

УДК 54:621.317.7

ХЕМОТРОННАЯ ТЕХНИКА

М.И.Фин

Целенаправленное преобразование различного рода информации является содержанием работ современных вычислительных, информационно-измерительных и управляющих систем. В настоящее время мы являемся свидетелями того, что использование традиционных элементов (лампы, транзисторы и т.д.) в ряде случаев ограничивает возможности дальнейшего развития и совершенствования этих систем, а также расширение сферы их применения. Слишком большие собственные помехи, трудность оперирования с очень малыми по величине и частоте сигналами, относительная сложность схем, конструктивно-технологические затруднения, габаритные и весовые соображения и другие факторы определяют целесообразность поиска новых принципов и технических решений для построения преобразователей информации. Указанные обстоятельства послужили объективной причиной возникновения научно-технического направления, связанного с разработкой электрохимических (хемотронных) элементов и устройств на их основе.

Новая отрасль науки и техники — хемотроника — возникла на стыке электрохимии, электроники и приборостроения. Последние достижения в этих областях открыли заманчивые перспективы использования для построения преобразователей информации принципов диффузионной кинетики, обратимых и диссипативных фазовых пере-

ходов на электродах, электрохимических и других явлений. Появился и успешно развивается новый класс приборов, осуществляющих функциональные преобразования, вычислительные и логические операции, выпрямление и усиление, генерирование и модулирование, преобразование неэлектрических величин в электрические и другие действия при ничтожно малом потреблении, высокой чувствительности, потенциально малых размерах, весе, неограниченном сроке службы, схемной простоте и других достоинствах [1 - 6].

Электрохимическими (хемотронными) элементами называют элементы автоматических, измерительных и вычислительных устройств, действие которых основано на использовании различных электрохимических процессов в электролитах (твердых или жидких) и пористых жидкостях. В настоящее время составлена достаточно подробная их классификация по различным признакам и опубликованы сведения об основных характеристиках и параметрах разработанных образцов [1 - 3, 5].

Актуальность исследований и разработок в области хемотроники определяется их большой перспективностью. Об этом, в частности, свидетельствует значительное внимание к этим элементам за рубежом (там они известны под не очень удачным названием "соллоны" - от английского "ions in solutions" - ионы в растворе) [7 - 11].

Работы над соллонами, по всей видимости, были начаты в США еще в годы второй мировой войны и в течение ряда лет держались в секрете, так как эти приборы, в первую очередь, использовались в военной технике. Исследования велись в специальных лабораториях ВМС и артиллерийского ведомства.

К 1957 году промышленность США выпустила несколько партий соллонов для ВМС. Тогда же появились первые сведения о них в открытой печати. С этого времени систематически публикуется ряд статей, и в настоящее время библиография насчитывает несколько сот наименований. С 1959 года исследованиями в области соллонов занимаются в Канаде, а в настоящее время и в ФРГ, Японии, Италии, Польше и Индии. Имеются сведения, что в 1962 году промышленный выпуск интеграторов осуществляется в Англии. На основе соллонов в США разработаны и применяются акустические индикаторы (в частности, шумомеры реактивных двигателей), измерители ускорений, давления, интеграторы для систем наведения са-

молетов и управляемых снарядов, усилители очень низких частот с малым дрейфом и шумом, ячейки памяти в аналоговых машинах, линейные развертывающие устройства, измерители солнечного излучения и др. При этом не следует забывать, что ряд разработок и многие применения, по соображениям секретности (в частности, относящихся к датчикам неэлектрических величин), до сих пор не переданы гласности. Следует подчеркнуть, что большинство появляющихся за рубежом публикаций носят с научно-технической точки зрения осознанно поверхностный, откровенно рекламный характер, не раскрывающий многие важные вопросы, в частности конструктивно-технологические, в ряде случаев имеющие решающее значение.

Несмотря на то, что отечественные разработки и научные исследования ведутся сравнительно недавно и по-настоящему еще не вышли за пределы лабораторий, за последние несколько лет достигнуты значительные успехи благодаря работам Института электрохимии АН СССР, Севастопольского приборостроительного института и других организаций.

Получены важные результаты как в развитии теории и методов расчета, так и в конкретных оригинальных разработках хемотронных элементов, приборов и устройств.

Как известно, действие большинства применяемых в вычислительных системах элементов основано на использовании неоднородного распределения в некотором пространстве носителей зарядов и возможности управлять этим распределением путем внешних воздействий. Таковы транзисторы (неоднородное распределение электронов и дырочных носителей), фотоэлементы, газоразрядные приборы, вакуумные и др. Хемотронные элементы реализуют неоднородное распределение электрических зарядов в ионизированной жидкой среде, в которой протекают электрохимические процессы. Это определяет как их общность, так и специфику по отношению к другим приборам.

На рис. I для иллюстрации схематично показано устройство некоторых наиболее распространенных хемотронных элементов.

Управляемое сопротивление УС (мемистр - рис. I, а) является типичным примером элемента, основанного на мефазовых переходах на электродах окислительно-восстановительной системы. В ампуле с электролитом помещены управляющий электрод I из ме-

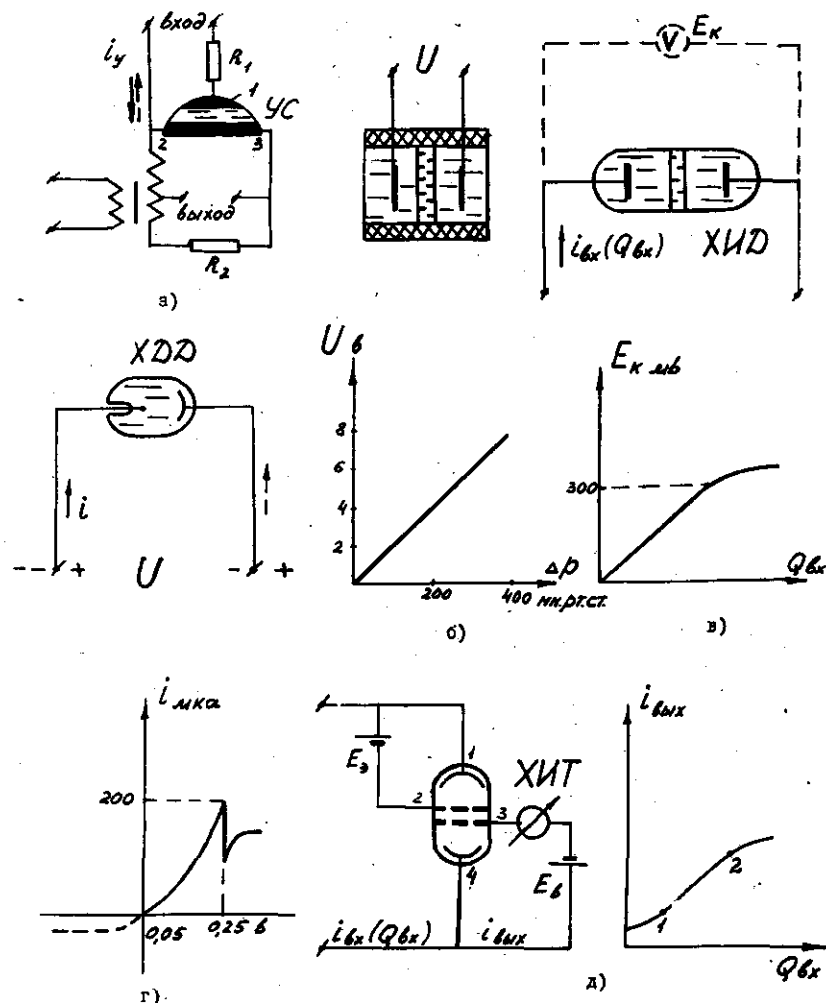


Рис. 1

талла (например, меди или серебра), способного переходить в электролит в ходе электрохимического процесса, и электрод считывания 2-3 в виде пластинки инертного металла или угля. Раствор электролита содержит ионы металла управляющего электрода. В зависимости от направления постоянного тока i_y входной цепи происходит катодное осаждение металла управляющего электрода на электроде считывания или его анодное растворение - возвращение в раствор. Это изменяет активное сопротивление электрода 2-3, измеряемого на переменном токе, например, с помощью представленной на рис. 1, а мостовой схемы. Таким образом, прохождение управляющего тока, не изменяя состав электролита, обеспечивает перенос металла с одного электрода на другой.

Зависимость измеряемого на переменном токе сопротивления R_{uc} от величины тока управления i_y и времени t имеет вид [2, 12]:

$$R_{uc} \approx R_3 \frac{1}{c_3 k \int i_y dt} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\rho y l^2}{\rho y l^2}} \quad (I)$$

где R_3 - сопротивление, учитывающее наличие электрода 1 и раствора электролита;

c_3 и ρ - электрохимический эквивалент и удельное сопротивление осаждаемого металла, соответственно;

y - плотность осаждаемой пленки;

l - длина электрода считывания.

В настоящее время, например, в США, выпускаются мемисторы в нескольких конструктивных исполнениях и с такими параметрами: максимальное сопротивление от 20 до 100 ом (изменения сопротивления от 1 : 20 до 1 : 100), время полного изменения сопротивления от 10 до 120 сек, ток управления от долей десяти миллиампер, рабочий диапазон температур от -15°C до $+100^\circ\text{C}$, температурная нестабильность сопротивления около 0,03% на 1°C , дрейф сопротивления порядка на 1% в месяц, ток считывания - до 1 мА, вес несколько граммов. УС могут быть использованы в качестве интеграторов, элементов памяти с длительным хранением и считыванием информации без её разрушения, потенциометров, задатчиков временных сигналов, счетчиков импульсов и т.д. Имеются сведения об успешном использовании в США мемисторов в са -

монастраивающихся и самоорганизующихся системах в качестве аналоговых элементов памяти [1,2,3,12,13].

В электрокинетическом преобразователе (рис.1,б) используются электрохимические явления, возникающие на границе твердый диэлектрик - полярная жидкость. Внутренний объем, заполненный полярной жидкостью с низкой электропроводностью (вода, ацетон, пропионитрил и др.), пористой инертной перегородкой (стекло, фарфор и др.) разделен на два отсека. При неподвижной жидкости на измерительных электродах, помещенных с двух сторон перегородки, нет электрического сигнала. Движение жидкости под действием внешнего возмущения (например, перепада давления ΔP , приложенного к торцовым ограничивающим мембранам) вызывает появление разности потенциалов U на выходных электродах. Электрокинетический датчик обратим, и, следовательно, наложение разности потенциалов на измерительные электроды со своей стороны вызовет направленное движение жидкости - ее перекачку через перегородку. Зависимость $U = f(\Delta P)$ линейна в широком диапазоне входных воздействий и реализуется в частном диапазоне от долей гц до десятков кгц. Конкретные конструкции преобразователей весьма разнообразны и могут быть датчиками изменяющегося давления, ускорения, вибраций, микронасосами, использоваться для математических операций и т.д. [1,2,3,5]. К достоинствам электрокинетических хемотронных элементов следует отнести, помимо обратимости и линейности преобразования, также низкий уровень шумов, высокое внутреннее сопротивление, весьма широкий диапазон рабочих температур при относительно слабой зависимости чувствительности от температуры.

Наибольшее внимание в настоящее время привлекают хемотронные элементы, работа которых основана на особенностях диффузионной кинетики высокообратимых окислительно-восстановительных систем [1,2,4,6-11,15,16]. Специфические особенности этих элементов определяют перспективность их широкого использования.

Простейший диффузионный (концентрационный) элемент представляет собой герметичный корпус с двумя инертными электродами, заполненный жидким электролитом. Электроды с электролитом образуют обратимую окислительно-восстановительную систему,

отличительным свойством которой является такой ход реакции на электродах, при котором нет убыли компонентов, но существенно изменяется их концентрация вблизи электродов. Например, при наложении внешнего напряжения на платиновые электроды в водном растворе нитритного калия с добавкой мода на электродах протекают реакции окисления и восстановления, сопровождающиеся протеканием тока через элемент. В результате у одного из электродов мод "образуется" (из монов мода), а на другом - "поглощается" (превращается в моны мода). Обратимость реакций определяет неизменность при этом составе раствора в целом.

В зависимости от назначения прибора и выполняемых им функций корпус может быть разделен тем или иным способом на отсеки, число электродов - два и более, форма и размеры их различны или одинаковы.

Величина и характер тока, протекающего в приборе, зависят от концентрации компонентов раствора, от скорости подведения их к электродам, приложенного напряжения, площадей электродов и длительности действия прибора. Если учесть, что на скорость подачи компонентов из глубины раствора к электродам влияют освещенность, температура, вибрации, давление, ускорение и многие другие механические и немеханические воздействия, становится очевидной многофункциональность элементов этого типа как одно из основных свойств. Использование указанных возможно - стей управления величиной и характером тока и лежит в основе действия диффузионных (концентрационных) элементов.

Говоря об общих особенностях этих элементов, необходимо указать, что исходные концентрации реагирующих компонентов, как правило, существенно различны. Благодаря этому оказывается возможным управлять величиной тока путем воздействия на ход реакции у одного из электродов.

Следует также иметь в виду, что вследствие малой подвижности монов в растворе (порядка $5 \cdot 10^{-4}$ см²/в.сек), во всяком случае меньшей, чем у электронов в вакууме и монов в разреженных газах, частотный диапазон ограничен низкими частотами. Именно в области низких частот электрохимические элементы должны существенно дополнить возможности электронных, магнитных и других, а в ряде случаев успешно заменить их.

Известные в настоящее время концентрационные преобразо -

ватели можно разделить на две большие группы:

1. Приборы, при действии которых электролит в целом остается неподвижным относительно электродов. Это, по сути, преобразователи электрических сигналов (рис.1, в, г, д).

2. Приборы с перемещающимся раствором под действием внешнего возмущения (рис.2). В подавляющем большинстве это различного рода датчики.

Рассмотрим один из конкретных концентрационных преобразователей электрических сигналов — тетрод (ХИТ), устройство и схема включения которого приведены на рис.1, д [4, 7-11, 15, 16]. В герметичном корпусе располагаются четыре электрода, образующие с электролитом три обратимые окислительно-восстановительные системы, одновременное действие которых определяет свойства и особенности прибора. Сигнал от внешнего источника тока i_{bx} протекает между основными — 1 и общим — 4 электродами ХИТ (первая система). При этом непосредственно вблизи указанных электродов происходит изменение количества окислителя в соответствии с законом Фарадея, т.е. пропорционально количеству электричества $Q_{bx} = \int_0^t i_{bx} dt$, прошедшему за время t через эту окислительно-восстановительную систему. На выходной электрод 3 подан относительно электрода 4 отрицательный потенциал, величина которого обеспечивает протекание в цепи электродов 3 и 4 тока $i_{вых}$, являющегося предельно диффузионным током (вторая система). Предельно диффузионный ток однозначно определяется концентрацией окислителя у электрода 4, и характеристика преобразования ХИТ имеет вид (рис.1, д):

$$i_{вых} = I_{вых.0} + K \int_0^t i_{bx} dt,$$

где $I_{вых.0}$ — нулевой (равновесный) ток,
 K — чувствительность тетрода.

ХИТ является не только интегратором, но и элементом памяти, поскольку после прекращения i_{bx} , значение $i_{вых}$ в принципе должно сохраняться неограниченно долго (третья окислительно-восстановительная система из электродов 1-2, питаемая от своего отдельного источника э.д.с., является вспомогательной и служит для повышения точности интегрирования и длительности хранения информации).

При работе от внешнего источника электрических сигналов

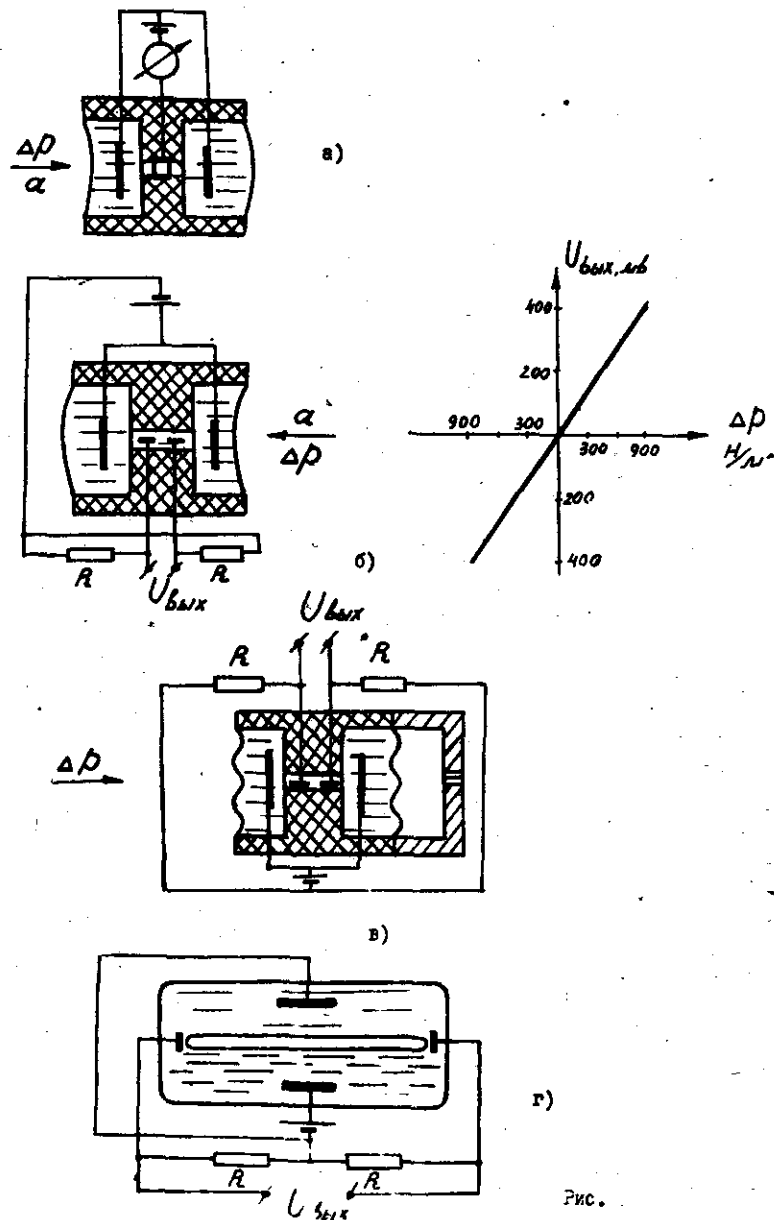


Рис.

малым внутренним сопротивлением (источник Э.Д.С.) ХИТ ведет себя как усилительный элемент, подобно пентоду и транзистору, но с весьма большой крутизной, достигающей в некоторых образцах нескольких сот мА/В [4,9,15,16]. В табл. I приведены основные технические параметры серийных тетродов СИА и некоторых экспериментальных образцов Севастопольского приборостроительного института.

Принципиальные свойства интегрирующего тетрода: интегрирование тока, запоминание интеграла, усиление, реверсивность, малогабаритность — обеспечивают тетроду широкое применение. Функциональные преобразователи, устройства памяти, различного рода измерители интегральных значений, линейные развертывающие устройства, задачки времени, усилители постоянных сигналов и т.д. — вот далеко не полный перечень устройств вычислительной, измерительной техники и автоматики, реализованных на базе тетрода [4,6,16].

На рис. 3 приведена структурная схема функциональных пре-

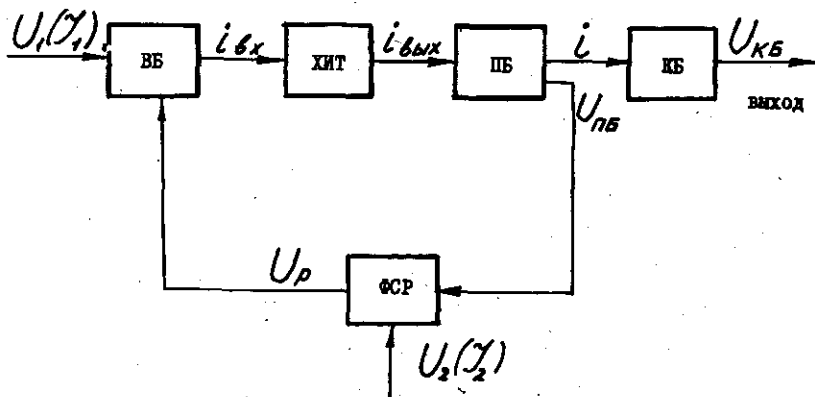


Рис. 3. Блок-схема функционального преобразователя на основе ХИТ

образователей (ФП) на базе ХИТ, использующих совместную работу тетрода в циклическом режиме с электронными, полупроводниковыми и другими элементами и осуществляющих преобразование аналоговой первичной информации в унифицированные цифровые сиг-

Таблица I

Параметры	Тип тетрода				
	SE10	SE100	SE110	СН-1	СН-2
Максимально допустимое напряжение между электродами, В	0,75	0,75	0,75	0,7	0,7
Максимальный выходной ток, мА	100	25	10	125	-
Максимальный ток, мА	-	-	-	1,0	-
Чувствительность, сек ⁻¹	1	1	1	5	5
Выходное сопротивление, Ом	0,2	0,2	2,6	0,6	1 ÷ 1,5
Входное сопротивление, Ом	150	150	25	15	50
Экранированный ток, мА	650	900	1500	400	100
Выходной равновесный ток, мА	50	10	2	10	30
Максимально применяемое напряжение, мВ	400	350	350	200	200
Крутизна, мА/В	-	-	-	-	40
Приведенный дрейф в течение 1 мин, мкА	± 0,05	± 0,05	± 0,05	-	-
Дрейф тока покоя % за час.	-	-	-	0,05	0,05
Диапазон рабочих температур, °C	0-60	0-60	0-60	5-40	5-40
Температурный коэффициент, % на 1°C	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Габариты, мм	9x38	18x16	18x16	30x17	20x15

налы [4,6]. Входной блок (ВБ) предназначен для согласования выхода датчика первичных электрических сигналов со входом ХИТ и реверса его входного тока. Пороговый блок (ПБ) фиксирует достижение на выходе ХИТ пороговых значений и вырабатывает сигнал для управления блоком формирования сигналов реверса (ФСР). ФСР, управляемый ПБ, воздействует необходимым образом на ВБ. Командный блок (КБ) — это усилитель-преобразователь сигналов, поступающих с ПБ, в форму, удобную для дальнейшего использования в системах управления или вычислительных. При всем многообразии функций, реализуемых ФП, структура ХИТ, ПБ и КБ не меняется. ВБ, ПБ, КБ и ФСР строятся обычно по типу ключевых и усилительных схем и характер функциональной обработки первичной информации в основном определяется конкретным исполнением блоков ВБ и ФСР. Синтезируя ФП с различными ВБ и ФСР, оказывается возможным осуществлять преобразование входного сигнала в частоту импульсов, коэффициент заполнения, определение частного $\frac{f}{f_0}$, прямо пропорциональное и обратно пропорциональное преобразование и др. Так были разработаны и успешно испытаны звенья устройств интегральной оценки для расходомеров и дозиметров, широко-импульсных регуляторов с компенсацией нелинейности исполнительного механизма или процесса, множительные узлы вычислительных устройств, в частности, для приборов вероятностной оценки (математическое ожидание, интегральные критерии) и т.д. Схемная простота решений, малое потребление, достаточная точность при ничтожном потреблении и определенной универсальности являются существенными достоинствами разработанных ФП [4,6,16].

Отличительными особенностями усилителей постоянных и медленно меняющихся сигналов на ХИТ, определяющими их перспективность, являются весьма малые собственные шум и дрейф, не превышающие нескольких мкВ в сутки [4,6,15,16,17].

Основной частью всех диффузионных преобразователей неэлектрических величин — датчиков (рис.2) является канал со считывающим катодом, конструкцией и режимом работы которого определяются технические характеристики прибора. Эта часть датчика вместе с анодами, по сути, представляет собой преобразователь расхода электролита в электрический ток. С принципиальной точки зрения на базе такого преобразователя может быть реализован датчик, реагирующий на любую физическую величину, способную вы-

Таблица 2

№ п/п	Тип прибора	Назначение, применение	Диапазон по входному сигналу	Частотный диапазон зон (Гц)	Чувствительность	Габариты (мм)	Вес (г)	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Приемник измененный акустического или гидродинамического давления	Выделение и измерение (преобразование в ток) малых по амплитуде переменных составляющих давления. Может быть применен для обнаружения незначительных изменений атмосферного или донного давления, при изучении низкочастотного атмосферного шума и т.д.	1-2000 м/м ²	0,005 - ~ 1,5	3·10 ⁻⁴ в м ² /н	40x50	220	Прибор знакочувствителен
2.	Применяется гидродинамического давления.	Преобразование в электрический сигнал высот волн. В комбинации с самонаведением или другим регистрирующим прибором может быть использован для записи профиля волн.	Волны высотой до 10 м	0,005 - ~ 1,5		40x50	250	Прибор знакочувствителен. В разрабатываемом виде предназначен для дрейфующего вольтметра открытого моря.

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.	Датчик давлений	Преобразование медленно меняющихся давлений в эл. ток. Возможно измерение малых расходов жидкостей.	$1-2000 \frac{в}{м^2}$	$0,005-1,5$	$4 \cdot 10^{-7} \frac{в \cdot сек^2}{м}$	10×30	50	Прибор знаменителен при дифференциальной обработке измерений.
4.	Датчик линейных ускорений	Преобразование линейных ускорений в эл. сигнал. В оптический кондукторном кондукторе преобразование для гидрофизических исследований.	до $50 \frac{м}{сек^2}$	$0,005-1,5$	$3 \cdot 10^{-6} \frac{в \cdot сек^2}{м}$	30×40	100	Датчик знаменителен при дифференциальной обработке измерений. В оптический кондукторном кондукторе преобразование для гидрофизических исследований.
5.	Датчик угловых ускорений	Преобразование угловых ускорений в электрический ток.	до $1 \frac{рад}{сек^2}$	$0-1$	$3 \cdot 10^{-4} \frac{в \cdot сек^2}{рад}$			Датчик знаменителен. Конструктивно выполнен из нескольких элементов.
6.	Датчик ускорений	Преобразование линейных ускорений в электрический ток	до $200 \frac{м}{сек^2}$	$0-1$	$3 \cdot 10^{-3} \frac{в \cdot сек^2}{м}$ (при $R_n = 1000 \text{ ом}$)	20×100	150	Датчик знаменителен. Диапазон ускорений может быть существенно расширен.

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.	Датчик расхода		до $5 \cdot 10^{-5} \frac{см^3}{сек}$	$0-1,5$	$8 \frac{в \cdot сек}{м^3}$			
8.	Датчик микроперемещений	Измерение малых перемещений. Может быть применен при сейсмических исследованиях.	до 6 мк	$0,05-1,5$	$0,1 \text{ в/мк}$	60×45	400	Прибор знаменителен.

звать перетекание раствора электролита из одного отсека в другой.

Уже в настоящее время разработаны датчики вибраций, микроперемещений, давления, ускорения, высоты волны и периода, скорости и т.д. В зависимости от конструкции преобразователя датчики могут иметь различного рода характеристики преобразования (степенную, логарифмическую, корневую). Это означает, что они могут быть использованы также для функционального преобразования неэлектрических величин [1-4,6].

Наибольший интерес для вычислительной техники и автоматики представляют датчики с линейной характеристикой преобразования, теория, методы расчета и конструкции которых успешно развиваются [4,6,18]. В табл.2 приведены технические характеристики и параметры датчиков с линейной характеристикой, реализованных в Севастопольском приборостроительном институте и успешно прошедших экспериментальную проверку в различных условиях. Там же указаны некоторые их возможные области применения. В этих датчиках использованы плоские или цилиндрические преобразователи расхода с потреблением около 10^{-4} Вт в режиме покоя. Все датчики достаточно малогабаритны, имеют высокую чувствительность, широкий диапазон линейного преобразования по входу и способны реагировать на очень низкие частоты [4]. Следует заметить, что полученные параметры не предельны, совершенствование конструкций и технологии несомненно еще улучшит их.

Подавляющее большинство известных диффузионных датчиков, в том числе содержащихся на рис.2 и табл.2, описаны достаточно подробно [4,6,18]. Целесообразно поэтому привести некоторые пояснения лишь относительно нетривиальной и перспективной конструкции датчика линейных ускорений (рис.2,г), ранее не описанной [20]. Два параллельных отсека соединены каналами в замкнутый контур. Эти каналы с электродами и есть линейные преобразователи расхода электролита в электрический ток. Изложенным соответствующим образом электроды обеспечивают в любых условиях постоянство разности плотностей электролита в отсеках. В одном из отсеков плотность всегда заметно выше, нежели в другом. При действии по оси прибора линейного ускорения возникает циркуляция раствора электролита по контуру в направлении, зависящем от знака ускорения. Вследствие этого в цепи соответст-

щего считывающего катода происходит увеличение тока и на выходе появляется напряжение, пропорциональное ускорению, полярность которого изменяется при изменении направления действия ускорения. В отличие от известных хемотронных акселерометров с мембранами, разработанный акселерометр позволяет преобразовывать в электрический сигнал не только переменные, но и постоянные ускорения. Использование в качестве инерционной массы электролита, отсутствие подвижных узлов и трущихся поверхностей, герметичность и высокая прочность сводят к минимуму ошибки, присущие другим типам акселерометров.

Рассмотренными примерами далеко не исчерпываются возможности использования хемотронного принципа. В настоящее время разработаны также детектирующие диоды и схемы преобразования (триггеры, генераторы, ограничители и др.), множительные, модулирующие, дифференцирующие и многие другие устройства.

Ориентировочные подсчеты показывают, что при использовании разработываемых устройств в ряде случаев может быть достигнут не только технический выигрыш, но и экономический эффект. Так, например, усилитель медленно меняющихся сигналов на ХИТ, по-видимому, окажется в 3-5 раз дешевле применяющихся ныне, расходомеры некоторых типов - в 6-7 раз, ячейки памяти - в 2-3 раза.

Однако и изложенного, как нам кажется, вполне достаточно для весьма оптимистической оценки перспектив применения хемотронных, в частности, диффузионных приборов и устройств в технике.

Имеющийся опыт позволяет определить ряд задач, где применение хемотронных приборов технически и экономически предпочтительнее (интегральные измерения, навигационные системы, измерения энергии, шума, вибраций, исследования моря, метеорологические измерения, обучающиеся и самонастраивающиеся системы, биологические модели, регуляторы и т.д. [1-20]). В этих и многих других случаях с наибольшей полнотой проявляется такие достоинства хемотронных приборов, как возможность работы при мощностях менее милливатта (низкие рабочие напряжения и токи), преобразование неэлектрической величины в электрическую такой мощности, при которой не требуется дополнительное усиление, малые габариты, замена одним элементом целой схемы, малый соб-

венный шум, очень малый порог чувствительности, инфранизкочастотный диапазон и т.д.

Следует отметить три принципиальные особенности, на наш взгляд, решающим образом подтверждающие важное место, которое хемотронные элементы должны занять в управляющих комплексах.

Как было указано ранее, значительная часть хемотронных элементов обладает многофункциональностью — в зависимости от режима работы осуществляются различные преобразования. Это ценное свойство уже успешно используется. Например, в машине Digital с помощью одних и тех же тетродов осуществляется усиление сигналов, запоминание и интегрально-пропорциональное регулирование [19]. Такое совмещение функций весьма заманчиво и многообещающее.

Не менее важно то, что сравнительно небольшим числом хемотронных приборов и устройств охватывается практически все многообразие функциональных преобразований информации, осуществляемых в вычислительных и управляющих системах. Хемотронные элементы способны обеспечить ввод, переработку, хранение и выдачу информации, и принципиально возможно создание систем из одних хемотронных приборов и устройств. Именно этим, в частности, объясняется внимание, которое в последнее время уделяется попыткам построения сложных аналоговых вычислительных средств различного функционального назначения, целиком основанных на электрохимических процессах и способных к самоорганизации [14,16].

Наконец, справедливо отмечается в ряде работ [3,4,16], что хемотронные элементы весьма перспективны для микроминиатюризации как их самих, так и аппаратных комплексов на их основе. В этой связи к сказанному выше следует добавить, что в хемотронных элементах определяющие процессы происходят в узких приэлектродных зонах, и все остальное пространство в принципе может быть исключено. В этом ключ к сверхминиатюризации. Важно подчеркнуть, что, как показали исследования, микроминиатюризация хемотронных элементов в ряде случаев существенно улучшает их параметры [15,16].

Не следует, однако, забывать, что мы находимся пока в начале пути, который должна пройти хемотронная техника. Становление хемотроники, широкое применение ее достижений в значительной степени зависят от того, как быстро и глубоко будут решаться

проблемы теоретического и прикладного характера, которые возникли в этой связи перед электрохимией, приборостроением, автоматикой. Исследование условий стабильного протекания электрохимических процессов, не ограниченных во времени, выбор соответствующих материалов и сред должны указать способы обеспечения высокой стабильности и надежности. В непосредственной связи с этим стоят сложные конструкторско-технологические вопросы (герметизация, миниатюризация и т.д.), так как, по сути, необходимо создать особую ветвь приборостроения. Специфические свойства и характеристики хемотронных элементов определяют особенности структуры и принципов проектирования устройств и систем на их основе. Необходимо значительно продвигаться в решении задач совместной работы хемотронных элементов друг с другом и элементами другого типа. Заманчивые перспективы, открываемые хемотроникой, подтверждают, что мы еще далеки от знания ее предельных возможностей. Следовательно, необходимо также продолжить и расширить научный и инженерный поиск новых принципов построения элементов, приборов и устройств этого класса.

Л и т е р а т у р а

1. ВОРОНКОВ Г.Я., ГУРЕВИЧ М.А., ФЕДОРИН М.А. Хемотронные устройства, ВНИИЭМ, М., 1965.
2. БОРОВКОВ В.С., ГРАФОВ Б.М., НОВИКОВ А.А., НОВИЦКИЙ М.А., СОКОЛОВ Л.А. Электрохимические преобразователи информации, М., "Наука", 1966.
3. ШОМЫГИН А.П. Электрохимические элементы. — "Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации", У. 20008-1, М., 1967, вып. 8.
4. ФИШ М.А. Хемотронные приборы в автоматике, Киев, "Техника", 1967.
5. КАСИМ-ЗАДЕ М.С. Электротехнические преобразователи и возможности их применения. — "Автоматический контроль и методы электрических измерений", Новосибирск, СО АН СССР, 1964, том 2, 86-92.
6. ЛИДОРЕНКО Н.С., ФИШ М.А. Применение хемотронных преобразователей в измерительной технике. "Измерительная техника", 1967, № 7,3.
7. ESTER N.N. Solions, their characteristics and Commercial applications, IRE Trans Industrial Electronics, 1963, N 1, 91.
8. MURD R.M., LANE R.N. Principles of very low power electrochemical control devices. Journal of Electrochem. Soc., 1957, 104, 12, 727.

9. SIMMERMAN R. Diody i tetrody elektrochemiczne Solion. Zeszyty naukowej politechniki, Gdanskiej, 1967, 7, N 3, 15.
10. EULER J. Das Solion, ein elektrochemisches Steuerelement. Elektrotechnische Zeitschrift, 1960, 12, N 22, 537.
11. JOACHIM K. Das Solion Elektronik, 1962, 11, N 1, 7.
12. БОРОВКОВ В.С., ТРЕЙЕР В.В. Электрохимические аналоговые запоминающие элементы для устройств автоматики и вычислительной техники, Всесоюзный заочный энергетический институт, М., 1967.
13. SOLION used in adaptive learning units. Electronic Components, 1963, 4, N 10, 1014.
14. ПАСК Г. Естественная история цепей, - "Самоорганизующиеся системы", "Мир", 1964.
15. НИГМАТУЛЛИН Р.И. Теоретическое исследование электрохимической ячейки и вопросы электроники жидкого тела, Докторская диссертация, Казань, 1965.
16. НИГМАТУЛЛИН Р.И., КЛИЗАРОВ А.Б., СУЛТАНОВ Э.И. Концентрационные электрохимические преобразователи электрических сигналов. - "Радиозлектроника", Известия вузов СССР, I., том XII, 1969, № 4.
17. ФИМ М.Л., БОГОМАЗОВ А.С., СОРОКИНА А.П., СПИРИДОНОВ В.В., СТЕЛМАХ Э.Н., ЧЕРНЕЦКИЙ В.И. Последовательно-балансные хемотронные усилители. - "Приборостроение", изд. "Техника", №7.
18. ФИМ М.Л., ГРУЗИНЦЕВ, ЛИНЕЦКИЙ А.И. Некоторые вопросы проектирования линейных хемотронных датчиков давления, "Приборостроение", "Техника", Киев, 1968, № 5.
19. GOMOLAK L.S. DDC direct digital control in industry, Electronics, 1964, 37, N 26, 24.
20. ЛИНЕЦКИЙ А.И., ТЮТЮНИКОВ М.М., ФИМ М.А. Устройство для измерения линейного ускорения, Авторское свидетельство СССР № 173488, кл. 4201, Приоритет от 27 июля 1964 г., Госреестр 20 мая 1965 г.

Поступила в редакцию
13.I.1970