколько минут или даже часов химотроны с успехом конкурируют с электронными приборами.

ХИМОТРОНЫ-ВЫПРЯМИТЕЛИ

Простейшие двухэлектродные химотроны с односторонней проводимостью по аналогии с такими же электронными приборами обычно называют химотронными диодами. В них используется электрохимическая ячейка с двумя значительно отличающимися по площади платиновыми электродами (с отношением площадей 1:20 000 и более). В качестве электролита чаще всего используется водный раствор йодистого калия с добавлением небольшого количества йода (порядка 50:1).

На рис. 1 приведена одна из возможных конструкций химотронных диодов. Это небольшая стеклянная или пластмассовая ампула 1 диаметром приблизительно 3—6 мм и длиной 10—15 мм. Ампула снабжена двумя электродами 2 и 3 и заполнена известным нам электролитом.

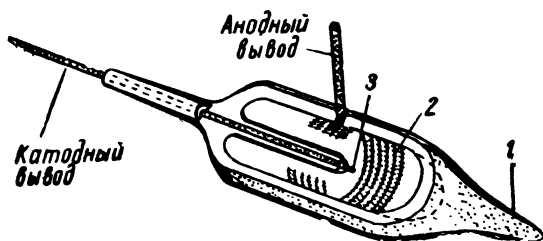


Рис. 1. Химотронный диод.

Электрод с большой поверхностью 2 изготовлен из платиновой сетки или фольги, а малый электрод 3 из платиновой проволоки. Такой химотронный прибор обладает односторонней проводимостью, так как сила тока, проходящего через него, зависит от полярности напряжения на его электродах. Когда к малому электроду подключен положительный полюс источника тока, на нем происходит процесс окисления ионов йода. Так как их концентрация в электролите достаточно велика, то и скорость электродного процесса будет такой, что через диод пройдет значительный ток. Но как только мы переключим полярность и сделаем меньший электрод катодом, все коренным образом изменится. На нем теперь будет происходить восстановление молекулярного йода. Концентрация его в электролите незначительна (мы говорили, что в электролите лишь небольшая добавка йода), поэтому скорость электродного процесса резко снизится и через диод сможет пройти очень небольшой ток — меньше миллионной доли ампера.

Мы уже знаем, что электродные процессы в нашем прибо-

ре уравниваются. Состав электролита остается неизменным, так как электроды не участвуют в электрохимической реакции, а процесс диффузии будет поддерживать однородность его концентрации, поэтому срок службы химотронного диода практически не ограничен.

Отношение прямого тока к обратному у химотронного диода достигает 500:1 (и более). В лучших конструкциях характеристика у них сохраняет линейность в пропускном направлении в пределах от 10 до 200 миллионных долей вольта. Величина обратного тока у некоторых образцов диодов не превышает одной сотой миллионной доли ампера. К недостаткам химотронных диодов можно отнести очень небольшое максимальное обратное напряжение (около 1 в). В противном случае диод выходит из строя. Недостатком является и большая зависимость характеристики от температуры (1,5—3% на 1° C).

Химотронные диоды применяются в различных низкочастотных цепях для выпрямления очень слабых сигналов переменного тока, когда полупроводниковые диоды становятся неэффективными. В литературе отмечается возможность использования химотронных диодов в некоторых случаях даже на частотах свыше 400 гц.

ХИМОТРОНЫ-ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИКИ

Это очень простые по конструкции химотронные приборы. Они отличаются от диодов тем, что имеют одинаковые по площади электроды, между которыми установлена мелкопористая перегородка, разделяющая внутреннюю полость прибора на две камеры — анодную и катодную. Состав электролита у них примерно такой же, как и у диодов.

Пористая перегородка исключает возможность проникновения электролита из одной камеры в другую и его перемешивания. Другими словами, внутри прибора имеется как бы непреодолимый барьер для ионов, которые могли бы перемещаться внутри прибора за счет конвекции. Одновременно этот барьер в значительной мере ограничивает и движение ионов за счет диффузии. Однако он не исключает все же возможность перехода ионов из одной камеры в другую под воздействием электрического поля. Таким образом, у этих приборов при электролизе (в отличие от химотронных диодов) не происходит автоматического выравнивания местных концентраций у электродов. При электролизе в анодной камере прибора все время будет уменьшаться концентрация ионов йода (йодида J^-) и увеличиваться концентрация молекул йода (J_2). Одновременно в катодной камере идет обратный процесс: концентрация молекул йода там падает, а концентрация ионов йода растет.

Вспомним теперь о количественных закономерностях в процессах электролиза, то есть о том, что количество вещества, выделяющегося при электролизе, всегда пропорционально количеству электричества, прошедшего через раствор. Значит, достаточно каким-либо путем измерить концентрацию молекулярного йода, накапливающегося в анодной камере нашего прибора, чтобы определить количество прошедшего через него электричества. Таким образом, его с успехом можно использовать для измерения электроэнергии; недаром подобные приборы называют также химотронными интеграторами.

Срок его непрерывной работы ограничен лишь количеством электролита. Это и понятно, ведь при электролизе в анодной камере все время происходит окисление и накопление молекулярного йода. Одновременно в катодной камере концентрация молекулярного йода постепенно уменьшается, и, в конечном итоге, процесс постепенно должен будет прекратиться. Но вернуть прибор в рабочее состояние очень просто: достаточно пропустить через него такое же количество электричества, но в обратном направлении, так сказать, разрядить прибор. Функции электродов при этом изменятся (анод станет катодом, а катод анодом), и состав электролита в камерах прибора восстановится.

На рис. 2 изображено одно из возможных конструктивных исполнений химотронного интегратора. Он состоит из стеклянного или пластмассового корпуса 1, внутри которого размещены два одинаковых платиновых электрода 2 и 3. Пористая полупроницаемая перегородка 4 изготавливается из спеченного стеклопорошка или специальной керамики.

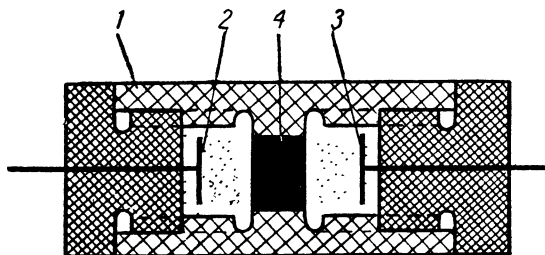


Рис. 2. Химотронный интегратор.

Остановимся теперь на способах, которыми пользуются в практике для определения количества электричества, прошедшего через химотронный интегратор, или среднего тока за время его работы. Известны три метода: аналитический, калориметрический и электрический. Первый из них связан с химическим анализом и определением процентного содержания

йода в камерах прибора. Громоздкость и неудобство такого метода очевидны, да и прибор «одноразового» действия мало-пригоден для эксплуатации в практических условиях. Колориметрический, или визуальный, метод значительно удобнее. Он основан на том, что раствор йода имеет характерную коричневую окраску, а раствор йодистого калия в воде бесцветен. Как мы уже говорили, в процессе электролиза йод будет накапливаться в анодной камере прибора. Стало быть, там произойдет постепенное потемнение раствора, причем оно будет строго пропорционально количеству электричества, прошедшего через химотрон.

На первых порах «показания» химотронных интеграторов снимались на глаз. Их снабжали специальной цветной шкалой, с которой сравнивали степень потемнения раствора в анодной камере. Конечно, для этого корпус прибора должен быть прозрачным или же иметь специальное смотровое окошко в анодной камере. Единственный недостаток подобного метода считывания показаний химотронного счетчика заключается в его сравнительно невысокой точности (порядка 10%). Однако во многих случаях такая точность вполне достаточна.

Значительно большую точность обеспечивают электрические методы определения концентрации электролита в камерах прибора. Из них, пожалуй, наиболее удобным и простым является способ определения концентрации йода, основанный на использовании явления концентрационной поляризации, о котором мы уже говорили. Дело в том, что разность концентраций электролита, возникающая в камерах прибора в результате электролиза, по сути дела превращает его в обычный концентрационный элемент. Известно, что электродвижущая сила такого элемента будет тем больше, чем больше разность концентраций электролита в его камерах. Таким образом, для определения количества электричества, прошедшего через химотрон за определенный отрезок времени, достаточно измерить величину напряжения, возникшего после этого на его электродах в результате концентрационной поляризации. Так, например, у одного из подобных приборов, в зависимости от времени «зарядки», напряжение на электродах меняется от нуля до 100 миллионных долей вольта.

В настоящее время разработано также несколько специальных типов химотронных интеграторов с электрическим «считыванием». Эти приборы обеспечивают еще большую точность, но по своему устройству сложнее предыдущих, так как имеют большее количество электродов. Например, если в камерах интегратора, помимо основных электродов, поместить еще по одному малому вспомогательному электроду, то можно будет непрерывно контролировать изменение концентраций электролита в камерах прибора. Такая система из двух электродов с разной площадью нам уже известна:

вспомните, она обеспечивает «одностороннее движение» электрического тока в химотронных диодах. Известно, что сила тока в цепи таких электродов зависит от полярности приложенного к ним напряжения. Если малый электрод является анодом, то он отбирает электроны у ионов йода, которых в электролите много, и в цепи проходит значительный ток. Когда же малый электрод становится катодом, то он вынужден «отыскивать» молекулы йода, а их, как известно, в электролите очень мало, и ток в цепи очень невелик. Но ведь концентрация йода в камерах химотронного интегратора изменяется по мере прохождения через него тока. Значит, достаточно будет подключить в цепь между малым (вспомогательным) и большим (основным) электродами отдельную поляризующую батарейку последовательно с микроамперметром, чтобы контролировать количество йода в камерах прибора. В самом деле, если во вспомогательной цепи наш малый электрод является катодом, то на нем будет происходить восстановление молекулярного йода. Естественно, что и ток в его цепи будет падать одновременно с уменьшением концентрации йода в камере прибора. Шкала вспомогательного электроизмерительного прибора может быть проградуирована в единицах количества электричества, например, в миллионных долях кулона, прошедшего через прибор, или в концентрации электролита.

Другой тип четырехэлектродного химотронного интегратора с электрическим «считыванием» носит название тетрода-интегратора. Принцип действия этого прибора основан на том, что величина тока между основным и вспомогательным электродами зависит от концентрации раствора в камере и не зависит (в некоторых пределах) от величины приложенного к ним напряжения. На экранирующем электроде тетрода-интегратора поддерживается некоторый постоянный отрицательный потенциал для восстановления окисленных ионов, стремящихся за счет диффузии пройти в интегральный отсек. Таким образом, экранирующий электрод в этом приборе как бы выполняет роль диффузионного барьера (полупроницаемой перегородки). Ранее нами уже было выяснено, что изменение концентрации электролита сказывается на скорости диффузии: с ростом концентрации электролита скорость диффузии возрастает. Мы также знаем, что в результате «зарядки» концентрация йода в анодной камере интегратора увеличивается. В тетрода-интеграторе это будет связано с ростом тока в его выходной цепи. Поэтому подобные приборы иногда называют интеграторами с токовым считыванием: сила тока в его выходной цепи пропорциональна концентрации раствора и зависит от количества электричества, прошедшего через входную цепь. Шкала индикатора, подключаемого к выходной цепи тетрода-интегратора, также может быть проградуирована в микроку-

лонах. Тетроды-интеграторы обладают обратимыми характеристиками, входное напряжение у них может иметь любую полярность. В настоящее время они применяются в различных измерительных устройствах и в качестве элементов систем автоматики и контроля — в схемах временных реле, усилителях постоянного тока, в технике инфранизких частот и т. д.

В литературе описаны также электрохимические интеграторы, в которых используется знакомый нам процесс катодного восстановления меди из раствора медного купороса с помощью электрического тока. В частности, построен регистрирующий прибор, в котором электрический сигнал управляет толщиной слоя меди, осаждающейся на катоде. Катодом у него служит тончайшая стальная проволочка, протягиваемая часовым механизмом через раствор медного купороса. Расшифровка такой «записи» производится с помощью специальной фотоприставки. Она очень похожа на ту, которая в звуковом кино читает звуковую дорожку в фильме. Электрохимические самописцы очень компактны, экономичны и надежны в работе. Их можно с успехом использовать для регистрации изменяющихся во времени процессов на различных живых объектах.

В заключение хочется отметить, что химотроны-интеграторы в ряде случаев значительно выигрывают по сравнению с подобными электронными и электромеханическими устройствами. Химотроны отличаются своими небольшими размерами, простотой устройства и малым потреблением электроэнергии. Некоторые типы химотронных интеграторов вообще не требуют для работы внешних источников питания. Химотроны не имеют подвижных и изнашивающихся частей. Все это говорит за то, что следует ожидать очень широкого использования подобных приборов в различных областях науки и техники.

ХИМОТРОНЫ-«ОРГАНЫ ЧУВСТВ»

В настоящее время разработаны разнообразные химотронные датчики (чувствительные элементы) для преобразования слабых механических воздействий в электрические сигналы. У них воздействие внешних сил, меняющихся в зависимости от назначения прибора, передается электролиту, в результате чего у электродов возникает поток электролита, что повлечет за собой изменение толщины диффузионного слоя и силы тока в выходной цепи прибора. Состав электролита у них примерно тот же, что и в рассмотренных ранее химотронных приборах (водный раствор йодистого калия с небольшой добавкой йода). Остановимся на их конструктивных особенностях. На рис. 3 приведена упрощенная схема химотронного преобразователя давления в электрический ток. Он состо-

ит из цилиндрического пластмассового корпуса, заполненного электролитом и снабженного двумя эластичными мембранами, способными прогибаться при самом незначительном давлении. Внутри корпуса располагаются два сетчатых платиновых электрода (аноды). Третий платиновый электрод (катод) устанавливается в сквозном отверстии перегородки, отделяющей анодные камеры друг от друга.

Если, не прикасаясь к мембранам, включить прибор в электрическую цепь так, чтобы оба анода были соединены с плюсом источника постоянного тока, а катод последовательно с микроамперметром подключен к минусу источника, то по цепи пойдет очень незначительный ток (в несколько миллионных долей ампера). Величина его определяется скоростью восстановления на катоде молекул йода в ионы йода. А, как мы знаем, содержание йода в электролите очень невелико. После включения тока количество йода в небольшом объеме электролита у катода быстро уменьшается, и в цепи за счет диффузии йода устанавливается небольшой ток (ток «фона»).

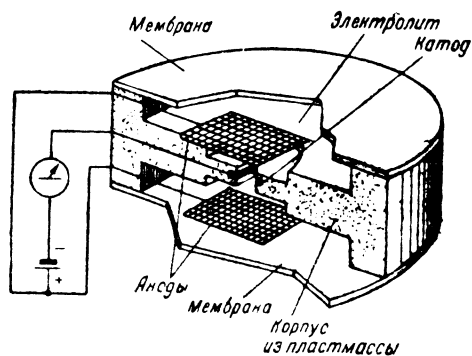


Рис. 3. Устройство химотронного датчика давления.

Но стоит лишь слегка надавить на одну из эластичных мембран, и внутри прибора немедленно возникнет движение электролита: он тут же начнет переливаться из одной камеры в другую. Катод при этом будет интенсивно омываться электролитом, который начнет приносить к нему все новые и новые молекулы йода из глубины раствора. Естественно, что скорость катодного процесса резко увеличится, и ток в цепи катода будет тем больше, чем больше жидкости станет перетекать из одной камеры в другую. Так, например, если ток покоя у прибора был равен 10—12 миллионным долям ампера, то уже при прохождении одной сотой кубического санти-

метра электролита в секунду сквозь отверстие перегородки ток в цепи катода возрастает до 50—60 миллионов ампера. При движении одного кубического сантиметра раствора в секунду ток увеличивается до 300 миллионов долей ампера.

Химотронный датчик давления очень чувствителен: он способен заметить изменение давления на одну миллионную долю атмосферы.

Достаточно незначительно изменить электрическую схему нашего прибора, как он превратится в химотронный детектор (преобразователь) давления: он будет реагировать только на давление одного направления, и вам покажется, что его вторая мембрана как бы потеряла чувствительность. Являясь преобразователем давления одностороннего действия, он станет пригоден для измерения давлений или потоков жидкости, движущихся в одном направлении.

Подобные приборы могут быть с успехом использованы и для измерения скорости движения: ведь под воздействием ускорения электролит тоже начнет перетекать из одной камеры в другую, и электрический прибор-индикатор, подключенный к химотрону, сможет реагировать на каждое, даже очень незначительное изменение ускорения. Так, например, при изменении ускорения от 0,6 до 600 см/сек^2 ток в цепи прибора меняется в пределах от 30 до 260 миллионов ампера.

Прибор-индикатор, подключенный к химотрону, можно проградуировать в единицах величины ускорения, а добавив к устройству еще и химотронный интегратор, прямо в единицах скорости движения, например, метрах в секунду. Три таких датчика (акселерометра), соединенных вместе, можно использовать для определения изменения направления движения в трехмерном пространстве. Очевидно, что габариты и вес подобного миниатюрного химотронного устройства будут ничтожны по сравнению с используемыми в настоящее время навигационными приборами. Кроме того, химотронная навигационная система имеет еще одно очень ценное преимущество перед существующими устройствами: она не нуждается в непосредственной связи с внешней средой. С одинаковым успехом ее можно установить на борту подводного корабля, самолета или ракеты. Везде ее датчики смогут зарегистрировать изменение ускорения в любом направлении.

На рис. 4 приведена конструктивная схема химотронного датчика давления одностороннего действия. Отличие его от датчика, изображенного на рис. 3, заключается лишь в том, что положительный полюс источника постоянного тока соединен не с двумя большими сетчатыми платиновыми электродами, а с одним (анод на рис. 4). Отрицательный полюс источника тока, так же как и на рис. 3, подключен последовательно с прибором-индикатором к платиновому катоду, расположенному в канале, соединяющем камеры прибора. Кроме

того, отрицательный полюс источника тока непосредственно соединен со вторым сетчатым электродом, служащим теперь добавочным катодом. Если прибор не подвергается никаким

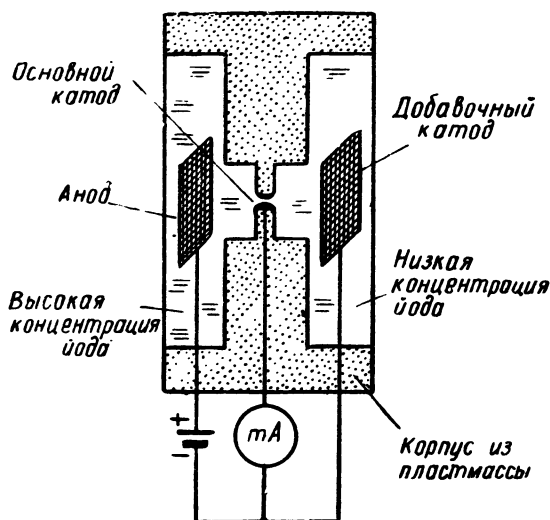


Рис 4. Устройство химотронного детектора давления (преобразователя давления одного направления в электрический ток).

внешним механическим воздействиям, то ток в цепи основного катода, с которым последовательно включен прибор-индикатор, будет по-прежнему очень мал, так как в неподвижном растворе он поддерживается только процессом стационарной диффузии. Но в отличие от схемы на рис. 3 второй большой сетчатый электрод у нас теперь соединен не с плюсом, а с минусом источника тока. Следовательно, на нем происходит теперь не окисление ионов йода в молекулы йода, а восстановление молекул йода в ионы йода (ведь он теперь служит вспомогательным катодом). Иными словами, в камере добавочного катода концентрация йода после включения прибора станет убывать, и практически через некоторое время число молекул йода в этой камере упадет до нуля. На рис. 5 это поясняется надписями: «высокая концентрация йода» в анодной камере и «низкая концентрация йода» в катодной камере.

Если теперь прикоснуться к мембране анодной камеры, то электролит с высокой концентрацией йода начнет перетекать в катодную камеру. Это так же, как и в схеме рис. 3, приведет к значительному росту тока в цепи прибора-индикатора.

Зато прикосновение к мембране катодной камеры теперь уже не будет вызывать никаких изменений тока в цепи прибора; в камере дополнительного катода молекул йода практически нет, так что перемещение электролита из катодного отсека в анодный не будет оказывать заметного влияния на скорость электродного процесса на основном катоде (ведь он омывается теперь чрезвычайно бедным раствором), и сила тока в его цепи останется неизменной.

Односторонние датчики давления с успехом используются для измерения односторонних давлений, ускорений и звукового воздействия в интервале частот от 2 до 10 *гц*. Применение в подобных акустических датчиках резонансных систем позволяет использовать их на частотах до 400 *гц*.

Кроме того, односторонние датчики давления можно применять в качестве чрезвычайно чувствительных детекторов прикосновений, для защиты от случайного повреждения и для других целей.

К недостаткам некоторых химотронных датчиков следует отнести невозможность длительного измерения постоянных потоков или движения из-за ограниченного объема электролита в камерах прибора. Кроме того, они имеют довольно значительную величину температурной зависимости (2—3%).

ХИМОТРОННЫЕ НАСОСЫ

Полтора столетия назад профессор Московского университета Ф. Ф. Рейсс открыл интересное явление. Он обнаружил, что частицы некоторых жидкостей, в том числе, например, дистиллированной воды, обладающих слабой электропроводностью, способны перемещаться под действием электрического поля. Происходит это потому, что ионы в своем движении от анода к катоду способны увлекать частицы полярных жидкостей. Частицы таких жидкостей называют диполями; центры положительных и отрицательных зарядов у них значительно смещены относительно друг друга.

Попытаемся рассмотреть это явление несколько подробнее на примере. Обратимся для этого к рис. 5, на котором изображен отрезок стеклянной трубочки, заполненный дистиллированной водой. Давно было замечено, что если в стеклянную трубочку налить жидкость с очень слабой электропроводностью, то внутренняя поверхность трубочки приобретет избыточный отрицательный заряд. В то же время сама жидкость около этой поверхности получит избыточный положительный заряд. Объясняется это тем, что атомы жидкости оставляют на стекле свои электроны. Таким образом, на границе твердое тело — жидкость возникает так называемый двойной электрический слой, в котором наблюдается упорядоченное расположение частичек жидкости. В нашем примере внутренняя

поверхность стеклянной трубочки приобретает отрицательный заряд, а соприкасающиеся с ней частицы воды, атомы которых теряют электроны, — положительный заряд.

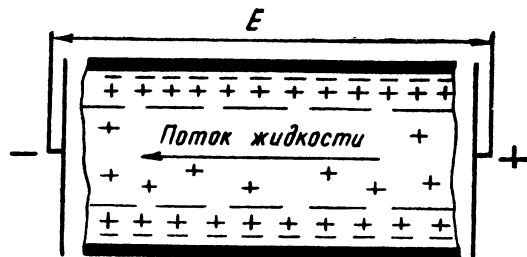


Рис. 5. Образование двойного электрического слоя и движение жидкости под воздействием электрического поля.

Одной из особенностей двойного электрического слоя является значительное повышение в нем вязкости жидкости. Большинство положительных ионов поверхностного слоя жидкости притягивается отрицательно заряженной поверхностью трубочки и не может перемещаться. По мере удаления от поверхности действие электростатических сил убывает, и ионы приобретают подвижность, но чем дальше от поверхности, тем меньше положительных ионов содержится в жидкости (на рис. 5 они показаны в виде знаков «+»). Иными словами, в плотной части двойного электрического слоя, прилегающего к поверхности трубочки, силы сцепления настолько велики, что частицы воды остаются неподвижными. По мере удаления от поверхности эта связь уменьшается (как говорят электрохимики, электрокинетический потенциал убывает по мере удаления от поверхности твердого тела). На некотором расстоянии связь уменьшается настолько, что под влиянием внешнего электрического поля часть двойного электрического слоя способна довольно свободно перемещаться, увлекая за собой молекулы воды.

Таким образом, если на электроды, расположенные у противоположных концов трубки, подать напряжение, как это показано на рис. 5, то ионы придут в движение. В нашем примере такое движение ионов вместе с частичками воды будет происходить справа налево. Вода будет как бы «протаскиваться» за невидимую оболочку по трубочке.

Скорость движения жидкости в трубке зависит от ее сечения, расстояния между электродами, вязкости жидкости, приложенной к электродам электродвижущей силы, диэлектрической проницаемости жидкости и электрокинетического потенциала. Обычно все перечисленные факторы, кроме величины электродвижущей силы, воздействующей на жидкость,

постоянны. Таким образом, скорость потока воды в трубочке, изображенной на рис. 5, будет прямо пропорциональна величине напряжения, поданного на электроды, расположенные у ее противоположных концов.

На рис. 6 изображено устройство так называемого электроосмотического химотронного элемента. По своей конструкции он несколько напоминает знакомый нам химотронный датчик давления (см. рис. 3). Но в отличие от него камеры электрососмотической ячейки не имеют непосредственной связи между собой, так как их отделяет друг от друга пористая перегородка (как в химотронном интеграторе, изображенном на рис. 2). В камерах ячейки установлены серебряные электроды, а знакомый нам электролит заменен дистиллированной водой.

Что же произойдет, если к электродам нашей ячейки подключить источник постоянного тока? Оказывается, под его воздействием вода начнет постепенно просачиваться из одной камеры в другую (в зависимости от полярности электродов). Это легко объяснить, если вспомнить перемещение воды в тонкой стеклянной трубочке под воздействием электрического тока (см. рис. 5). А ведь пористая перегородка, разделяющая камеры нашей ячейки, по сути дела не что иное, как тысячи капилляров, соединяющих ее анодную и катодные камеры. Следовательно, поведение воды в этих микроскопических каналчиках ничем не отличается от рассмотренного нами примера. Это явление носит название электроосмоса.

Работу электроосмотической ячейки можно сравнить с микронасосом, перекачивающим жидкость из одной камеры в другую. При этом давление в одной камере ячейки растет, а в другой уменьшается. Соответственно мембрана первой камеры будет приобретать все более и более выпуклую форму, а во второй прогнется внутрь; ячейка станет похожа на вогнуто-выпуклую линзу. Скорость «перекачки» воды и соответственно величина гидростатического давления на мембра-

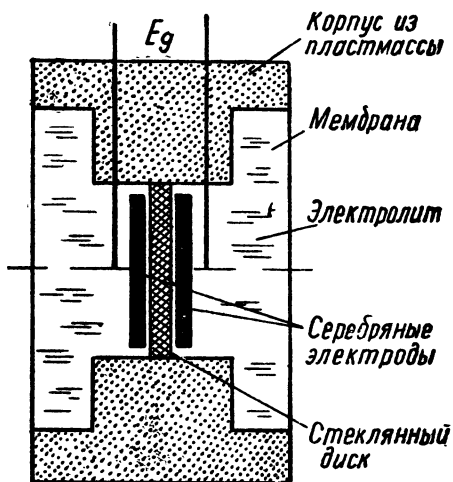


Рис. 6. Устройство электроосмотического химотронного элемента.

зависит от напряжения, подаваемого на электроды ячейки. Жно отметить, что наш микронасос не так уж слаб: с

помощью напряжения 10 в можно создать давление на мембрану, равное давлению водяного столба высотой 1 м. При этом каждую секунду из одной камеры в другую будет перетекать 1 см³ воды.

Рабочие характеристики электроосмотической ячейки зависят от пористости, толщины и диаметра полупроницаемой перегородки и рода рабочей жидкости; по мере необходимости они могут меняться в очень широких пределах.

Химотронные микронасосы в сущности являются преобразователями электрической энергии в механическую (давление жидкости). Такие преобразователи, отличающиеся простотой конструкции, отсутствием трущихся и изнашивающихся частей и обладающие огромным входным сопротивлением (десятки миллионов ом), могут найти очень широкое применение в автоматике и измерительной технике как самостоятельные элементы или в комбинации с другими химотронными приборами.

На рис. 7 показано схематическое устройство электроосмотиче-

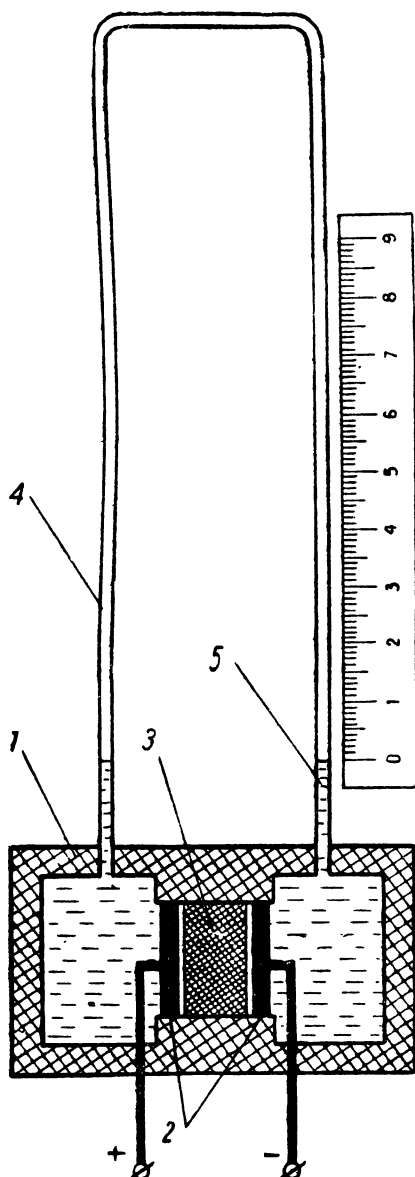


Рис. 7. Электроосмотический вольтметр.

ского вольтметра. Заполненный дистиллированной водой или другой полярной жидкостью, например ацетоном, пластмассовый корпус 1 разделен пористой перегородкой 3 на две камеры, сообщающиеся друг с другом с помощью П-образного капилляра 4. При подаче напряжения на электроды 2 начнется перетекание воды из одной камеры в другую и изменение гидростатического давления в них. Следовательно, произойдет изменение начального уровня воды 5 в П-образной трубочке. Повышение уровня жидкости в правом плече трубки будет продолжаться до тех пор, пока электрический потенциал на входе прибора не будет уравновешен давлением частичек жидкости, стремящихся под действием электроосмотических сил перейти из левой камеры прибора в правую.

Электроосмотическое устройство подобной конструкции можно с успехом использовать для непосредственного измерения величины напряжения на его входе. Чем больше это напряжение, тем выше поднимается столбик жидкости в правом колене П-образной трубочки. Такой вольтметр очень прост, он обладает неплохой чувствительностью: при повышении напряжения на входе прибора от нуля до одного вольта столбик воды вырастет на 100 мм (внутренний диаметр П-образной трубочки равен 1 мм).

Следует заметить, что материал рабочих электродов электроосмотического вольтметра, как и в других электроосмотических приборах, рассчитанных на длительную работу в цепях постоянного тока, должен быть возможно меньше подвержен поляризации. Чаще всего используются электроды, получаемые путем обжига прессованных таблеток из окиси серебра.

Электроосмотический вольтметр можно использовать и для измерений в цепях переменного тока низкой частоты. Для этого нужно последовательно с ним включить химотронный или полупроводниковый диод. С небольшими конструктивными изменениями подобный прибор сможет также выполнять роль высокоомного реле времени, сигнального устройства и т. д.

Электроосмотические ячейки довольно часто используются совместно с другими химотронными и гидравлическими приборами. Аналогичные устройства могут применяться для усиления электрических сигналов и производства ряда математических операций.

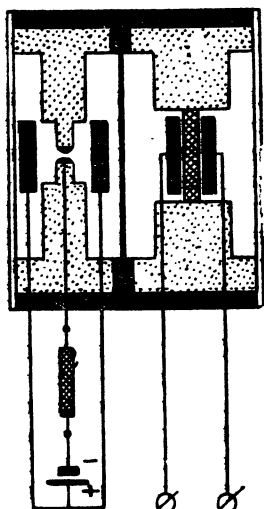
ХИМОТРОНЫ-УСИЛИТЕЛИ

Вы, очевидно, знаете, что усилителями принято называть такие устройства, в которых входной сигнал управляет значительно превосходящей его по мощности энергией источника

питания. По виду используемой энергии усилители можно разделить на две основные группы — электрические и неэлектрические (например, гидравлические или пневматические).

Сейчас мы познакомимся с несколькими необычными усилителями — химотронными. В них нет привычных нам электронных ламп или транзисторов. Вместо них мы увидим уже знакомые нам электрохимические ячейки, только в новом сочетании.

На рис. 8 приведена конструктивная схема простого химотронного усилителя. В нем известная нам электроосмотическая ячейка соединена с химотронным индикатором давления (одна мембрана у них общая). Оказывается, такое объединение химотронных приборов вполне логично: вспомните, что электроосмотическая ячейка способна превращать электрические сигналы в давление жидкости, а мембрана химотронного датчика очень чувствительна к малейшим изменениям давления.



Сигнал

Рис. 8. Химотронный усилитель.

В самом деле, в таком «комбинированном» химотроне, теперь даже очень слабые электрические сигналы (в миллионные доли вольта), преобразуясь в давление жидкости в первой ячейке, смогут воздействовать на чрезвычайно чувствительный датчик давления, способный заметить изменение давления в одну миллионную атмосферы.

Давайте посмотрим, что происходит в нашем приборе. Как только на электродах электроосмотической ячейки появится напряжение, так

сейчас же придет в действие наш микронасос и давление в камере, где общая мембрана станет расти. Мембрана передаст это давление дальше, и во второй ячейке возникнет движение электролита. Мы уже знаем, что чем интенсивнее движение электролита у катода химотронного индикатора давления, тем больше новых молекул йода подводится к нему из глубины раствора. Иначе говоря, скорость катодного процесса у него растет по мере увеличения числа молекул, восстанавливающихся на катоде прибора в ионы йода. В результате сила тока во внешней цепи прибора также увеличивается в несколько раз.

Итак, в усилителе электрический сигнал вначале преобразуется в механическое воздействие (поток жидкости), а потом вновь превращается в электрический ток. В результате

такого последовательного преобразования входного сигнала на выходе прибора может быть получен электрический сигнал в сотни раз больше, чем начальный. Проиллюстрируем это следующим примером. Возьмем электроосмотическую ячейку с полупроницаемой перегородкой в виде пористого диска диаметром 30 мм и толщиной 20 мм, со средним диаметром пор 4 мк. Если на ее электроды будет подано напряжение в 1 в, то количество жидкости, перетекающей в ячейке из камеры в камеру за секунду, будет равно примерно 0,001 см³. В результате на выходе химотронного датчика давления может быть получен ток в 10 тысячных ампера (на нагрузке 100 ом). Иначе говоря, на выходе прибора будет развиваться мощность в 10 тысячных ватта. В то же время сила тока во входной цепи нашего прибора (при напряжении 1 в) будет равна всего лишь 30 миллионным долям ампера. Можно подсчитать, что соотношение между мощностью сигнала на входе и выходной мощностью будет равно примерно 1 : 330. И это не предел; имеются сообщения, что этот результат может быть превышен в несколько раз и что величина усиления в аналогичных устройствах достигает 2000—3000.

Нетрудно сообразить, что уже с помощью двух вышеописанных усилителей, соединенных вместе, сигнал может увеличиться более чем в 10 000 раз, а трех — в несколько миллионов раз. Стоит ли разъяснять значение подобного прибора? Ясно, что это отличный усилитель, способный работать во многих автоматических устройствах. Он очень неприхотлив, экономичен и работает без капризов в любых условиях, кроме, конечно, мороза, в течение десятков лет.

ХИМОТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Изображенный на рис. 9 прибор напоминает только что описанный химотронный усилитель. В нем тоже используется электроосмотическая ячейка и химотронный датчик давления. Только в канале, соединяющем камеры датчика, теперь расположены два катода, а в камере, смежной с электроосмотической ячейкой, большого сетчатого электрода теперь нет. Кроме того, вместо раствора йодистого калия с небольшой добавкой йода электролитом здесь служит только раствор йодистого калия.

Что же произойдет, если на электроды, которые мы станем называть малыми электродами, будет подан электрический сигнал (назовем его сигнал *I*). Нам уже известно, что на электроде с отрицательным потенциалом (малом электроде) будет происходить восстановление ионов йода, а на другом электроде, находящемся под положительным потенциалом, окисление ионов йода. Концентрация восстановленного йода в капилляре будет определяться величиной напря-

жения сигнала 1, поданного на электроды, установленные в капилляре, который соединяет камеры датчика давления. Объем электролита там очень невелик, и скорость электродного процесса тоже незначительна. Микроамперметр № 1, включенный последовательно с одним из малых электродов,

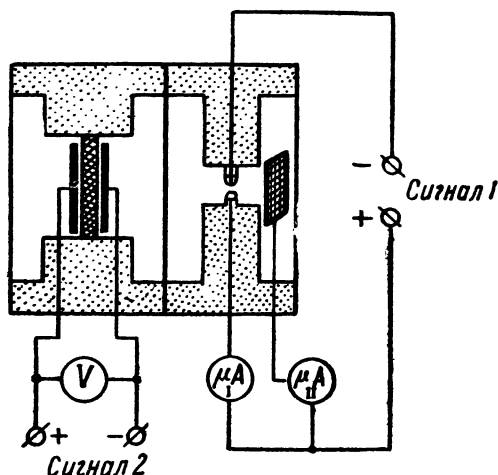


Рис. 9. Химотронный умножитель.

покажет, что в цепи малых электродов установится какой-то небольшой ток, допустим, в две миллионных ампера. Но так как окислительно-восстановительный процесс будет происходить только внутри капилляра, исключаяющего конвективное движение электролита, йод за его пределы выйти не сможет, и ток в цепи большого электрода датчика давления будет равен нулю. Однако если на электроды электроосмотической ячейки так же подать какой-то электрический сигнал (сигнал 2), то вновь заработает знакомый нам микронасос, и электролит из одной камеры датчика начнет перетекать в другую. Скорость перетекания жидкости через канал, соединяющий камеры датчика, будет тем выше, чем больше напряжение, питающее микронасос. Теперь йод из капилляра станет выноситься движущимися через него частичками электролита и восстанавливаться на большом электроде. В цепи этого электрода появится ток, величина которого будет тем больше, чем выше концентрация ионов йода в капилляре и чем выше скорость течения через него электролита. Другими словами, если, например, начальный ток в цепи малых электродов был равен двум миллионным ампера (по микроамперметру № 1), то после того, как на микронасос будет подан сигнал 2, допустим, с напряжением в три десятых вольта, то микроамперметр № 2 покажет силу тока в цепи большого электрода,

равную шести микроампер. Таким образом, этот микроамперметр будет нам все время показывать произведение силы тока первого сигнала (множимое) на напряжение второго сигнала (множитель).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы с вами познакомились лишь с небольшим количеством химотронных приборов. Их сейчас разработано довольно много. Некоторые из них отличаются сверхминиатюрными размерами (меньше спичечной головки), габариты других весьма солидны (с чайный стакан и даже больше). Все зависит от сложности того или иного химотронного устройства и тех функций, которые оно должно выполнять. Химотроника делает только первые шаги, и сейчас, конечно, трудно угадать, с какими химотронными устройствами нам придется иметь дело в ближайшем будущем. Некоторые химотронные приборы еще не успели расстаться с лабораторией, другие уже получили ряд практических применений. Множество давно знакомых ученым электрохимических закономерностей ждет своей очереди, чтобы воплотиться в новые химотронные устройства. Так, например, известно, что растворимые йодиды реагируют на воздействие света. Очевидно, этот принцип может быть использован при разработке химотронных фотоэлементов и более сложных устройств, в которых такие фотоэлемента будут сочетаться с уже известными нам электрохимическими приборами.

Несомненно одно: у химотроники большое будущее. Конечно, отнюдь не следует думать, что химотронные приборы когда-нибудь полностью заменят полупроводниковые и вакуумные. В свое время при появлении транзисторов было сделано немало прогнозов о том, что эра вакуумных приборов закончена и что полупроводниковые вытеснят их в ближайшее время. И все же, несмотря на колоссальный рост во всем мире выпуска полупроводниковых приборов, одновременно возрастет и производство радиоламп. Точно так же химотроны явятся прекрасным дополнением к вакуумным и полупроводниковым приборам.

Давно известно, что чувствительность и оперативность современных автоматических устройств может быть значительно повышена путем включения в них дополнительных блоков, собранных на десятках радиоламп или сотнях транзисторов. В то же время один-два химотрона подчас способны заменить целый такой блок, выполненный на радиолампах или транзисторах. Выгода такой замены очевидна. Химотроны будут не менее популярны при построении всевозможных схем, чем электронные приборы, вместе с которыми им придется в дальнейшем работать. Уже сейчас мы встречаем хими-

троны в различных счетно-решающих устройствах, в авиационных и морских приборах, в военной технике.

Огромная чувствительность химотронов и сравнимая с живыми организмами скорость реакции открывают перед ними еще одну область применения. Вполне возможно, что они станут основой так называемых квазибиологических систем, моделирующих и имитирующих живое.

У химотронных приборов есть еще одна «скрытая» возможность. Мы говорили, что химотронам страшен лишь мороз. Зато они способны работать при очень высоких температурах, скажем, 500°C и даже больше, если электролитом в них будут не растворы, а расплавы солей. В этом заключается одно из их больших преимуществ над полупроводниковыми приборами, для которых «тепловым барьером» является температура $100\text{—}150^{\circ}\text{C}$. Поэтому термостойкие химотроны без сомнения заинтересуют космонавтов, металлургов, геологов, словом, всех, кому потребуются автоматические устройства, работающие при высоких температурах, свойственных многим расплавленным металлам.

Весьма вероятно, что в будущем химотронные приборы станут одним из важнейших средств бионики. По своему совершенству, а может быть, и по принципу действия они, возможно, сравниваются, например, с биологическими системами ориентации.

Известно, что некоторые рыбы обладают «электрическими» органами, которые служат средством не только нападения и защиты, но и «электрогидролокации». Они помогают рыбам отыскивать добычу и безошибочно ориентироваться в мутной воде. Следует отметить, что природные системы ориентации обладают огромной чувствительностью и надежностью. В коричневой воде Нила обитает рыба моримиус. Природа снабдила ее «локатором» такой чувствительности, что она свободно обходит даже самую тонкую сеть. Говорят, это чудесное свойство моримиуса было известно еще древним египтянам: они изображали эту рыбку не иначе, как пойманной на крючок.

Сейчас мы можем позавидовать подобным творениям природы, обладающим способностью не только генерировать и излучать низкочастотные электрические колебания (до 400 колебаний в секунду), но и воспринимать отраженные электрические сигналы ничтожной мощности (в миллионные доли вольта). Хочется тут же отметить, что химотроника уже сейчас располагает чрезвычайно простыми приборами, генерирующими подобные колебания. Правда, они пока еще по экономичности и габаритам уступают биологическим, но ведь у химотроники все впереди.

НАПОМИНАЕМ ПОДПИСЧИКАМ

В 1966 году издательство «Знание» продолжит выпуск подписных брошюр серии

«НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

по 7 факультетам:

естественнонаучному,
технико-экономическому,
сельскохозяйственному,
литературы и искусства,
правовых знаний,
педагогическому,
здоровья.

Это единственные в нашей стране издания, специально предназначенные для слушателей народных университетов и построенные строго по их программам. Брошюры написаны интересно и доступно, поэтому они являются ценным пособием не только для слушателей народных университетов, но и для всех, кто стремится пополнить свои знания и заниматься самообразованием.

Среди авторов брошюр ведущие советские ученые: члены-корреспонденты АН СССР С. В. Вонсовский, В. И. Сифоров, действительный член АМН Д. А. Жданов, член-корреспондент АМН А. А. Покровский, доктора и кандидаты наук И. А. Бородин, В. И. Гуляев, М. Х. Карапетянц, Ф. С. Карзинкин, А. И. Китайгородский, А. Ф. Плате, Э. И. Федин и другие, а также писатели, журналисты, педагоги, общественные и политические деятели.

В 1966 году наряду с обычными брошюрами в 3—5 п. л. будут выходить книги объемом 10—15 п. л. Это пособия, написанные по программе определенного факультета и рассчитанные на то, чтобы дать читателю законченный цикл знаний. Общий объем по каждому факультету 60 печатных листов в год.

Подписаться можно — на каждый факультет отдельно или на несколько вместе — без всяких ограничений в отделениях связи, почтамтах, а также у общественных распространителей печати.

Подписная цена на один факультет:

на 3 месяца	— 45 коп.
на 6 месяцев	— 90 коп.
на 12 месяцев	— 1 руб. 80 коп.

Индексы факультетов в каталоге «Союзпечати» на 1966 год 70057—70063.