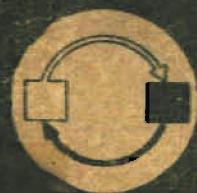


ЛАТВИЙСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. ПЕТРА СТУЧКИ



КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ

НАУЧНОГО

ЭКСПЕРИМЕНТА

РИГА-1968

Латвийский Государственный
ордена Трудового Красного Знамени университет им.П.Стучки

/ 46

Проблемная лаборатория физики полупроводников

К И Б Е Р Н Е Т И З А Ц И Я
Н А У Ч Н О Г О Э К С П Е Р И М Е Н Т А

Рига, 1968.

Сборник представляет собой коллективный труд, обобщающий ряд работ Проблемной лаборатории физики полупроводников ЛГУ им. П.Стучки по применению управляюще-вычислительной и дискретной измерительно-воздействующей техники в физическом эксперименте. Сборник предназначен для научных работников и инженеров, интересующихся внедрением новейшей техники и методов в научный эксперимент, а также студентам старших курсов физико-математического факультета.



1590-9-68

ПРЕДИСЛОВИЕ

Кибернетизация научного эксперимента есть особый процесс развития опытно-экспериментальной и методической базы в целях существенного повышения эффективности научных исследований. Особенность его в настоящее время заключается в проявлении двух тенденций:

- 1) использование кибернетических способов организации базы, и
- 2) внедрение вычислительно-управляющей и дискретной измерительно-воздействующей техники в эксперимент.

Кибернетизация не предполагает сплошной автоматизации эксперимента, т.е. полную замену человека техническими средствами. Опыт показал, что, будучи необоснованно примененной, сплошная автоматизация себя не оправдывает.

Более значительных успехов можно добиться на пути разумного сочетания и взаимодополнения возможностей чел. — ка, вычислительно-управляющей и измерительно-воздействующей техники.

Работы по кибернетизации научного эксперимента начаты в Проблемной лаборатории физики полупроводников (ПЛФП) Латвийского ордена Трудового Красного Знамени Государственного университета им. П.Стучки с 1963 г. За истекший период 1963—1968 г.г. работы переросли стадию общих идей и в данное время находятся в стадии практического развития.

Настоящий сборник не освещает полностью весь комплекс соответствующих разработок ПЛФП. Сюда не вошли, обладающие несомненной ценностью, работы по конструированию оптико-механических узлов систем исследования, нестандартных узлов систем и точной механики. Малое освещение получили работы электроников лаборатории, известные далеко за пределами Латвии своими оригинальными разработками дискретных измерителей. Совершенно отсутствуют главы о новых физических методах, разработанных в ПЛФП и внедренных ею в ряде организаций. Не рассмотрен целый ряд математических программ, успешно используемых ПЛФП и многие другие вопросы, связанные с кибернетизацией научного эксперимента.

Фамилии авторов глав и отдельных параграфов сборника: Кузьмин Ю.Я. (1 глава, 2.2), Бернуп А.А. (6 глава, 2.1), Кузьмина Л.М. (3 глава: введение, 3.1., 3.2., 3.5), Цирулис Я.П. (4 глава, 3.4), Тардекак Э.Э. (5 глава), Гайлитис А.А. (3.3).

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность заведующему Проблемной лаборатории физики полупроводников И.К. Витолу, по инициативе и при постоянной поддержке которого был написан этот сборник.

Авторы сознают, что сборник страдает целым рядом недостатков, поэтому были бы признательны всякому, кто свои соответствующие замечания и предложения направит по адресу: г. Рига, Латвийский Госуниверситет им. П.Стучки, Проблемная лаборатория физики полупроводников.

Рига, март, 1968 г.

Г Л А В А I

НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ КИБЕРНЕТИЗАЦИИ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.

ВВЕДЕНИЕ

Материал этого параграфа написан в значительной степени на основе /I + I5/.

0.1. "Большая" задача.

В настоящее время ежегодно получают более 100000 различных новых веществ /25/. Если поставить задачу исследования этих веществ хотя бы на среднем уровне, то для одних только измерений потребуются реализовать значительное количество ситуаций.

Действительно, пусть эксперименты сводятся к измерению 10 + 20 параметров при 10 + изменяющихся параметрах воздействий (например, свет, температура, ток, рентген, магнитное поле и т.п.) — это весьма умеренные цифры. Пусть среднее количество точек изменения для каждого из воздействий составляет 10 + 100. Тогда минимальное количество ситуаций составит

$$10^5 \cdot 10^{10} = 10^{15},$$

а "умеренное" максимальное

$$10^5 \cdot 100^{20} = 10^{45}.$$

Это значит, что при попытке решить проблему "в лоб" обычными методиками потребуются на одни только измерения потратить $10^{10} + 10^{40}$ человеко-лет.

Этот элементарный пример наглядно показывает какие требования предъявляются к современным исследованиям с точки зрения разработки новых методик и новой техники, способной справиться с подобного рода "большими" задачами.

Основной предварительный вывод заключается в том, что методы должны быть такими, чтобы при числе ситуаций на много порядков меньших названных цифр обеспечить съем наиболее существенной информации, а техника исследований должна реализовать эти методы за минимальное время при хорошем качестве реализации.

Большую помощь в решении подобных задач может оказать кибернетика, которая к настоящему времени развила целый ряд методов и средств для решения подобных задач. Наиболее многообещающими средствами при этом являются управляюще-вычислительные машины (УВМ). Но для достаточно эффективного использования УВМ необходимо прежде всего вскрыть сущность научного эксперимента, обобщить и переработать современную методику с точки зрения возможности ее алгоритмизации.

Однако обобщение методов исследований, из-за сильной дифференциации в науке, ведется крайне слабо, это же можно сказать и о выработке единых требований к исследовательской технике.

Рассмотрим несколько подробнее остальные методологические проблемы.

0.2. В области непосредственного получения научно-исследовательской информации (НИИ) можно выделить:

А. Проблему точности измерений. Это одна из основных проблем исследований. Известно, что в ряде случаев для успешного изучения, например, физических явлений требуются экспериментальные данные очень высокой точности (4 + 6 знаков и выше). В то время как средняя точность современных измерений составляет лишь 2 + 4 знака. Известно, что точность измерений определяется точностью датчиков и источников воздействий на объект исследований. Кибернетика предлагает, по крайней мере, три способа решения этой задачи. Во-первых, переход на дискретную технику измерений, оптимально приспособившуюся к объекту. Во-вторых, применение математических методов повышения точности в процессе экспериментирования (усреднение, фильтрация, сглаживание). И, в-третьих, использование УВМ для реализации оптимальных для точности условий опыта.

Б. Другой проблемой является скорость получения НИИ. Эта проблема особенно остро встает при исследовании быстропротекающих процессов, при которых требуются скорости около $10^3 + 10^9$ изм/сек. Для этих целей также можно воспользоваться дискретной измерительной техникой /13/, для которой, как правило, характерны относительно высокие скорости. Кроме того, большие перспективы открывают кибернетические измерители с оптимально настраиваемым шагом измерения (адаптивные преобразователи).

В. Третья проблема заключается в надежности систем получения НИИ. Ибо при постоянном усложнении эксперимента, усложняется и используемая техника, а это, при неправильной ее организации, неизбежно ведет к резкому снижению надежности. В кибернетике известны методы построения надежных систем из ненадежных элементов /16/.

Г. На последующей обработке НИИ сильно сказывается степень полноты НИИ, под которой понимается соответствие объема получаемой НИИ последующим теоретическим построениям и планированию дальнейших исследований. Для оценки полноты также целесообразно применение УВМ, с помощью которой можно уже в ходе получения НИИ делать заключения о недостающих звеньях эксперимента. Наиболее просто решается эта проблема при постановке комплексного эксперимента, когда любой недостаток НИИ устраняется коммутированием соответствующей схемы, или включением дополнительных измерительных каналов.

0.3. В области хранения НИИ важны следующие 4 проблемы.

А. Хранение больших объемов измерительной информации. Эта проблема возникает особенно при проведении статистических исследований и комплексных экспериментов.

Б. В связи с тем, что обработка НИИ обычно проводится многократно и в основном после эксперимента, не менее важным является вопрос о продолжительности хранения НИИ.

В. При приеме на хранение и выдаче НИИ на обработку, а также при сортировке встает проблема увеличения скорости обмена и пересылок хранящейся НИИ.

Г. И, наконец, от надежности хранения НИИ зависит исход возможности последующих операций над НИИ.

Известно, что кибернетика предлагает заменить традиционные методы хранения НИИ в виде диаграмм и таблиц на более компактные и приспособленные к последующей обработке НИИ магнитные ленты, перфоленты, магнитные барабаны и диски, а также целую гамму различных числовых оперативных запоминающих устройств.

0.4. В области обработки НИИ также можно указать не менее четырех проблем, весьма похожих на предыдущие. В числе первых двух стоят проблемы скорости обработки и допустимого объема обрабатываемого материала. В числе двух других следует выделить точность и достоверность получаемых результатов, которые зависят не только от соответствующих параметров входной информации, но и от методов ее обработки.

Среди остальных проблем особо следует отметить оптимальное представление результатов эксперимента, обеспечение воспроизводимости исследований, обеспечение оперативности управления экспериментом и, наконец, поиск НИИ.

§ I. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КИБЕРНЕТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

I.1. Анализ литературы и методологических проблем получения НИИ позволяет выдвинуть следующие принципы применения методов и средств кибернетики в научных исследованиях.

I. Эксперименты должны обслуживаться научно-исследовательскими системами (НИС), построенными из стандартных и надежных блоков /1, 3, 27, 10/.

II. Обслуживание НИС должно основываться на широком использовании управляюще-вычислительной техники /1, 2, 3, 6, 11, 12/, /35 + 38/.

III. Максимальная производительность НИС будет при их кибернетической организации (т.е. при наделении их свойствами самоконтроля, адаптации, самообучения) /8, 9, 13, 14/.

IV. Проведению научных исследований должна сопутствовать оптимизация /8, 11, 12, 14, 34/.

V. НИСы должны ориентироваться на комплексные исследования.

1.2. Научное исследование в ряде случаев можно описать следующим образом.

На первой стадии выделяется некоторый объект A подлежащий исследованию, определяются его "выходы", т.е. совокупность сигналов от объекта, которым устанавливается наблюдение. Если наблюдение по каким-либо соображениям невозможно непосредственно (с помощью органов чувств), то исследователем строится специальная система наблюдения за объектом и, возможно, за некоторыми параметрами среды, влияющей на объект. Эта система является своеобразным усилителем органов чувств.

Однако, подобные системы часто оказываются недостаточно эффективными, в связи с тем, что позволяют исследовать объект лишь в процессе естественной эволюции под воздействием зачастую неконтролируемой среды. Поэтому темпы исследований здесь определяются поведением среды.

Для увеличения темпов и общей эффективности исследований отыскиваются, по мере возможностей, "выходы" A , т.е. совокупность воздействий, позволяющих вызывать наблюдаемые изменения в A . Если возможности исследователя не позволяют непосредственно реализовать эти воздействия, то строится специальная система управляемых воздействий, с помощью которой появляется возможность проведения эксперимента, т.е. наблюдения с управляемыми воздействиями на объект.

В общем случае под системой эксперимента и р о в а н и я будем понимать систему, служащую для получения информации от объекта (находится в системе) за счет организации взаимодействия с ним.

Основные функции, выполняемые системой:

- а) восприятие реакций объекта, содержащих желаемую информацию о нем.
- б) Реализация воздействий на объект, дающих желаемую информацию в п.а).
- в) Обработка текущей измерительной информации (может участвовать и априорная) типа сортировки, нормализации, сглаживания, подсчета основных характеристик и т.п.
- г) Планирование эксперимента. Сводится к определению последующего, желательно оптимального, состояния системы. Обязательно требует вычислений и логических оценок, часто .

основе текущей информации. Если планирование ведется на основе обработки результатов измерений, то такую систему назовем системой с замкнутым циклом.

Следует отметить, что функции "а" и "с" выражают свойство двустороннего приспособления экспериментирующей системы[†]) к объекту исследований. Требование наличия такого свойства в большинстве случаев приводит к необходимости организации значительных вычислений в процессе приспособления.

Системы экспериментирования, в отличие от систем наблюдения (последние служат для получения информации об объекте за счет одностороннего взаимодействия, при отсутствии управляемых воздействий на объект), существенно увеличивают эффективность исследований, в частности позволяют резко увеличить темпы получения информации и, кроме того, дают возможность реализовывать условия, невозможные с точки зрения эволюции, но позволяющие получать ценную информацию об объекте исследования.

Развиваемый в последнее время системный подход к сложным задачам /21 + 29/ завоевывает все большее признание в разных областях науки и техники. Наибольшее распространение этот подход получил в военном деле, космической технике, экономике и некоторых областях промышленности. Подобный подход окажется эффективным и при решении многих задач естествознания.

1.3. К этому следует добавить особую эффективность системного подхода к комплексным исследованиям. Вопросы постановки комплексных исследований обсуждаются в I гл. § 3. Там выясняется, что комплексное экспериментирование, осуществляемое системой, существенно экономит время за счет возможности применения математического аппарата при планировании, а также за счет уменьшения времен достижения необходимых исходных состояний объекта и аппаратуры и, наконец, время выяснения влияния факторов на объект.

[†]) Под экспериментирующей системой будем понимать дополнение объекта исследований до системы экспериментирования.

Другая положительная сторона комплексных исследований, осуществляемых системой, заключается в том, что экономится аппаратура необходимая для исследований.

Действительно, пусть исследуется несколько параметров объекта A каждый с помощью своей аппаратуры (рис. I.1а).

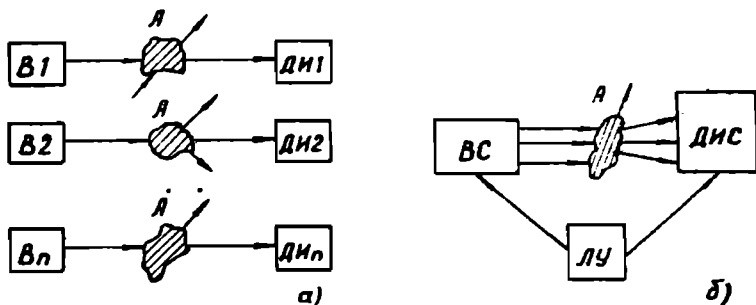


Рис. I.1

Как правило всегда находятся одинаковые элементы в такой аппаратуре. Представим, что в результате учета этого положения построена система, в которой, по возможности, совмещены одинаковые элементы и образованы, таким образом, неделимые блок воздействий BC и блок измерений $ДИС$. Для настройки этих блоков на реализацию определенных воздействий и определенных измерительных цепей, служит логическое устройство $ЛУ$.

Эффективность подобной системы будет зависеть от соотношения экономии в совмещении элементов и дополнительных затрат, связанных, например, с $ЛУ$. При этом следует также учитывать и то обстоятельство, что наличие $ЛУ$ позволяет придать системе чрезвычайно важное свойство — программную управляемость.

Вообще, при оценке НИС часто пользуются интуитивными соображениями, которые кратко можно отобразить в виде некоторой функциональной зависимости:

$$Q = Q(N, \Delta, T, S, H)$$

где: Q - качество системы; N - объем информации доступной системе; Δ - обобщенная точность системы; T - время получения системой некоторого среднего объема информации; S - сложность системы; H - надежность системы.

В качестве простой зависимости можно взять:

$$Q = \alpha N + \beta \Delta + \gamma H + \delta \frac{1}{T} + \sigma \frac{1}{S}$$

Эффективность систем увеличивается при организации параллельной работы их элементов. Это достаточно ясно было показано в работе Евреинова и Косарева /27/ для вычислительных систем. В нашем случае следует иметь ввиду как распараллеливание обработки измерительной информации и управления измерительно-воздействующими блоками, так и распараллеливание отдельных этапов обработки, операций приема с измерителей, выдачи кодов на исполнители и контроля за системой.

1.4. Второй принцип кибернетизации научных исследований предполагает обслуживание НИС с помощью УВМ. Необходимость УВМ в НИС вытекает из высоких требований относительно скорости коммутации приборов, контроля за состоянием системы, а также расчета режимов воздействий и обработки информации во время эксперимента. Чем более сложна НИС в управлении, тем больше обоснованность в использовании УВМ. Наличие УВМ в НИС позволяет придать НИС замечательное свойство: легкую и быструю настраиваемость на решение любой задачи из заданного класса. Подобным свойством не могли обладать системы без УВМ из-за жесткости структурных связей.

1.5. Четвертый принцип кибернетизации требует оптимизацию научных исследований. Она необходима - как справедливо замечает Л.Нарам /34/ - вследствие того, что выполнение различных исследовательских задач может происходить при разных затратах времени, средств, труда на построение систем, организацию их работы и пр., а сами системы могут давать разную достоверность результатов.

В задаче оптимизации подобного рода можно выделить несколько главных моментов /34/.

1.6. Оптимизация исследовательского оборудования.

Для оценки оптимальности систем вида рис. 1.2. в /34/ предложено вычислить к.п.д. системы:

$$\eta = \frac{\text{информация, обрабатываемая системой ИС}}{\text{теоретич. макс. информация, генерир. А}}$$

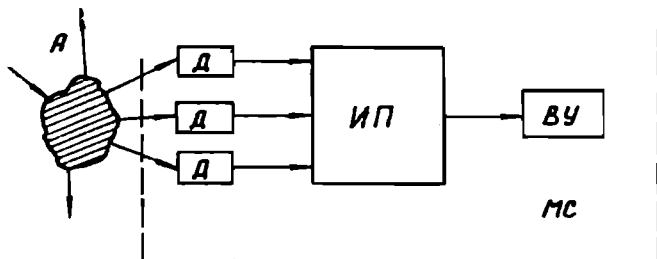


Рис. 1.2.

ИС- система состоящая из:

- Д - датчики информации,
- ИП - измерительные приборы,
- ВУ - вычислительное ус-во.

Однако, как справедливо отмечает Нарам, η отражает лишь верную пропорцию спецификации функциональных элементов и еще не означает оптимизации задачи измерения. К этому следует добавить, что определение η является в общем случае методически сложной задачей. Кроме того, т.к. полная схема эксперимента имеет вид рис. 1.1.б., то определение должно учитывать соответствующие структурные различия.

Пусть N - количество состояний, в которых способен находиться A , K_n - общее количество состояний идентифицируемых для восприимчивой части ИС, K_b - то же для воздействующей части ИС, n_n - число состояний восприимчивой части идентифицирующих состояния объекта A , n_b - число состояний идентифицируемых объектом A . Очевидно:

$$K_n > n_n, K_b > n_b, n_n \leq N, n_b \leq N.$$

Теперь КПД воздействующей части ИС можно оценить как:

$$\eta_b = \frac{n_b \cdot n_n}{K_b \cdot N},$$

воспринимающей:

$$\eta_n = \frac{p_n \cdot p_n}{k_n \cdot N}$$

а всей системы, соответственно:

$$\eta = \frac{1}{N^2 k_n k_b} p_n^2 p_b^2$$

k_n, k_b - имеют определенное отношение к сложности НИС, а p_n, p_b - к чувствительности.

Некоторые простые выводы относительно к.п.д. НИС:

- 1) $0 < \eta < 1$;
- 2) отношение к.п.д. двух НИС для одного объекта выражается

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \left(\frac{p_{n1} p_{b1}}{p_{n2} p_{b2}} \right)^2 \cdot \frac{k_{n2} k_{b2}}{k_{n1} k_{b1}},$$

т.е. лучше оказывается система меньшей сложности, но большей чувствительности.

- 3) Отношение к.п.д. одной системы для разных объектов:

$$\frac{\eta'}{\eta''} = \left(\frac{p_{n1} p_{b1} N_2}{p_{n2} p_{b2} N_1} \right)^2$$

1.7 Оптимизация этапов эксперимента заключается в наилучшей разработке полного цикла эксперимента, обычно с одной точки зрения (объем информации, время исследований, достоверность, затрачиваемый труд и т.п.).

ЭТАП А. Определение постановки задачи эксперимента.

- а) выбор параметров, предполагаемых реакций объекта, подлежащих исследованиям;
- б) выбор типов воздействий, вызывающих предполагаемые реакции;
- в) определение, например, распределений $\chi_1(x_1), \dots, \chi_l(x_l)$ характеристик x_1, x_2, \dots, x_l , которые нужно определить путем измерений, либо определение скрытых параметров или функциональных зависимостей и т.п.

Оптимизация на этом этапе крайне затруднительна из-за возможного многообразия точек зрения и трудностей количественного анализа.

ЭТАП Б. Разработка плана эксперимента.

- а) самый целесообразный метод измерения;
- б) диапазоны и точность измеряемых величин;
- в) режимы воздействий;
- г) диапазоны изменения и точность действий;

- д) параметры, подлежащие контролю;
- е) методы контроля;
- ж) основные операции эксперимента.

Этой задачей частично занимались ранее (например /30, 31/), менее всего разработаны в) + ж). Этап определяется *так* целью исследования, свойствами объекта, соображениями достоверности и скорости получения результатов.

ЭТАП В. Определение необходимого оборудования и порядка реализации операций.

- а) Определение количества оборудования и функционально-параметрических требований к нему;
- б) развернутый порядок реализации отдельных операций эксперимента, либо условий их реализаций;
- в) определение структурной схемы оборудования, степени сложности управления;
- г) необходимость и метод использования УВМ;
- д) устройство связи оператора с системой.

На оптимизацию влияют: точность, стабильность, быстрдействие, отношение ремонт/работа, стоимость оборудования и его эффективность. Весьма важен вопрос об оптимальном сочетании последовательных и параллельных операций необходимым для быстрого и наиболее компактного метода последующего получения информации об объекте.

Здесь же частично можно оценить ожидаемое время съема измерительной информации. Однако часто возникает и обратная задача: при заданном времени оценить расходы на измерение. Обе задачи можно решать оптимально /34/.

ЭТАП Г. Проведение опытов.

Г1. Проведение предварительных опытов с целью определения соответствия реальной аппаратуры требованиям А, Б, В, если оно имеется, то перейти к Г2, иначе повторить с А.

Г2. Проведение основных научных исследований объекта.

При статическом планировании оптимизация здесь отсутствует. Наиболее целесообразен метод динамического планирования /30, 34/, который позволяет на основе быстрого анализа предыдущих опытов вырабатывать хороший план последующих операций. Однако это возможно лишь при непосредственной связи этапа Г с этапом обработки данных, что, в свою очередь, требует УВМ, работающую в режиме реального времени.

Использование УВМ можно проиллюстрировать следующей схемой:

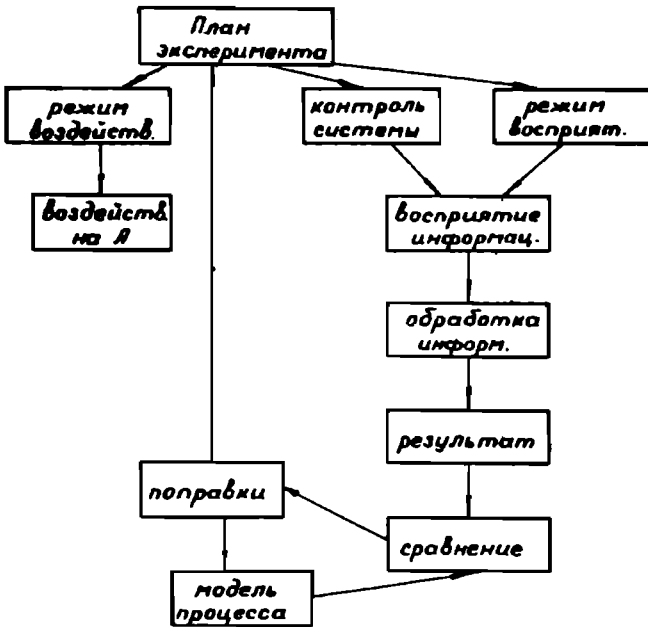


Рис. 1.3.

Об одном из частных случаев подобного примера сообщалось в /12, 57/, где с целью автоматизации получения спектров поглощения и свечения использовалась машина "Днепр".

ЭТАП Д. Обработка данных.

а) Первичная обработка (коррекция на нелинейности системы, дрейф, селективность воспринимающей части и т.п., отсеив аномальных результатов; сглаживание, интерполяция, экстраполяция, статистика и т.д.).

б) Вторичная обработка (определение параметров, связанных с моделью объекта; определение скрытых функциональных зависимостей; разложение сложных процессов на компоненты и пр.).

Оптимизация на этом этапе может оказать сильное влияние на значительную часть опыта, в особенности на:

- скорость получения полезной информации;
- достоверность данных;

- выбор оптимальных типов и режимов воздействий на объект;
- контроль системы и достаточно оптимальное представление данных экспериментатору.

Один из наиболее ответственных процессов на этом этапе - это передача данных на обработку в УВМ, а также связь "экспериментатор - система", обычно крайне чувствительная к величине и темпу потока измерительной и управляющей информации. Оптимизация здесь в первую очередь означает выбор "золотой середины" между объемом данных, подготавливаемых вручную и машинным способом (например, ПД, НМД и т.п.) - в первом случае и между различными средствами связи (пульта, "световое перо", телетайпы и др.) - во втором.

ЭТАП Е. Обслуживание группы экспериментов.

Характер задачи оптимизации на этом этапе можно пояснить следующим примером.

Пусть имеется N Научно-исследовательских систем, для обслуживания каждой необходимо использование УВМ. Очевидно, что снабжение каждой НИС своей УВМ в общем случае не будет оптимальным решением проблемы, т.к. большинство УВМ не загружаются полностью, кроме того, при выходе из строя одной из УВМ, исследования в соответствующей группе нарушаются.

Противоположное решение относительно УВМ означает объединение их в единый центр (рис. 1.4.) с целью полной централизации обслуживания экспериментов.

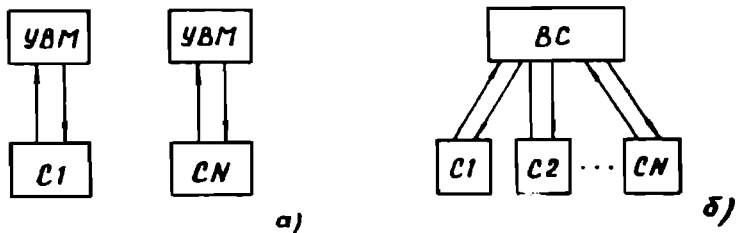


Рис. 1.4.

При этом возникает то выгодное обстоятельство, что общее количество УВМ в центре определяется не количеством групп (которое может меняться), а необходимой вычислительно-управляющей мощностью центра относительно научно-иссле-

довательских систем C_1, C_2, \dots, C_n и некоторой резервной мощности, определяемой требуемой надежностью системы и возможными вариациями в производительных мощностях систем. При организации центра наиболее перспективной является идея вычислительной системы (ВС), обслуживающей НИСы /27/. Детально проблемы построения таких систем рассмотрены в монографиях /27, 28/.

Однако внедрение ВС в научные исследования связано с целым рядом нетривиальных проблем, важнейшие из которых: организация оптимальной системы программирования в реальном времени, построение надежной линии связи ВС с системами и др. По всей вероятности оптимальное решение проблемы централизации и децентрализации управляюще-вычислительной техники должно исходить из подробного анализа конкретных условий и возможностей.

§ 2. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (НИКС).

2.1. Современные исследования ярко показывают необходимость смены старого принципа исследования "изменяй факторы по одному" на более продуктивный принцип системного подхода к объекту, согласно которому реальный объект рассматривается в качестве сложной системы, в которой "применение одного фактора служит непосредственной причиной изменения других, иногда очень многих факторов" /18/. Иными словами современная наука рассматривает комплексный системный подход в качестве наиболее продуктивного.

Этот подход предполагает прежде всего пересмотр большинства сложившихся взглядов исследователей на построение научно-исследовательской аппаратуры, организацию ее работы и обработку измерительной информации.

Известно, что понятие системы играет одну из главных ролей в кибернетике. Под кибернетической системой обычно понимаются системы, характеризующиеся управляемостью их элементов и некоторым набором связей с внешней средой /20/.

В таких системах всегда должна иметься часть, осуществляющая управление. Простейший случай такой системы представлен на рис. 2.1. /20/:

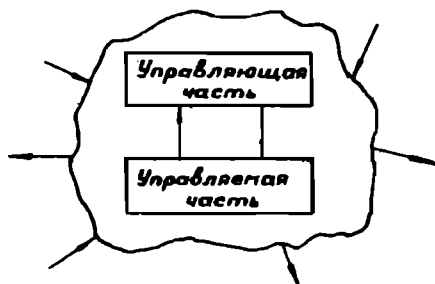


Рис. 2.1.

Такие системы обычно входят в различные иерархические структуры, т.е. кибернетические системы не являются изолированными.

Термин "кибернетическая система", как справедливо отмечает Лернер /20/, является не столько характеристикой определенного класса систем, сколько подхода к их рассмотрению, основанного на изучении свойств и особенностей системы как управляемой.

Кибернетические системы как правило характеризуются целым набором отличительных свойств, среди которых, кроме названных, большое значение имеют /17 - 20/ целенаправленность функционирования, организованность, способность к селективной фиксации и сохранению во времени следов внешних воздействий и последующему воспроизведению аккумулированной информации. Последнее свойство является основой для обучения, приспособления и самоорганизации кибернетических систем. Современные НИС обладают большинством из перечисленных свойств /1 - 10/

2.2. Повидимому, можно сформулировать аналогичный /19/ тезис:

Любую НИС можно адекватно представить в виде функциональной схемы, составленной из блоков.

Под блоком (агрегатом /23/, компонентом, устройством и т.п.) будем понимать следующее: S, Z, X, Y, U, V (состояния, параметры, основные входные и выходные сигналы, управляющие и контрольные сигналы (рис. 2.2.)).

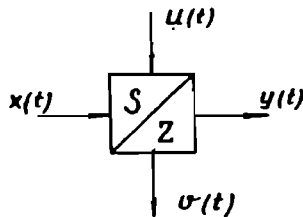


Рис. 2.2.

Рассмотрим декартовы произведения:

$$F = S \times Z \times U,$$

$$G = S \times Z \times X,$$

а также однозначные отображения $F: S \rightarrow Z$, $G: Z \rightarrow S$, сопоставляющие тройкам из F и G в данный момент t элементы из S и Z соответственно в момент $t+1$. Рассмотрим также однозначные отображения $Z \rightarrow Y$ и $S \rightarrow V$, сопоставляющие элементам из Z и S в момент t элементы из Y и V в тот же момент t

Будем говорить, что $S, Z, X, U, Y, V, f, g, \varphi, \psi$,

а также некоторые $s \in S$ и $z \in Z$ называемые начальным состоянием и начальными параметрами, задают блок.

Пару (u, x) будем называть входным сигналом или входом, а пару (y, v) - выходным сигналом или выходом.

Рассмотрим вопрос о построении систем из блоков.

I Класс А-систем /23/ (расчленение которых вновь дает блоки).

Функционирование А-систем связано с переработкой информации - внешней, если она поступает от внешних объектов, и внутренней, если она вырабатывается блоками системы.

Обмен информации А-системы осуществляется через блоки, называемые полюсами (входные и выходные относительно потока информации).

Полюса в ряде случаев можно разделить на управляющие, если они связаны с приемом управляющей информации, контрольные и основные - в остальных случаях. Другие блоки, не являющиеся полюсами, назовем внутренними.

Рассмотрим вопрос о взаимодействии блоков.

Пусть заданы два блока А и В

Рассмотрим декартово произведение входов и выходов

$$(V_A \cup Y_A) \times (X_B \cup U_B) = \Pi.$$

Будем говорить, что А соединен с В, если задано непустое бинарное отношение R (отношение соединений), являющееся собственным подмножеством Π

Блоки А и В κ-соединены, если задано отношение

$$R(v_A, x_B) \subseteq V_A \times X_B$$

Такое соединение обычно реализуется в системах контроля (рис. 2.3.а).

Блоки c -соединены, если задано отношение

$$R(u_A, u_B) \subseteq u_A \times u_B;$$

c -соединение используется при введении синхронизирующих связей (рис. 2.3.б).

Блоки y -соединены, если задано отношение

$$R(y_A, u_B) \subseteq y_A \times u_B$$

Примером подобных соединений являются системы управления (рис. 2.3.в).

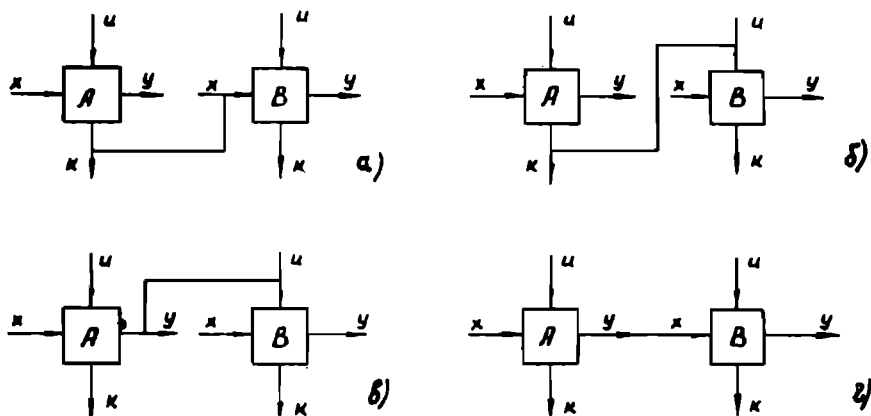


Рис. 2.3.

Блоки u -соединены (рис. 2.3.г), если задано отношение

$$R(y_A, x_B) \subseteq y_A \times x_B$$

Если к одному из входов B подсоединен только один A , то говорят, что блок B строго соединен с A (рис. 2.3.г)

Интерес представляют A -системы, в которых для любых блоков B и C существует цепочка связанных блоков D_1, \dots, D_n , соединяющих B и C , такие системы называют комплексами. Две системы называются разъединенными, если ни одна пара блоков составленная из обеих систем не соединена.

A -система, состоящая из n -комплексов, каждый (кроме I -го) y -соединен только с одним предыдущим комплексом, представляет собой n -фазную систему (рис. 2.4.а).

А- система, у которой все n блоков являются строгими полюсами, называется n - канальной системой.

А- система является централизованной, если все входы (выходы) ее комплексов однотипно соединены с выходом (входом) некоторого комплекса.

Этот комплекс называется центральным, а комплексы $1, 2, \dots, m$ - подчиненными. Примером таких систем являются многие современные системы сбора информации (рис. 2.4.б.).

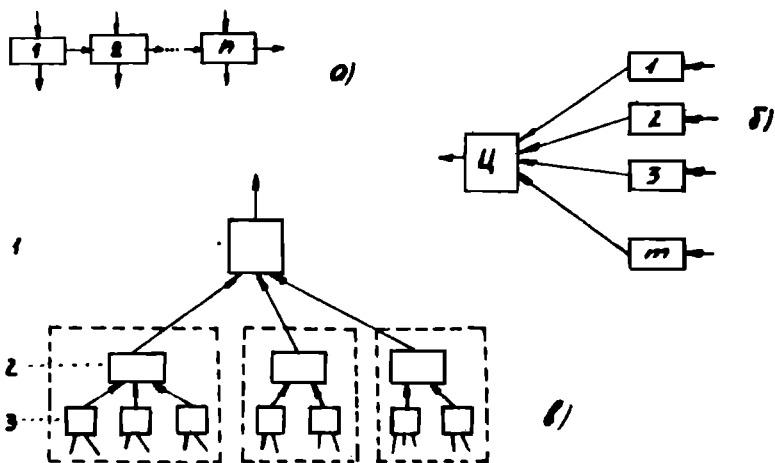
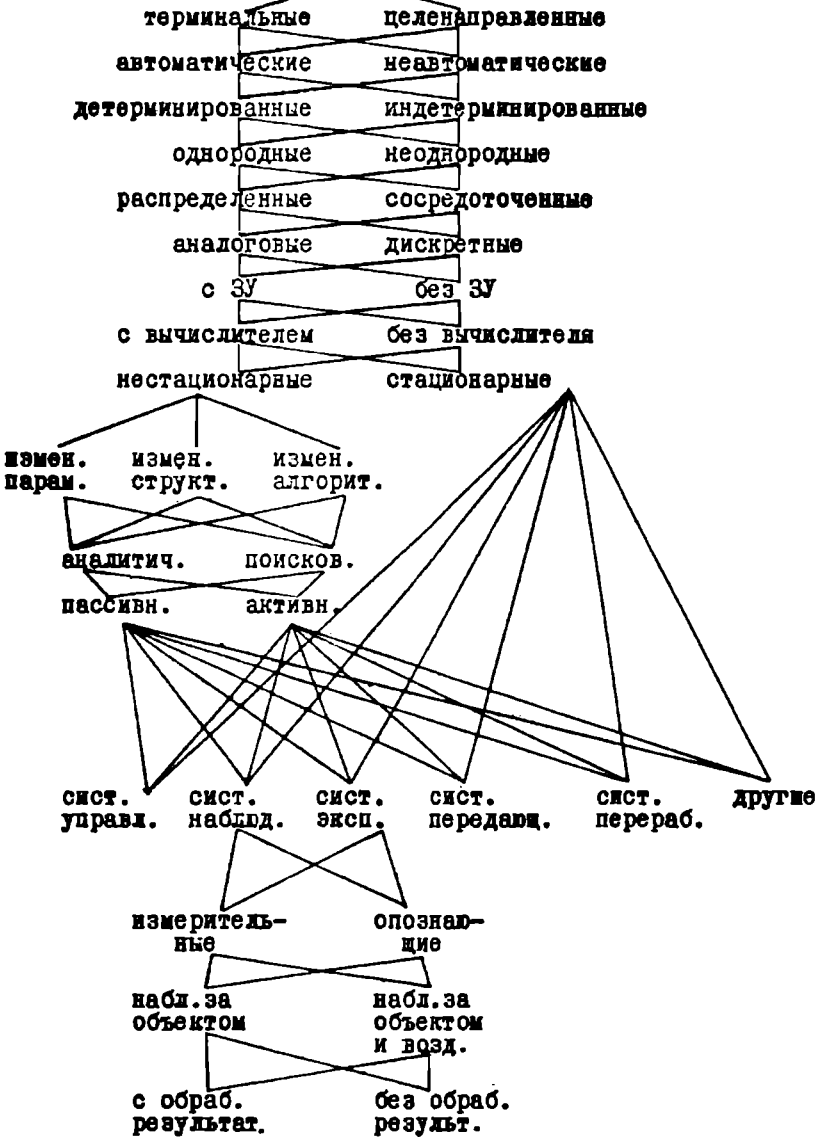


Рис. 2.4.

Каждый из подчиненных комплексов, в свою очередь, может быть централизованной системой, подчиненные блоки которой тоже могут составлять следующее поколение централизованных систем и т.д. Рассмотренный случай характеризует широко известный класс иерархических систем (рис. 2.4.в.) (на рисунке цифры 1, 2, 3, ... - указывают номера уровней иерархии).

с и с т е м м



2.3. Научно-исследовательские системы являются в большинстве своем частным случаем рассмотренных выше систем. Чтобы определить место и некоторые особенности НИС, важно провести классификацию систем на основе различных признаков /15/. Подобные попытки не раз проводились, однако лишь в основном для систем управления (например, /29/).

I. Поведение системы можно рассматривать лишь как некоторое отображение одного множества (входы, параметры, состояния) в другое. Такие системы являются терминальными. В других случаях продуктивнее рассматривать поведение в свете некоторых инвариантностей, которые отражают цель системы (называемой целенаправленной).

II. Автоматические и неавтоматические системы различаются по степени непосредственного участия человека в процессе функционирования системы.

III. Детерминированные системы от индетерминированных отличает присутствие каких-либо внешних, по отношению к системе, воздействий.

IV. К числу однородных отнесем системы, построенные из некоторого набора стандартных элементов, в противном случае системы отнесем к неоднородным.

V. Распределенными, в отличие от сосредоточенных, назовем системы, состоящие из отдельных блоков, находящихся на значительном пространственном удалении друг от друга.

VI. По характеру работы элементов системы можно разделить на аналоговые и дискретные.

VII. Системы могут быть с запоминающим устройством или без него. В первом случае они могут иметь одностороннее или двустороннее запоминающее устройство.

VIII. Весьма важным признаком, различающим современные системы, является наличие универсального или специализированного вычислителя.

IX. Стабильность или изменчивость параметров, структуры и алгоритмов функционирования систем разделяет их на стационарные и нестационарные.

В последних, в свою очередь можно выделить три интересных признака /29/:

а) если изменения подготавливаются расчетным, аналитическим путем, то систему назовем аналитической, если одним из способов поиска - то поисковой.

б) Если изменения происходят на основе априорной информации, то имеем дело с пассивными системами, если на основе текущей - то с активными.

в) Если в системе не производится самоанализ успешности изменений, то система называется разомкнутой, в противном случае - замкнутой.

Х. По цели функционирования системы подразделяются на системы наблюдения, управления, экспериментирования, передачи информации и переработки информации /14/.

Интересующие нас НИС можно в свою очередь разделить независимо друг от друга на системы:

- измерительные и опознающие;
- наблюдающие за объектом и за воздействиями на него, либо только за объектом;
- с обработкой результатов наблюдения и без нее и т.п.

2.4. Большое значение имеет рассмотрение базисных систем соответственно основным типам информационных процессов /3, 7, 8, 10, 23/.

- Д - датчики (воспринимающие блоки),
- И - измерители,
- В - воздействующие блоки, исполнительные органы,
- К - контролирующие блоки, датчики состояний блока,
- Р - регистрирующе-накапливающие блоки,
- ВУ - блок обработки информации и управления,
- П - ус-ва передачи информации.

Используя блоки базисной системы, можно описать довольно большой класс систем, в том числе и научно-исследовательские системы.

На рис. 2.5. приведены некоторые различной степени детализированные системы НИС:

а) система наблюдения (контроля, сбора информации и т.п.), задача которой заключается в сборе информации от объекта наблюдения А; такие системы обычно используются либо на первой стадии исследований либо, если не имеется воз-

возможности проведения специально подобранных контролируемых воздействий на объект (например, астрономические наблюдения).

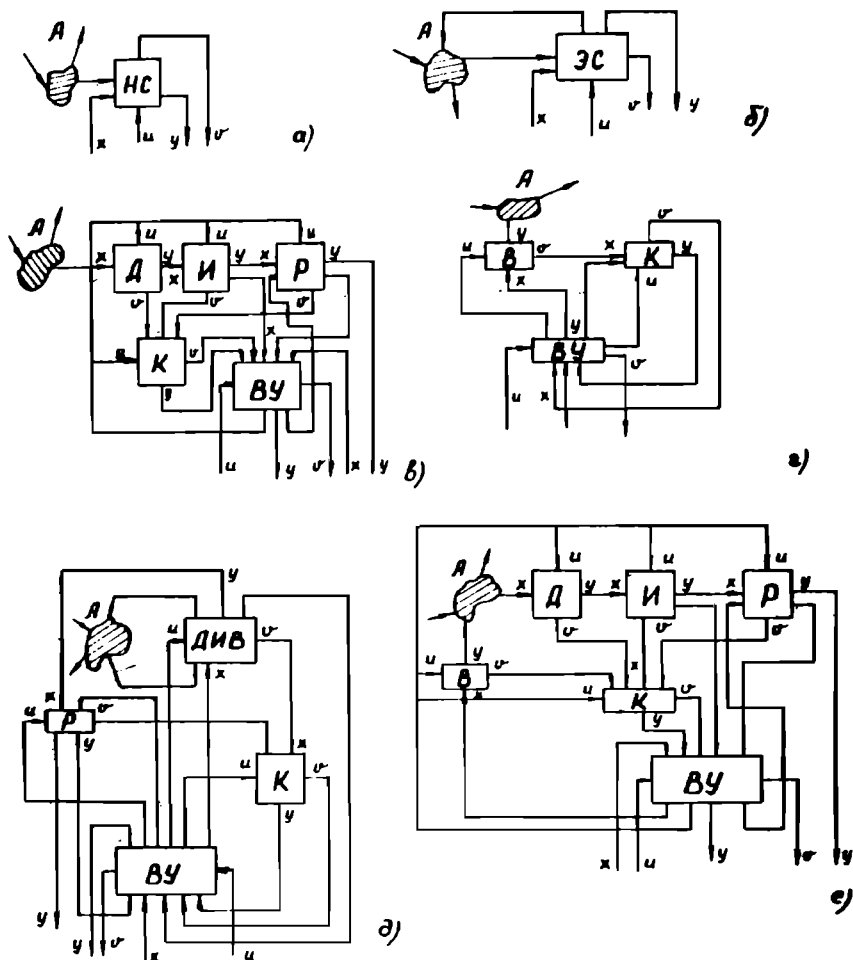


Рис. 2.5.

- б) Система экспериментирования; позволяет осуществлять управляемые воздействия на объект, что существенно ускоряет темпы и качество исследований.
- в) Изображена одна из детализированных систем наблюдения, в которой имеется возможность наблюдения как за объектом, так и за некоторыми воздействиями среды на него.
- г) Научно-исследовательские системы иногда разрабатываются как системы управляемых сложных воздействий на объект; последний, после завершения некоторой программы помещается либо в системы наблюдения, либо экспериментирования.
- д) е) Системы экспериментирования, в первой ДИВ узел взаимодействия с объектом.

Одним из наиболее известных классов систем в настоящее время является класс измерительно-информационных систем /1, 3, 6, 8, 10, 14/. Эти системы, несомненно, могут быть широко использованы в научных исследованиях, однако следует отметить, что основной упор в них делается на организацию сбора информации, что подчеркивается большинством авторов, в то время как в современном научном исследовании весьма сильный акцент делается также и на реализацию специальных режимов контрольных воздействий на объект, т.е. наибольший интерес вызывает системы экспериментирования.

2.5. Использование машин в НИС.

Как уже неоднократно отмечалось /1, 3, 6, 10, 11/, использование ЭВМ в НИС является перспективным.

ЭВМ в контуре НИС могут находиться в самых различных звеньях.

При необходимости реализации сложных режимов воздействий на исследуемый объект, или поддержания одного определенного режима используется схема 1). Подобное применение особенно часто в ядерной физике /36, 50, 52/.

Наличие необходимости экспресс-контроля и управления большой системой измерителей вызывает к жизни схему 2).

Для уплотнения больших потоков измерительной информации за счет ее частичной или полной обработки и подготовки к виду удобному для регистрации и обзора используют схему 3) /34 + 37, 50 + 53, 56 + 58/.

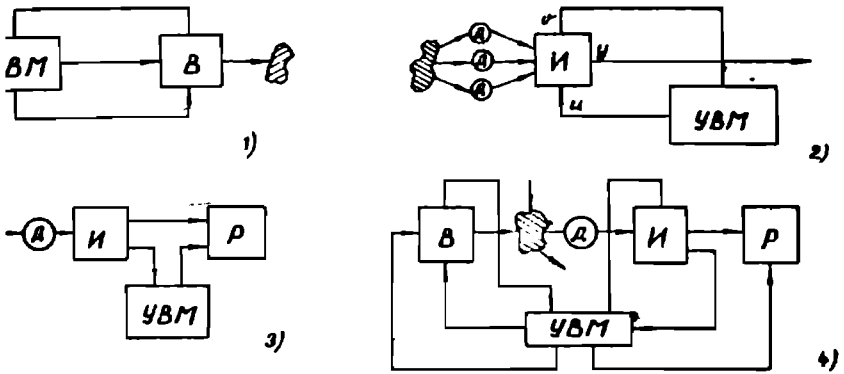


Рис. 26.

Наконец, существует сведения об использовании машин в замкнутом контуре схемы 4) /36, 50, 57/; если мощности УВМ не хватает для обслуживания всех агрегатов, то приходится идти на полную или частичную децентрализацию УВМ, например, по схеме Рис. 2.7.

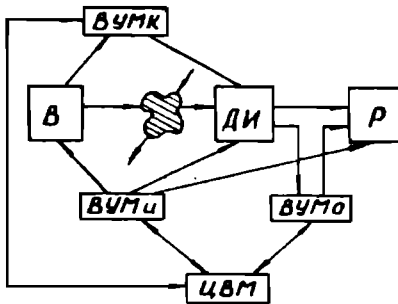


Рис. 2.7.

Научно-исследовательские кибернетические системы НИКС при правильной их организации приобретают большой круг новых, по сравнению с обычными измерительными системами, свойств. Перечислим наиболее очевидные из них.

Возможность использования сложных методик эксперимента. Это свойство в особенности начинает проявляться при наличии хорошего формального языка научных исследований.

Самоконтроль, самоподстройка и самокалибровка блоков системы /13/.

Появляется возможность интерполяции и экстраполяции измерительной информации, а также динамического планирования в ходе эксперимента /30/.

Измерительная информация представима практически в любой форме (графики, параметры функций, таблицы и др.).

Имеется возможность существенного повышения точности измерительной информации за счет динамического планирования и статистических методов обработки.

Повышается достоверность и объективность информации (за счет обработки большего объема измерительной информации) Этому способствует и то обстоятельство, что НИКС, в отличие от человека, не подвержена влиянию психологических факторов (усталость, предубеждение, плохое настроение и т.п.).

Возможно уплотнение измерительной информации в ходе эксперимента.

Увеличивается гибкость НИС за счет того, что, вместо жестких связей между блоками и жестких алгоритмов функционирования, появляются легко изменяемые программой связи и алгоритмы; НИС рождается, таким образом, путем применения настраиваемой программы к некоторому набору стандартных блоков.

Экономится рабочая сила, материалы, время и энергия. Правда, появляется потребность в специалистах нового типа (системотехники, математики и др.), а также в пока еще нестандартной технике.

Повышается общий квалификационный уровень специалистов, связанных с использованием НИКС, в связи с чем значительно улучшается качество исследований.

Наконец, возникает реальная возможность разработки и использования качественно новых принципов исследований, связанных с идеями самообучающихся и самонастраивающихся программ, а также методов эвристического программирования.

Отсюда открываются те широкие перспективы, которые доступны самоорганизующимся и самообучающимся системам.

§ 3. КОМПЛЕКСНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.

3.1. Как уже отмечалось ранее, комплексный подход к объекту исследований, рассматриваемый современной наукой в качестве наиболее продуктивного, влечет за собой пересмотр

большинства сложившихся взглядов на восприятие, систематизацию и обработку измерительной информации, а также на технику исследований, планирование и др. важные вопросы.

Разберем некоторые специфические черты комплексных исследований.

Прежде всего заметим, что основная специфика объясняется многомерным характером комплексного эксперимента.

Отсюда вытекают следующие особенности:

- 1) многомерность научно-исследовательских систем;
- 2) многомерность восприятия информации и реакций на объект;
- 3) многомерность обработки информации;
- 4) особые требования к представлению и накоплению многомерной информации;
- 5) особые методы планирования эксперимента.

3.2. Рассмотрим несколько подробнее эти вопросы. Многомерность НИС может быть реализована несколькими путями. Один из них заключается в том, что строится m -фазная НИС, обладающая свойством последовательно настраиваться на прием каждого типа измерительной информации и выдачу различных видов воздействий. После реализации ряда последовательных опытов эти системы дают комплексную информацию об объекте. Основным очевидным недостатком таких систем — большая длительность цикла эксперимента.

Другой путь реализации многомерных НИС заключается в создании n -канальной системы, каждый из каналов которой позволяет получить часть комплексной измерительной информации. В таких системах объем оборудования растет приблизительно линейно с ростом числа каналов. Основные недостатки системы /36/: громоздкость, неэкономичность, малая стабильность и несинхронность работы. Однако, несмотря на это, подобные системы получили большое распространение в ядерной физике. К их достоинствам следует отнести высокое быстродействие.

Простой анализ n -канальных систем подсказывает идею объединения и совмещения отдельных блоков, построения систем в различных видах иерархии. Создание таких систем стало возможным благодаря наличию блоков, построенных по новым

принципам: быстродействующие аналого-цифровые преобразователи, кодовые регуляторы, цифровые накопители, вычислители и т.п. Здесь следует отметить основную особенность совмещения блоков.

Пусть T - время цикла опыта, v_i - быстродействие i измерителя, $i = \overline{1, K}$. Тогда объем данных получаемых за цикл системой, $N' = T \sum v_i$, $i = \overline{1, K}$. При совмещении измерителей в один блок получим $N'' = vT$. Требование равномоности системы: $N' = N''$, т.е. $T \sum v_i = vT$; умножив и разделив на K левую часть, получим $v = k \cdot \bar{v}$. Иными словами быстродействие блока должно быть в K раз больше среднего быстродействия i - блоков. Кроме того, полученный блок необходимо подстраивать, как к блокам подсоединенным ко входу (если их несколько), так и к выходным блокам до K раз и более за период T . Это требует наличия соответствующей настраиваемой части таких совмещенных блоков.

3.3. Представление и восприятие информации комплексных исследований происходит в многомерном пространстве воздействий и ответов объекта. Например, при одном изменяющемся воздействии и m - ответах получается кривая в $(m+1)$ -пространстве. При одном ответе и n - воздействиях измерительная информация предстает в виде $(n+1)$ -мерной поверхности.

Задача правильного представления информации часто является решающей при повышении темпа исследований. Известно какую роль сыграл переход от поточечной ручной регистрации к методам автоматического регистрирования кривых с помощью самописцев. Разработка аналогичных методов и приборов для целей регистрации комплексной информации также является актуальной. При этом следует учитывать некоторые особенности характерные для любых многомерных систем представления, в частности ядерных /36/:

- 1) требуется повышенное быстродействие регистраторов (при их агрегатировании).
- 2) Необходимо оперативное выборочное представление информации в различных системах координат (в физике таковыми часто являются $1/T, \lg J, \sqrt{U}, \ln j, \dots$ и т.п., где: T - температура, J - интенсивность люминесценции, U - напряжение, j - плотность тока).
- 3) В связи с этим требуется большая доступность информации ко вводу в ЦВМ.

- 4) Визуальная информация должна быть представлена в виде, позволяющем в какой-то степени отразить ее многомерность. Наиболее часто требуется отобразить трехмерные зависимости (например, при изображении поведения спектров свечения от температур или фототока от интенсивности подсветки и т.п.). Для решения подобной задачи применяется стереоскопическая методика /45, 49/, растровая техника /36/ (с модуляцией интенсивности луча в качестве третьей координаты, вращающийся перед ЭЛТ экран /48/ и т.п. Весьма перспективной является изометрическая проекция /47/, особенно в связи с возможностью применения "светового пера" /44, 50/.
- 5) Другой особенностью многомерных систем представления информации является возможность проведения сечений информационных образов по одной координате или их группе, с последующим представлением сечений в определенных положениях (например, под углом к выбранным координаторным осям /46/).

3.4. Кибернетизация научного эксперимента означает как новый подход к построению научно-исследовательских систем, так и новый подход к планированию работы этих систем. В настоящее время считается, что применение кибернетических методов планирования повысит эффективность планирования, по крайней мере, в $2 + 10$ раз /25/.

Большой интерес представляют два специальных случая планирования эксперимента. В одном из них ставится задача определения экстремальных значений некоторых функций. При решении этой задачи используют ряд более или менее разработанных методик /25, 30-33/.

Другой случай касается изометрического съема информации, прием давно известный в картографии для трехмерного пространства. Один из алгоритмов подобного съема информации приведен во 2-й главе.

Так как измерения всегда идут с ошибкой, то, как в первом, так и во втором случае, важным является выбор числа измерений в каждой точке. Одну из подобных ситуаций иллюстрирует следующий пример.

Пусть измеряются значения некоторой функции $J(w_1, \dots, w_m)$. Известно, что $J = \chi(w_1, \dots, w_m) \cdot K(w_1, \dots, w_m)$ где K - известная функция, характеризующая нелинейность системы.

Требуется получить равнооточные данные о χ , если измеряется с постоянной ошибкой ΔJ , а K известно точно.

Непосредственно получаем, что $\Delta \chi = \Delta J : K \neq \text{const}$.

Прибегая к усреднению n раз в точке, получим, что

$$\Delta J' = \frac{\Delta J}{\sqrt{n}}$$

Учитывая это, данные о χ будут равнооточными с ошибкой

$$\Delta \chi' = \frac{\Delta J}{\sqrt{n(w)} \cdot K(w)}$$

если количество измерений в каждой точке планировать по формуле

$$n(w_1, \dots, w_m) = \frac{\text{const}}{K^2(w_1, \dots, w_m)}$$

Выбор шага съема информации в комплексном эксперименте непосредственно связан с последующими операциями сглаживания, интерполяции и анализа. При этом необходимо учитывать многомерный характер информации. Характерные трудности возникающие в этих задачах показывает следующий простой пример

Пусть в n -мерном пространстве дано m -точек y_0, \dots, y_m . Попробуем найти интерполирующий полином l -й степени

$$P = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (1)$$

Подставляя координаты известных точек, получим систему:

$$a_0 + a_1 x_{10} + a_2 x_{20} + \dots + a_n x_{n0} = y_0$$

$$a_0 + a_1 x_{11} + a_2 x_{21} + \dots + a_n x_{n1} = y_1$$

$$a_0 + a_1 x_{1m} + a_2 x_{2m} + \dots + a_n x_{nm} = y_m$$

Решение при $m=n$ можно представить в виде скалярного произведения:

$$P_{n+1}^1 = \frac{1}{\Delta_{n+1}^1} (Y^1, S^1),$$

где:

$$\Delta_{n+1}^1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{10} & x_{11} & x_{1n} \\ x_{20} & x_{21} & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & x_{nn} \end{vmatrix},$$

$$Y^1 = \{y_0; -y_1; \dots; (-1)^n y_n\},$$

$$S^1 = \{(\bar{A}_0^1, x); \dots; (\bar{A}_n^1, x)\},$$

$$\bar{A}_j^1 = \{A_j^1, A_j^2, \dots, A_j^n\},$$

$$x = \{1, x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

$$A_j^i = \begin{vmatrix} X_{1,0} & X_{1,j-1} & X_{1,j+1} & X_{1,n} \\ \dots & & & \\ X_{l-1,0} \dots & X_{l-1,j-1} & X_{l-1,j+1} & X_{l-1,n} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ X_{i+1,0} \dots & X_{i+1,j-1} & X_{i+1,j+1} & X_{i+1,n} \\ \dots & & & \\ X_{n,0} & X_{n,j-1} & X_{n,j+1} & X_{n,n} \end{vmatrix}$$

Очевидно решение будет при $\Delta_{n,i}^1 \neq 0$, т.е., если точки узлов интерполяции не будут находиться на прямой в n -мерном пространстве. Аналогичная связь получается и для P -полиномов более высоких степеней. Например, для квадратичной интерполяции: узлы не должны находиться на кривых второго порядка и т.д.

Отсюда первая особенность n -мерной интерполяции - узлы не могут выбираться произвольно. Проверка $\Delta \neq 0$ является трудной задачей. Кроме этой, обнаруживается ряд подобных особенностей /59, 60/.

Аналогичные трудности вызывает использование и других математических методов обработки информации (сглаживание, экстраполяция, разложение процесса на составляющие и т.п.)

Указанных выше простых примеров уже вполне достаточно для того, чтобы сделать вывод о принципиальной необходимости применения быстродействующих ЦВМ, особенно если учесть, что подобные задачи приходится решать многократно, даже в пределах одного цикла комплексного эксперимента.

§ 4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СХЕМ ЭКСПЕРИМЕНТА.

4.1. При рассмотрении различных схем эксперимента мы будем исходить из конкретизации основной схемы (рис. 4.1). Для этого потребуется сначала выбрать некоторый набор (по возможности более универсальный) исследовательских приборов.

Будем считать, что имеется 2 вида воздействующих приборов:

- а) приборы жесткой структуры (блок а);
- б) приборы с регулируемыми параметрами (канал u) (блок б). Аналогично, приборы воспринимающие информацию также разделим на два типа (блоки в и г)).

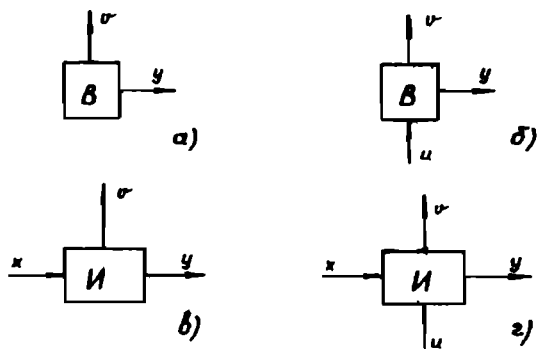
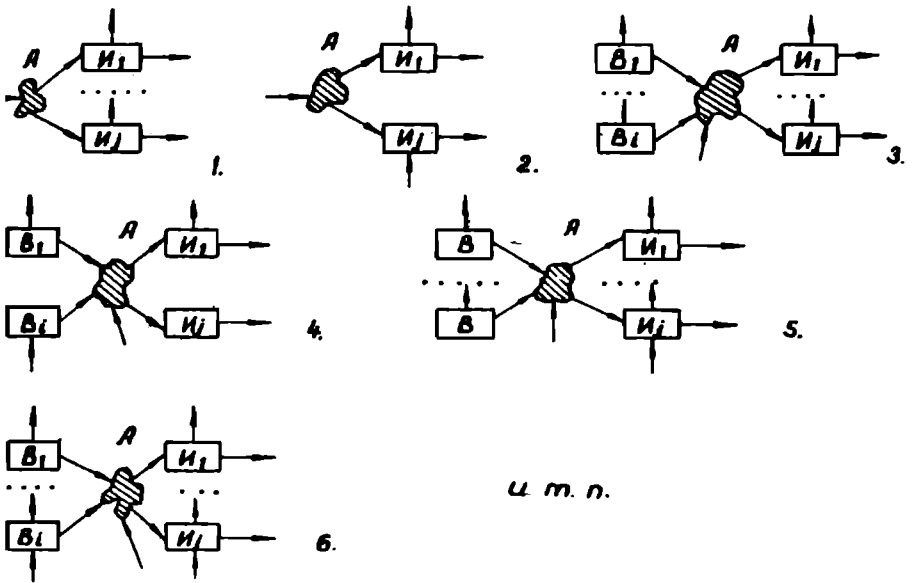


Рис. 4.1.

Такое разбиение позволяет относительно объекта, исследований A конструировать следующие схемы эксперимента.

На рис. 4.2. (1 + 6) показаны различные схемы экспериментов, в которых u_j могут изменяться от "0" до некоторых значений, зависящих от характера и степени сложности эксперимента. На этих схемах для простоты умышленно не показаны другие приборы эксперимента (регистрирующие, управляющие, обрабатывающие и т.п.).



и т. п.

Рис. 4.2.

При проектировании подобных схем основными вопросами, помимо выбора приборов, будут: управление ими, нахождение алгоритма сбора исследовательской информации, определение объема получаемой информации и т.п. (с целью решения вопроса об управляющем автомате, объеме ЗУ, быстродействии системы и др.) Рассмотрим последовательно некоторые из этих вопросов.

4.2. Два класса методов съема информации.

Большинство методов можно разделить на два основных класса. В первый входят те, которые позволяют провести последовательный съем информации во всех точках XU -пространства⁺⁾ , достижимых по условиям эксперимента. Например, V^{p+s} мер -

⁺⁾ Пространство, координатами которого являются воздействия U на объект и его реакции X назовем XU -пространством.

ном пространстве U_1, \dots, U_n, X точки съема информации образуют n - мерную сетку, ограниченную область снятия информации.

Во второй класс можно отнести методы снятия информации лишь в определенных точках XU -пространства, либо в окрестностях некоторых точек. Такая ситуация может возникнуть при постановке поисковых исследований, экстремальных экспериментов т.п., например, при изометрических исследованиях, когда, ставится задача об отыскании воздействий, приводящих к стабилизации системы относительно определенных значений X

Попытаемся оценить время, затрачиваемое на эксперимент, с точки зрения количества ситуаций, которые необходимо реализовать при разных способах съема информации, и соответствующего времени.

4.3. Накопитель информации для НИС.

1. Рассмотрим НИС, работающую в режиме накопления данных по одному каналу при одном управляемом воздействии.

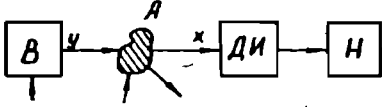


Рис. 4.3.

1) 'Алгоритм. Заключается в последовательном изменении U на постоянный шаг и записи показаний X . Тогда минимальный объем накопителя составляет

$$L \geq n$$

2) "Алгоритм. Измерения ведутся выборочно (на k точек меньше), тогда:

$$L'' \geq 2(n - k)$$

Этот алгоритм эффективен, если

$$\Delta = L' - L'' > 0,$$

т.е. при $k > \frac{n}{2}$

1. Рассмотрим НИС, регистрирующую по одному каналу, но содержащую настраиваемый измеритель:

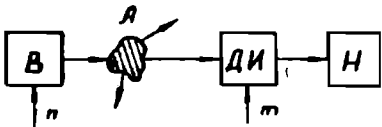


Рис. 4.4.

Для нее: $L' \geq n \cdot m$,
 $L'' \geq 2(n \cdot m - \kappa)$,
 $\kappa > \frac{n \cdot m}{2}$

В. НИС, структура которой изображена ниже, требует накопителей для двух режимов:

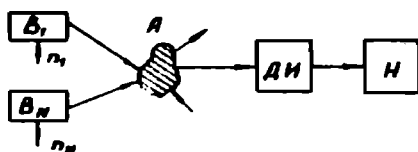


Рис. 4.5.

$$L' > \prod_i n_i, \quad i = \overline{1, N},$$

$$L'' > 2(\prod_i n_i - \kappa),$$

$$\kappa > \frac{\prod_i n_i}{2}$$

IX. НИС с одним настраиваемым источником воздействий и M настраиваемыми измерителями. Случай когда реализуются все n значений

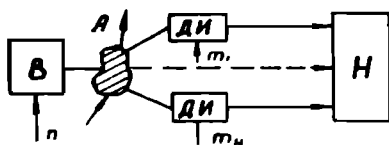


Рис. 4.6.

$$L' > n \cdot \sum m_j \quad j = \overline{1, M}$$

$$L'' > 3(n \cdot \sum m_j - \kappa)$$

$$\kappa > \frac{2}{3} n \sum m_j$$

V. Наиболее общий случай: НИС с M настраиваемыми измерителями и N источниками воздействий.

Алгоритм: не производится K измерений (в том числе исключаются некоторые значения воздействий), тогда:

а)

$$L' > (\prod n_i) \cdot \sum m_j$$

$$L'' > 3[(\prod n_i) \cdot \sum m_j - \kappa]$$

$$\kappa > \frac{2}{3} (\prod n_i) \sum m_j \quad ,$$

$$i = \overline{1, N} \quad j = \overline{1, M}$$

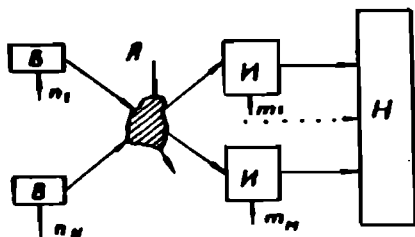


Рис. 4.7.

б) если при измерениях выпускаются лишь точки (но не типы y), тогда

$$L' > (\prod n_i) \cdot \sum m_j \quad L'' > 2[(\prod n_i) \cdot \sum m_j - \kappa] + N \quad , \quad \kappa > \frac{(\prod n_i) \cdot \sum m_j}{2} \quad ,$$

$$i = \overline{1, N} \quad , \quad j = \overline{1, M} \quad .$$

в) Если выпускаются только y (одни и те же, определенные во всех режимах измерений)

1)

$$L' > (\prod_i n_i) \cdot \sum m_j ,$$

$$L'' > 3(\prod_i n_i - \kappa) \cdot \sum m_j ,$$

$$\kappa > \frac{2}{3} \prod_i n_i ,$$

$$i = \overline{1, N} , \quad j = \overline{1, M}$$

либо:

2)

$$L'' > 2(\prod_i n_i - \kappa) \cdot \sum m_j + (\prod_i n_i - \kappa) ,$$

$$\kappa > \frac{(\sum m_j + 1) \prod_i n_i}{2 \sum m_j + 1} ,$$

$$i = \overline{1, N} , \quad j = \overline{1, M} ,$$

если используется порядок y ; $\kappa > \frac{1}{2} \prod_i n_i$

г) Если выпускаются κ y - типов, то:

$$L' = (\prod_i n_i) \cdot \sum m_j ,$$

$$\Delta = (\prod_i n_i) \cdot \sum m_j > 0 ,$$

$$s = \overline{1, N - \kappa} , \quad i = \overline{N - \kappa, N} , \quad j = \overline{1, M} ,$$

эффективно при любых $\kappa \geq 1$.

4.4. Применение УВМ позволяет уменьшить объем измерительной информации за счет замеров лишь в некоторых точках X -пространства с последующей интерполяцией на промежуточные. Для этого нужна будет некоторая дополнительная информация, которую можно получить в результате специальных исследований.

Приведем оценку возможного эффекта в наиболее простом случае.

Пусть мы производим равностоящие замеры с шагом h . При линейной интерполяции σ /6I/ ошибка составляет:

$$R = \frac{f''}{3} (h^2 t(t-1)) \quad , \quad \text{где} \quad t = \frac{x-x_0}{h}$$

Наилучший шаг съема информации определится из:

$$h \leq \sqrt{\frac{8\alpha}{M_2}} \quad (1)$$

здесь: α - ошибка при измерении,

M_2 - вторая производная процесса.

Если мы переходим от минимально возможного шага, ведущего к общему числу точек N , к большему шагу, то эффект уменьшения количества точек оценивается, с учетом (1), множителем

$$1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{8\alpha}{M_2}}} \quad (2)$$

Для случая интерполяции порядка n соответствующий эффект оценивается множителем

$$1 - \left[\frac{\alpha (n+1)!}{f^{(n+1)} \max \prod (t-i)} \right]^{-\frac{1}{n+1}}, \quad 0 < t < 1, \quad i = \overline{0, n} \quad (3)$$

Подобные оценки для случая n - мерных измерений существенно усложняются громоздкостью выражений и целым рядом других принципиальных трудностей (см. стр. 35).

Анализ (1) + (3) показывает, что эффект экономии накопителя и времени измерений существенно зависит от степени гладкости интерполируемой функции (определяется $f^{(n+1)}$).

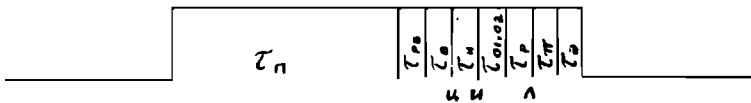
4.5. Оценка временных затрат экспериментов.

Временные затраты на эксперимент с помощью НИС складываются из следующих компонент:

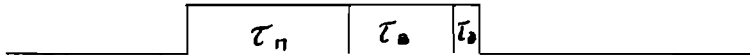
$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\pi} + \tau_{p\theta} + \tau_{\theta} + \tau_{\theta} + \tau_{\theta_1} + \tau_{\theta_2} + \tau_p + \tau_{\pi} + \tau_{\theta}.$$

1. время на реализацию воздействий τ_{θ} ,
2. время на измерения τ_{θ} ,
3. время на подготовку НИКС и образца к исследованию τ_{π} .
4. время на вычисление режимов воздействий $\tau_{p\theta}$.
5. время на обработку необходимую перед регистрацией τ_{θ_1} или перед управлением τ_{θ_2} .
6. время регистрации τ_p .
7. время на планирование τ_{π} .
8. и др. τ_{θ}

Диаграмма затрат (временное их распределение) может быть следующей:



Применение медленнодействующих источников воздействий параллельно с быстродействующими измерителями приводит к следующему распределению:



т.е. решающим при определении быстродействия НИС становятся время подготовки НИС и время на реализацию воздействия.

4.6. Время на реализацию воздействий.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся алгоритм исследований, который можно описать следующим образом.

Пусть имеется N -воздействий y_1, \dots, y_N , с количеством значений n_1, n_2, \dots, n_N и времени перехода $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ соответственно.

$y = y_N(1), y_N(2) \dots y_N(n_N), \dots, (y_N(1) \dots y_N(n_N) \dots y_1(1), \dots$ Эксперимент заключается в последовательной реализации всех воздействий по формуле:

$\dots, y_N(1) \dots y_2(1) y_1(n_1), (y_N(1) \dots y_2(2) \dots y_1(1), \dots$

$\dots, (y_N(1) \dots y_1(n_1)), \dots, (y_N(n_1) \dots y_2(1) \dots y_1(1)), \dots$

$\dots, (y_N(n_N) \dots y_2(n_2) \dots y_1(n_1)) \quad (I)$

здесь знак (\cdot) означает одновременность воздействий, а $(,)$ - последовательность.

При этом время на воздействия:

$$T_{\Sigma y} = \sum_{i=1}^N \tau_i \prod_{j=i}^N n_j$$

Здесь важно правильно выбрать последовательности воздействий.

Пусть, например: $N_1 = 2$, $n_1 = 2$, $N_2 = 3$, $\tau_1 = 1$ сек, $\tau_2 = 3$ сек
Очевидно, что следующие алгоритмы:

$$1. y_1 = y_1(1), y_1(1) \cdot y_2(1), y_1(1) \cdot y_2(2), y_1(1) \cdot y_2(3),$$

$$y_2(3) \cdot y_1(2), y_2(2) \cdot y_1(2), y_2(1) \cdot y_1(2)$$

$$2. y_2 = y_2(1), y_2(1) \cdot y_1(1), y_2(1) \cdot y_1(2), y_2(2) \cdot y_1(2),$$

$$y_2(2) \cdot y_1(1), y_2(3) \cdot y_1(1), y_2(3) \cdot y_1(2)$$

идут с разным временем:

$$T_1 = 1+3+3+3+1+3+3 = 17 \text{ сек} ,$$

$$T_2 = 3+1+1+3+1+3+1 = 13 \text{ сек}$$

4.7. Определение оптимальной последовательности воздействий: 1 способ.

Составляются все возможные комбинации типов воздействий, всего $N!$ Ищется T_{min} .

2 способ.

Составим определенную последовательность воздействий, вычислим времена, которые займет каждое из воздействий при использовании алгоритма "1" для этой последовательности.

$$\begin{cases} \tau_1 \cdot (n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_N) = P_1 \\ \tau_2 \cdot (n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_N) = P_2 \\ \tau_3 \cdot (n_3 \cdot \dots \cdot n_N) = P_3 \\ \tau_N \cdot n_N = P_N \end{cases} ,$$

$$T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N P_j .$$

а) если $n_1 = n_2 = \dots = n_N = n$, то $P_1 = \tau_1 n^N, \dots, P_N = \tau_{N-1} n^N$

1) при $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_N$ порядок безразличен и

$$T_{\Sigma} = \tau \left[\frac{n}{n-1} (n^N - 1) \right]$$

2) при $\tau_i \neq \tau_j$, где $i \neq j$, $(ij) = \overline{1, N}$

Оптимальный порядок образуется, если y расположить так, чтобы $\tau_{s_1} \leq \tau_{s_2} \leq \dots \leq \tau_{s_N}$.

тогда:

$$T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N n^j \tau_{j-(N-1)} ,$$

т.е. $T_{\Sigma} = (\bar{n}, \bar{\tau})$,

где, $\bar{n} = \{n^N, \dots, n^1\}$, $\bar{\tau} = \{\tau_1, \dots, \tau_N\}$

Действительно, пусть

$$T_{1\Sigma} = T_0 + \tau_{N-1} n^2 + \tau_N n ,$$

$$T_{2\Sigma} = T_0 + \tau_N n^2 + \tau_{N-1} n$$

покажем, что $T_{1\Sigma} < T_{2\Sigma}$, если $\tau_{N-1} < \tau_N$ (*)

Составим $\Delta = T_{1\Sigma} - T_{2\Sigma}$ докажем: $\Delta < 0$.

$$\Delta = \tau_{N-1} n^2 + \tau_N n - \tau_N n^2 - \tau_{N-1} n = (\tau_{N-1} - \tau_N)(n^2 - n)$$

$$\text{sign}(\tau_{N-1} - \tau_N) = \text{sign} \Delta$$

но $\text{sign}(\tau_{N-1} - \tau_N) < 0$, т.к. (*)

Что и требуется доказать.

б) Аналогично получим, что, если τ равны, а n_i не равны, то оптимальным будет расположение при котором: $n_{s_1} \leq \dots \leq n_{s_N}$.

в) Если $\tau_{s_1} \leq \tau_{s_2} \leq \dots \leq \tau_{s_N}$,

$$n_{s_1} \leq n_{s_2} \leq \dots \leq n_{s_N} ,$$

то оптимальным будет порядок при котором:

$$\tau_{s_1} , \tau_{s_2} , \dots , \tau_{s_N} .$$

4.8. Предыдущий алгоритм страдал одним недостатком, который заключается в том, что в его результате некоторые комбинации воздействий повторяются многократно.

Важно оценить время действия алгоритма, использующего все комбинации, но без повторов.

Несложный анализ дает следующее рекуррентное соотношение

$$T_{i\bar{x}} = n_i [T_i + T_{i-1\bar{x}}] - \Delta_i$$

$$\text{здесь: } T_0 = 0, \quad i = \overline{1, N}$$

$$\Delta_1 = 0,$$

$$\Delta_2 = (n_2 - 1)T_1,$$

$$\Delta_3 = (n_3 - 1)[T_2 + T_1(n_1 - 1)],$$

$$\Delta_4 = (n_4 - 1)\{T_3 + T_2(n_2 - 1) + T_1[(n_2 - 1)(n_1 - 1) + 1]\},$$

$$\Delta_5 = (n_5 - 1)\{T_4 + T_3(n_3 - 1) + T_2[(n_3 - 1)(n_2 - 1) + 1] + T_1[(n_3 - 1)(n_2 - 1)(n_1 - 1) + (n_3 - 1)(n_2 - 1) + (n_1 - 1)]\}.$$

В таком алгоритме, для того, чтобы обеспечить $T_{\bar{x}} \min$ необходим порядок: $T_{31}, T_{32}, \dots, T_{5N}$; где $T_{si} \leq T_{s(i+1)}$

независимо от n_i .

При равных T_i порядок безразличен.

Л и т е р а т у р а

1. Карандеев К.Б., Измерительные информационные системы и автоматика, "Вестник АН СССР", № 10, 1961.
2. Налимов В., "Заводская лаборатория", 28, 1962.
3. Евреинов Э.В., Косарев Ю.Г., О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительных систем. - Сб. тр. Ин-та матем. СОАН СССР "Вычислительные системы". Новосибирск, вып. 8, 1963.

4. Солодовников В.В., Некоторые научные проблемы комплексной автоматизации, "Вестник АН СССР", № 8, 1959.
5. Солодовников В.В., Кибернетика, автоматика, проблема автоматического управления и управляющие машины, в сб. "Применение вычислительной техники для автоматизации производства", М., 1961г.
6. Лискер И.С., Использование электронной вычислительной машины для комплексного исследования характеристик полупроводниковых материалов и управления физическим экспериментом, - Сб.тр. Ин-та матем. СО АН СССР "Вычислительные системы". Новосибирск, вып. 8, 1963.
7. Темников Ф.Е., Вопросы решаемые теорией информации, "Кибернетические пути совершенствования методов измерений и контроля", М., 1964.
8. Цапенко М.П., и др., Измерение и кибернетика, "Тр.В конфер. по авт. контр. и методам электр. изм." СО АН СССР, № 1, 1964.
9. Кузьмин Ю.Я., В сб. "Материалы II Симпозиума по ядерной радиоэлектронике," стр.149-150, "ОИЯИ", Дубна, 10-14 ноября 1964.
10. Карпов Б.В., Цапенко М.П., Об измерительных информационных системах, "Автометрия", № 2, 1965.
11. Проблемы развития научного приборостроения в СССР, М., 1966.
12. Витол И.К., О некоторых возможностях применения вычислительной машины в исследовании люминесценции кристаллофосфоров, Тезисы докладов XV Сопевания по люминесценции, Тбилиси, 17-23 ноября 1966.
13. Кистунов В.Н., Основы цифровой электроизмерительной техники и цифровые преобразователи, "Энергия", 1966.
14. Информация и кибернетика, "Сов.радио", 1967.
15. Кузьмин Ю.Я., К вопросу о построении систем наблюдения, Доклад на конференции "Вычислительные системы", Новосибирск 1967.
16. Нейман Дж., Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. - В сб. "Автоматы", М., Изд-во иностр. лит., 1956.

17. Винер Н., Кибернетика, "Сов.радио", 1958.
18. Эшби У.Р., Введение в кибернетику.(Перевод с англ.), ИД, 1959.
19. Яблонский С.В., Основные понятия кибернетики, в сб. Проблемы кибернетики, № 2, 1959.
20. Лернер А.Я., Начала кибернетики. М., "Наука", 1967.
21. Гуд Г.Х., Макол Р.Э., Системотехника. Введение в проектирование больших систем, (Перевод с англ.), "Сов. радио", 1962.
22. Месарович М., Основания общей теории систем, в сб.Общая теория систем, (перевод с англ.) "Мир", 1966.
23. Бусленко Н.П., К теории сложных систем, "Изв.АН СССР", Техн. киб., 1963, № 5.
24. Бусленко Н.П., Моделирование производственных процессов на ЭЦМ, "Проблемы кибернетики", вып.9, Физматгиз, 1963.
25. Планирование эксперимента, "Наука", 1966.
26. Бусленко Н.П., Юркевич О.М., Об операциях над агрегатами в сложных системах, "Изв. АН СССР", Техн.киб., 1964, № 2.
27. Еврешинов Э.В., Косарев Д.Г., Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности, Новосибирск, "Наука", 1966.
28. Голубев-Новокилов Д.С., Многомашинные комплексы вычислительных средств, М., "Сов.радио", 1967.
29. Солодовников В.В., Некоторые вопросы теории и принципов построения аналитических самонастраивающихся систем, в сб. "Аналитические самонастраивающиеся системы", Изд. "Машиностроение", М., 1965.
30. Клепиков Н.П., Соколов С.Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия, Физматгиз, 1964.
31. Налимов В.В., Чернова Н.А., Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, "Наука", Ч. 1965.
32. Расстригин Л.А., Случайный поиск, "Знание", Рига, 1965.
33. Моцкус И.Б., Многоэкстремальные задачи в проектировании, "Наука", 1967.

34. Нараян К., Оптимизация ядерного измерительного оборудования и Управление им с помощью счетной машины. Центральный ин-т физических исследований, Будапешт. Препринт. ОИЯИ, P-1893, Дубна, 1964.
35. Забиякин Г.И., Цифровые методы регистрации и вычислительные машины в экспериментальной физике (обзор), Препринты ОИЯИ, 1834, 1913, 1914, Дубна, 1964.
36. Маталин Л.И., Многоканальные анализаторы ядерной физики, Атомиздат, 1967.
37. Янева Н., ЭВМ в ядерных исследованиях, "Физ.-матем.писание", 9, № 2, 1966.
38. Грубов В.И., Ивахненко А.Г., Мандровский-Соколов Промышленная кибернетика, "Наукова думка", Киев, 1966.
39. Гайлитис А.А., Принципы обработки оптических спектров с помощью вычислительной машины, Тезисы докладов XV Совещания по люминесценции, Тбилиси, 17-23 ноября 1966.
40. Picard J., Автоматический анализ спектров, линии которых описываются гауссовой кривой, "Репр. СЕА" № 3024, 1966.
41. Головин Б.М., Кулюкина Л.А., Использование автоматического опознавания образов для идентификации частиц высоких энергий, "Ядерная физика", № 5, 1966.
42. Mariscotti M.A., Метод автоматической идентификации пииков в присутствии фона и его использование в спектральном анализе, "Nucl. Instrum. and Methods", 50, № 2, 1966.
43. Kempeney P.I. и др., Цифровой анализ процессов перераспределения зарядов, включающих центры захвата, "Phys. Rev" 155, № 3, 1967.
44. Gurley B.M. and Woodward C.E., "Light - pen links computer to operator", Electronics, vol.32, p.p. 85-87, November 1959.
45. Leibowitz H., Proc. Conf. on the Utilization of the Multi-parameter Analyzers in Nuclear Physics, N.Y., 1962.
46. Whalen J.F., In "Automatic acquisition and reduction of nuclear data". Proc. conf. EANDC, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H, Karlsruhe, 1964.
47. Pearson A., In "Automatic acquisition and reduction of nuclear data". Proc. conf. EANDC, Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe, 1964.

48. Basset R.C., Proc. Conf. on the Utilization of the Multi-parameter Analyzers in Nuclear Physics, N.Y., 1962.
49. Michael G. Proc. Conf. on the Utilization of the Multi-parameter Analyzers in Nuclear Physics. N.Y., 1962.
50. Математический выпуск "Вычислительные машины", Proceedings of the JEЕЕ, vol. 54, N 12, 1966.
51. Сб. "XII Международная конф. по физ. высоких энергий", Атомиздат, т.2, 1964.
52. Brown R.M., и др., Система обработки информации, обслуживающая экспериментальные установки на линейном ускорителе в Стенфорде, "Proc. JEЕЕ", 54, N 12, 1966.
53. Butler J.W., Butler M.K, ЦВМ непосредственно связанные с установками для ядерных исследований, "Nucleonics", 25, N 2, 1967.
54. Kozłowski J.; Цифровой отсчет показания поглощения при спектрофотометрических измерениях, "Pomiary, automat., kontrola", 12, N 8-9, 1966.
55. Peterson N.C., и др., Цифровая регистрация спектров, "Rev. Scient. Instrum.", 37, N 10, 1966.
56. Косцов Э.Г., Лискер И.С., Комплексный метод автоматизированного исследования физических свойств полупроводниковых диодов, Автометрия, № , 196
57. Портнов А.А., Витол И.К., Грабовский В.Я., Заринь М.Я., Страумен Я.Я., Тардонак Э.Э., Структура научно-исследовательской кибернетической системы НИКС-1, разработанной в Латвийском госуниверситете им. П.Стучки, для исследования электронных процессов в кристаллофосфорах оптическими методами, Тезисы докладов XV Сессии по люминесценции, Тбилиси, 17-23 ноября 1966.
58. Миллер Д.К., Таде И.А., Витол И.К., Гурдзиел П.Я., Научно-исследовательская кибернетическая система НИКС-2 для изучения физических явлений оптическими и электрическими методами в неизотермических условиях, Тезисы докладов XV Сессии по люминесценции, Тбилиси, 17-23 ноября 1966 г.
59. Розанов Ю.А., "Некоторые задачи теории оценок и прогнозирования", Matematicko-Fyzikalny časopis SAV. 16;3, 1966.

60. Березин И.С., Жидков Н.П., Методы вычислений, т. I, Ф.М. 1959.
61. Данцов К. ,Практические методы прикладного анализа, Ф М , 1961.

Г Л А В А 2

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СИСТЕМА НИКС-В.

§ 1. ОБЗОР ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СРЕДСТВ В СИСТЕМАХ ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЯ.

1.1. Известно, что в измерительно-вычислительных системах (НИС) /3 + 5/ основное внимание обращается на автоматизацию сбора и математическую обработку результатов измерений. Однако, как отмечается в работах Э.В.Евреинова, Ю.Г.Косарева и И.С.Дискера /1,2,6/, очень часто в НИС, кроме указанных задач, появляется необходимость управлять воздействиями на объект исследований. Это особенно характерно для экспериментов в области физики твердого тела /2,7,11,18/. Таким образом автоматизация указанных исследований требует создания систем, способных решать следующие основные задачи:

1. Управление воздействиями на объект исследований.
2. Сбор и накопление измерительной информации.
3. Математическая обработка результатов измерений.
4. Планирование эксперимента.
5. Осуществление связи оператор-система.

Такая формулировка соответствует классу систем экспериментирования (СЭ) (глава 1 §1). Типичный вариант СЭ построенной на базе управляюще-вычислительной техники показан на рис.1

Система внешних устройств, которую составляют датчики, измерительные и исполнительные приборы будет подробно описана в главе 5. Здесь отметим только некоторые особенности, которые связаны с общими вопросами построения НИС.

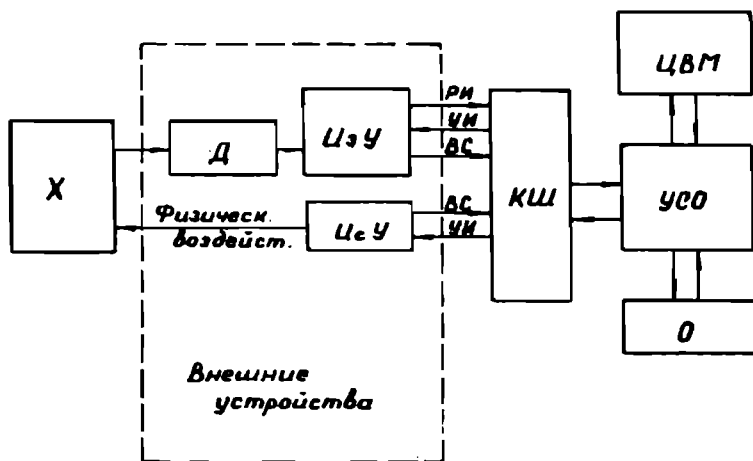


Рис. 1.

Здесь:

X - объект исследования;

Д - датчики; ИЗУ - измерительные устройства;

ИСУ - исполнительные устройства;

КШ - кроссшаф; УСО - устройство связи с объектом;

О - оператор; УИ - управляющая информация;

РИ - результаты измерений;

АС - информация о внутренних состояниях.

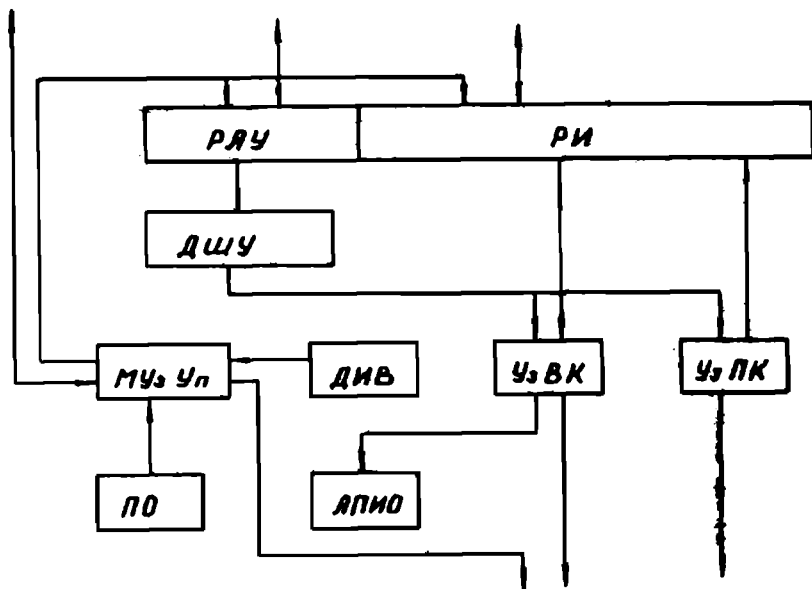
Принимая во внимание, что в научном эксперименте ведется борьба за высокую точность измерений, в системе обычно используются нестандартные датчики, которые отличаются стабильностью и параметрами выходного сигнала. Это в свою очередь приводит к применению нестандартной измерительной аппаратуры — аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые отличаются по точности, быстродействию и входным параметрам. Если управляющие машины, применяемые в производстве обычно содержат один универсальный АЦП, который находится

в устройстве связи машин с объектом (УСО) /9,10,29/. те измерительные устройства НИС должны находиться в непосредственной близости от исследуемого объекта. Это обуславливается высокими требованиями к помехозащищенности каналов передачи аналоговых сигналов.

Имея в виду, что в зависимости от изменения методов исследования меняется и комплектация внешних устройств, последние целесообразно подключать к цифровой вычислительно-управляющей технике через, так называемый, кросскаф, который состоит из поля коммутаций и имеет на своих входах и выходах штексельные разъемы (рис. 1). Кросскаф также позволяет во время отладки и профилактики проверить сигналы внешних устройств.

Если НИС предусмотрена для управления экспериментом и сбора результатов измерений, структура УСО обычно образуется на базе следующих узлов /29,31,32/ (рис. 2):

К ЦВМ



К внешним устройствам

Рис. 2.

- РАУ** - регистр для указания номера устройства, к которому идет обращение.
- РИ** - регистр обмена информации между внешними устройствами и ЦВМ.
- ДШУ** - дешифратор номера устройства.
- У.ВК** - узел выдачи кода с РИ на устройство, номер которого указан в ДШУ
- У.ПК** - узел приема кодов внешних устройств на РИ. Основная его функция - совмещение многоканальной информации в один канал.
- ДИВ** - датчик импульсов времени, служащий для организации логических операций УСО в реальном масштабе времени.
- МУЧ** - местный узел управления УСО.
- ПО** - пульт оператора для ручного управления внешними устройствами, а также для связи оператора с системой в режиме программного управления экспериментом.
- АПИО** - аппаратура для представления информации оператору.

Отметим, что в последнее время для объединения функций ПО и АПИО в режиме динамической связи человека с системой стала широко применяться аппаратура "светового пера" /8,13, 35,39/. Совмещение операций ввода и вывода информации на базе электронно-лучевой трубки упрощает аппаратуру и облегчает управление динамической экспериментальной системой.

Указанные узлы могут быть организованы разными способами, например, могут находиться вблизи ЦВМ или же помещаться рядом с внешними устройствами, однако в большинстве случаев их функции совпадают.

1.2. Одной из сложнейших задач построения СЭ является оптимальный выбор и организация цифровой управляющей и вычислительной техники. Сведения об иностранных управляющих машинах, применяемых в научном эксперименте, можно найти в литературе /20 + 23/. Технические данные УВМ выпускаемых в нашей стране приведены в /10,12,14,15,16/.

Однако в последние годы стал интенсивно развиваться еще один класс машин - управляющие логические машины (УЛМ) / 24 + 28 /, которые находят широкое применение в управлении энергосистемами, в металлургии и других отраслях народного хозяйства.

Работа УЛМ основывается на реализации системы уравнений, записанных в виде временных булевых функций типа:

$$b_i = f_j(a_1, a_2, \dots, a_n, \tau)$$

Здесь:

a_i - входные двоичные переменные (рис. 3),

b_i - выходные двоичные переменные,

τ - время существования $b_i = 1$, если $f_j(a_1, \dots, a_n) = 1$

Конструкция конкретной УЛМ рассмотрена в /26/. Основные ее узлы и их структурные связи показаны на рис. 3.

Как было уже отмечено, задачами СЗ является сбор и математическая обработка результатов измерений одновременно с управлением воздействием на объект исследований. Примеры частичных решений указанных задач можно найти в литературе.

В /32/ рассматривается структура УСО, служащего для распределения информации по n каналам управления в реальном масштабе времени. Система имеет некоторые особенности:

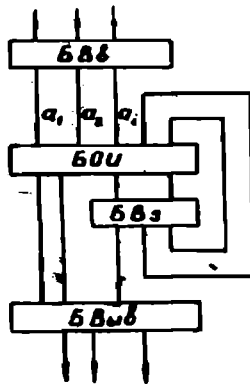


Рис. 3.

Функциональная схема УЛМ:

БВВ - блок ввода информации,

БЛУ - блок логической обработки информации,

БВВ - блок выдачи информации.

УСО выдает на управляющий объект не полную информацию, а только ее приращения со знаком.

Конструкция содержит блок автоматической коррекцией задания БКЗ, который позволяет оператору менять характер управления во время работы ЦВМ. Связь УСО с ЦВМ организована по принципу асинхронной работы автоматов. Операции в УСО осуществляются на базе обработки временных булевых функций. Управление качеством выходной информации регуляторов осуществляется на основе арифметической обработки данных, принятых с ЦВМ в УСО.

Автоматическое изменение номера управляемого канала связано с непосредственным участием ЦВМ, что приводит к неэкономному использованию машинного времени.

Для m - кратного повторения одного и того же процесса управления N регуляторами требуется $N \cdot m$ обращений к ЦВМ. Оба указанных недостатка можно устранить, если в УСО организовать собственную буферную память, в которой записывается управляющая информация для выполнения N тактов программы. В работе /29/ рассмотрена система данных от датчиков для передачи их в вычислительную машину, удаленную от объекта (рис.4). УСО при этом помещается вблизи измерительной аппаратуры. Система построена на базе узлов показанных на рис. 2, однако она имеет некоторые особенности: к УСО подключено быстродействующее печатающее устройство БПЧУ, которое служит для оперативного представления результатов измерений оператору.

Канал связи с ЦВМ обеспечен с аппаратурой для проверки и исправления принятой информации. Последняя работает в коде Хемминга. УСО имеет явно выраженный процессор, работающий в реальном масштабе времени. Он служит для реализации набора команд (режимов), которые употребляются как при ручном, так и машинном управлении внешними устройствами. Предусмотрена аппаратура для программного управления чувствительностью измерительных усилителей.

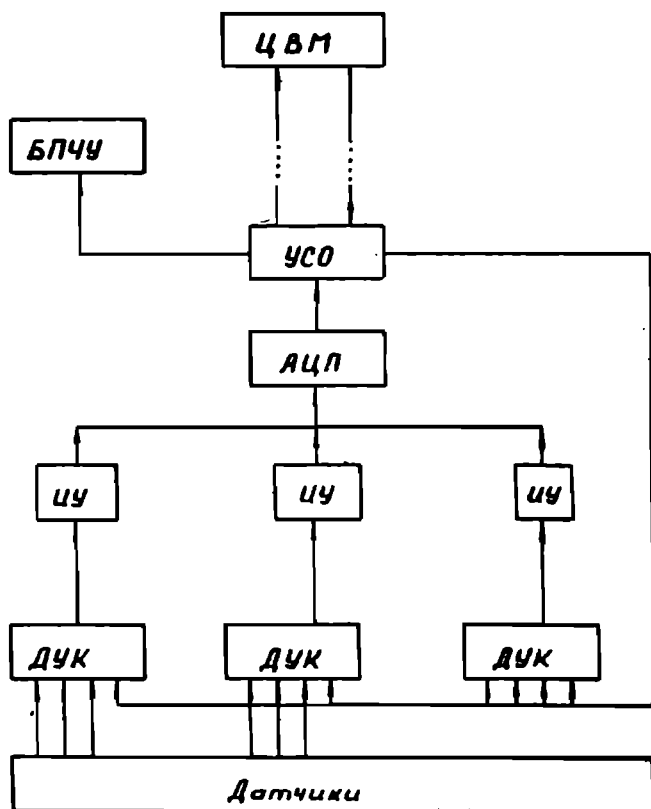


Рис. 4.

БПЧУ - быстродействующее печатающее устройство,
ИУ - измерительный усилитель,
ДУК - дистанционно-управляемый коммутатор,
АЦП - аналого-цифровой преобразователь.

Отметим, что важнейшие блоки (например КУ) имеют автономную систему защиты от перегрузок, которая не обслуживается программой. Таким образом, в системе можно выделить три иерархических уровня управления:

1. автономные блоки типа КУ.
2. УСО - выполняющие серию операций после задания режима работы с машины.
3. ЦВМ - управляющая как сбором, так и математической обработкой измерительной информации.

Недостатки системы следующие.

Запись каждого результата измерений в память происходит с помощью ЦВМ. В результате - неэкономно используется машинное время - опрос 5070 датчиков занимает 10 сек, что соответствует фактическому быстродействию 507 оп/сек. Если эту функцию поручить УСО, ЦВМ сможет работать эффективнее. В статье /30/ рассматривается система, которая построена на базе ЦВМ и служит для сбора и обработки результатов сложного эксперимента (рис. 5). Так же как в /31/, она ориентирована на оперативную обработку результатов измерений во время эксперимента. Авторы основное внимание обращают на исследование динамических свойств объекта. Кроме сбора регулярно поступающей информации, система предусмотрена для приема и обработки сообщений со случайным распределением во времени. Особенностью структуры системы является применение буферной памяти для хранения регулярной и случайной информации. Запись результатов измерений происходит по сигналам генератора импульсов времени ГИВ, (рис.5). Однако ЦВМ в такой системе становится пассивным элементом в смысле управления, поскольку она не может корректировать приказы, выдаваемые ГИВ. Это приводит к неэкономному использованию машинного времени, о чем свидетельствуют режимы ЦВМ /30/:

1. прием информации с внешних устройств,
2. математическая обработка принятой информации,
3. программный останов ЦВМ до ее запуска сигналами внешних устройств.

Выбранный принцип требует окончания всех вычислений до определенных моментов времени, чтобы по сигналу ГИВ принять новый массив информации. Система, построенная на базе асинхронной

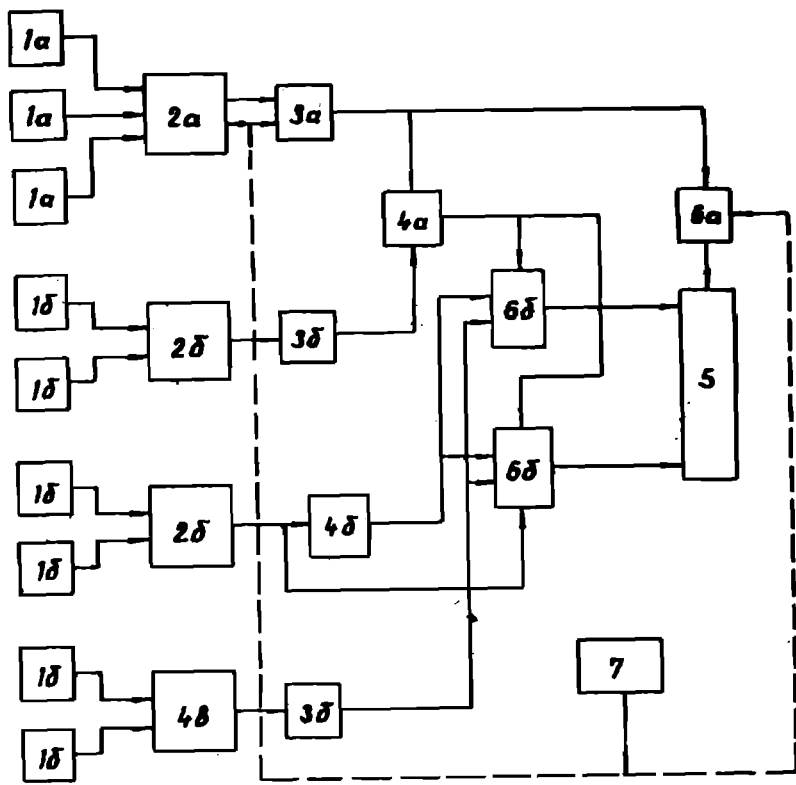


Рис. 5.

- | | |
|--------|--|
| 1а, 1б | — аналоговые и частотные датчики, |
| 2а, 2б | — их коммутаторы, |
| 3а, 3б | — преобразователи аналог код, частота—код, |
| 4а, 4б | — накопители на магнитной ленте для записи
регулярной и случайной информации, |
| 4в | — НМЛ для записи частотно-модулированных
сигналов, |
| 5 | — ЦВМ, |
| 6а, 6б | — устройства ввода в ЦВМ регулярной и слу-
чайной информации, |
| 7 | — генератор импульсов времени. |

ЦВМ страдает рядом недостатков:

1. Учитывая, что в зависимости от разрядности чисел участвующих в операциях умножения или деления меняется время их выполнения, не разрешается составлять подпрограммы с большим числом указанных операций.
2. При обработке случайной информации необходимо знать экстремальные значения распределения случайных величин заявок во времени.
3. Для определения частоты опроса датчиков с помощью ГИВ требуется предварительно составить и отладить подпрограммы, чтобы узнать длительность их срабатывания.

Все это указывает на необходимость планирования эксперимента во время его реализации /34/, однако выбранный принцип связи ЦВМ с внешними устройствами не позволяет сделать этого. Наоборот, в возможных моментах планирования ЦВМ программно останавливается.

В статье /31/ рассматривается универсальная аналого-цифровая система для сбора и обработки результатов измерений. Она построена для оперативной обработки измерительной информации, т.е. с целью получения текущих результатов исследований во время эксперимента. Как отмечают авторы, только такие системы осуществляют новый, кибернетический подход к выполнению исследований.

Также как в /19/, в системе предусмотрено буферное запоминающее устройство для накопления массивов измерительной информации. Применяется аппаратура для дистанционной передачи информации на ЦВМ.

Особенно следует отметить преобразователь график-код, который может использоваться для оперативной коррекции результатов измерений перед их вводом в ЦВМ. Таким образом расширяются возможности исследователя как элемента оперативной НИС.

1.3. Научным подходом к проблеме связи "человек-машина", как известно, занимается инженерная психология /36 + 38/. Здесь отметим лишь некоторые важнейшие концепции, высказанные автором работы /36/. Вместо лозунга "вытеснить человека из сложных систем" практика конструирования и эксплуатации последних привела к новому требованию: "обеспечить симбиоз человека и машины". Решение данной задачи нужно искать не по пути упрощения

функций оператора до элементарных действий, а по пути эффективного использования тех универсальных способностей человека, которыми не обладает и не может обладать вычислительная машина.

Таким образом, именно проектирование деятельности человека в системе, является первым шагом для успешного решения данной проблемы. Особенно важно это для научно-исследовательских систем, в которых должны приниматься все меры для рационального использования творческих сил человека. На первом месте здесь должны ставиться две основные задачи:

1. Планирование как динамического, так и пассивного эксперимента /33,34/.
2. Корректировка и отбор результатов измерений перед их математической обработкой /17,31/.

Проведенный анализ позволяет делать некоторые выводы:

1. Рассмотренные конструкции УСО выполняют функции логических управляющих машин (ЛУМ). В некоторых случаях они уже имеют собственные процессоры /17,29/, буферные запоминающие устройства для накопления результатов измерений /19,30,31/ и память (регистры) /29,32/, позволяющие выполнить некоторую последовательность операций по специальным командам ЦВМ.
2. Стремление сузить логическую конструкцию УСО и передать фактические функции ЛУМ на ЦВМ приводит к большим потерям эффективности последней /30/. Это связано с выполнением задач управления и сбора информации в реальном масштабе времени, когда большинство аппаратуры ЦВМ не может использоваться /29/.
3. Кибернетизация научного эксперимента связана с его динамическим планированием и, следовательно, с текущей обработкой результатов измерений /30,34/.
4. Обзор существующей техники для решения задач СЭ позволяет в них выделить, по крайней мере, три иерархических уровня управления:
 - 1) уровень полуавтономных исполнительных агрегатов.
 - 2) Уровень логических управляющих машин, работающих в реальном масштабе времени.
 - 3) Вычислительные машины для математической обработки измерительной информации и планирования эксперимента.

§ 2. СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ЛАТВИЙСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА

2.1. В 1966 г. в Проблемной лаборатории физики полупроводников была введена в действие система экспериментирования для исследования рекомбинационных процессов в твердых телах /10 /.

Система (рис. 6) представляет собой два измерительных тракта: один для прецизионных измерений спектров поглощения (АЦП с точностью до 0,05%), другой для измерения спектров люминесценции (АЦП с точностью 0,5%). Оба тракта обслуживаются монохроматором *SPM-1 „Ceiss“*, управляемым шаговым двигателем (точность 1/500 окружности, минимальный шаг за 5 мсек).

Кроме того, имеется ряд программно управляемых оптических затворов, фильтр, и т.п.

Образец помещается в криостат с вакуумом порядка 10^{-5} мм рт.ст. Есть возможность автономного регулирования температуры от 100°K до 420°K , а также воздействия на образец рентгеном и ультрафиолетом.

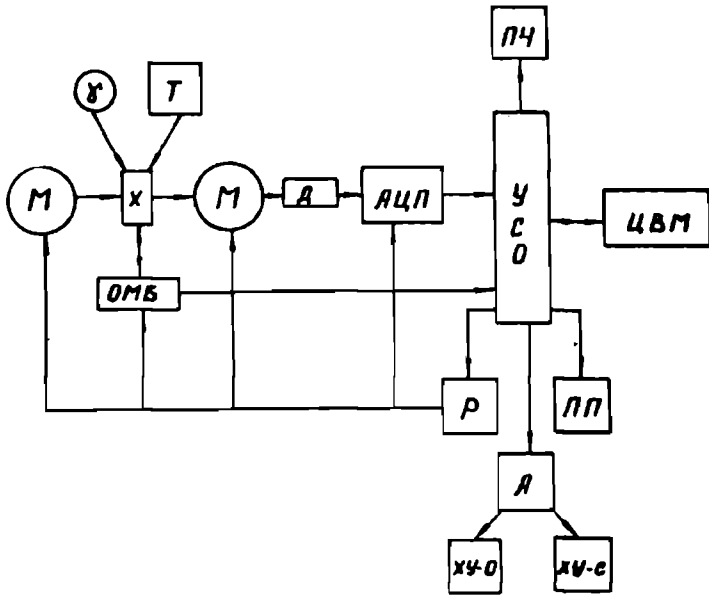


Рис. 6.

Здесь:

1) воздействующе-измерительная система:

У - рентген; Т - температура;

М - монохроматор; Д - датчик; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ОМБ - оптико-механический блок; X - образец;

2) УМШН "Днепр-1":

Р - релейный блок; А - аналоговый блок;

УСО - устройство связи с объектом;

ПЧ - печатающее устройство;

3) регистрирующая система:

ПЛ - перфоратор ПЛ-80; ХУ-О - двухкоординатный осциллограф; ХУ-С - графопостроитель.

Эксперимент проходит по заранее установленной программе и сводится к управлению монохроматором, АЦП, ОМБ, перемещению образца и последующей обработке измерительной информации.

На рисунке 7 показана временная последовательность операций.

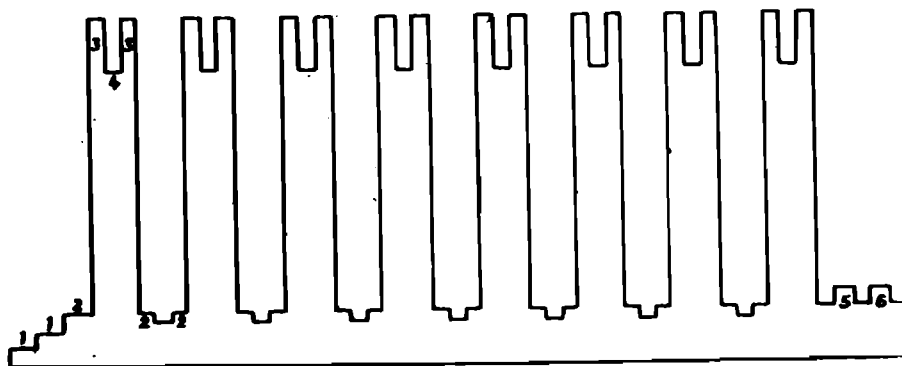


Рис. 7.

Здесь: 1,1 - установка состояния монохроматора; 2 - измерение темнового тока; 3 - измерения интенсивности эталонного света; 4 - измерение света через кристалл; 5 - вычисление оптической плотности "Д" и ошибки; 6 - контроль "Д"; 7 - блок изменения состояния монохроматора.

Машинна оценивает качество информации, производит поправки на нелинейность и селективность приборов, осуществляет контроль за системой.

Информация выдается на осциллоскоп с большим экраном, алфавитно-цифровую печать, а также накапливается на перфоленте для последующей обработки, которая в ряде случаев сводится к разложению на компоненты (см. 3 главу).

Оценка полезного времени работы машины в системе дает 5% от общего времени. Это следует из того, что "Днепр-1" значительную часть времени тратит на ожидание разрешения последующих операций (поскольку аппаратура воздействующей-измерительной части работает на частотах $2 + 1000$ гц, а операции выполняются машиной с частотой $2 + 40$ Кгц). Увеличение эффективности использования машины можно достичь двумя способами: увеличением сложности экспериментов, или обслуживанием нескольких экспериментов. Однако это встречает существенные затруднения, главным образом из-за малой "памяти" "Днепр-1" и неприспособленности к работе в сложных системах. Кроме того, УСО "Днепр-1" не допускает самостоятельную работу без вычислительной части; отсюда постоянная загрузка вычислителя обращениями к УСО и нерациональное использование "памяти". УСО не позволяет вести ручную отладку эксперимента, минуя программы. Это практически исключает поисковый режим и затрудняет оперативное вмешательство исследователя в эксперимент. Этому же препятствует входной язык машины, не удовлетворяющий требованию простоты программирования физического эксперимента.

Опыт эксплуатации системы экспериментирования дал некоторые указания на комплектацию математического обеспечения эксперимента. Оказалось, что для управления экспериментом и обработки данных необходим набор следующих программ:

1. Программа управления углом поворота.
2. Программа опроса АЦП.
3. Программа печати и перфорации данных эксперимента.
4. Программа вывода на ХУ - самописец и осциллограф.
5. Программа оптимизации во времени.
6. Программа сглаживания.
7. Программа анализа сложных спектральных кривых.

Выяснилась целесообразность разделения этапов управления экспериментом и обработки результатов.

Учитывая вышеизложенные особенности системы экспериментирования, наряду с продолжением подобных разработок, начаты исследования и других способов построения НИС.

Один из других вариантов заключается в следующем.

Разрабатываются универсальные блоки, стыкующиеся между собой и через специальные устройства с вычислительными машинами. Сборка НИС ведется путем постепенного наращивания количества таких блоков, по мере усложнения эксперимента. Операции непосредственного взаимодействия с измерителями и источниками воздействий отделены от обработки измерительной информации, за счет выполнения их на разных машинах, каждая из которых наиболее приспособлена для отведенной ей задачи. Т.к. этапы получения измерительной информации и ее обработки часто можно разделить, то в экспериментирующей системе может находиться машина первого типа, которая обычно проще универсальных управляюще-вычислительных машин. Машина второго типа в этом случае может использоваться для последовательной обработки данных нескольких систем экспериментирования. Кроме того, такую обработку можно проводить на более мощных вычислительных средствах специальных вычислительных центров. Этот путь, по-видимому, более выгоден для исследователей как с экономической стороны, так и с точки зрения простоты построения НИС, ибо он позволяет осуществлять автоматизацию "снизу", т.е. не начинать с покупки дорогостоящих больших ЭВМ, а заканчивать ее при возникающей потребности.

В 1967 г. в Проблемной лаборатории физики полупроводников была введена в строй система, изображенная на Рис. 8.

Основное отличие от I варианта состоит в меньшей сложности электронной машины и ее большей специализации к нуждам научного эксперимента (описание машины и системы программирования см. 6 главу). Кроме того, предусматривается параллельная работа "Физпульта" с вычислительной машиной, таким образом, на "Физпульт" ложится основная тяжесть взаимодействия с измерительно-воздействующей системой, в то время как ЦВМ проводит вторичную обработку информации, планирование эксперимента, подготовку информации к выводу, расчет сложных режимов воздействий и др. Такое распределение работ позволяет резко повысить эффективность ЦВМ в системах экспериментирования.

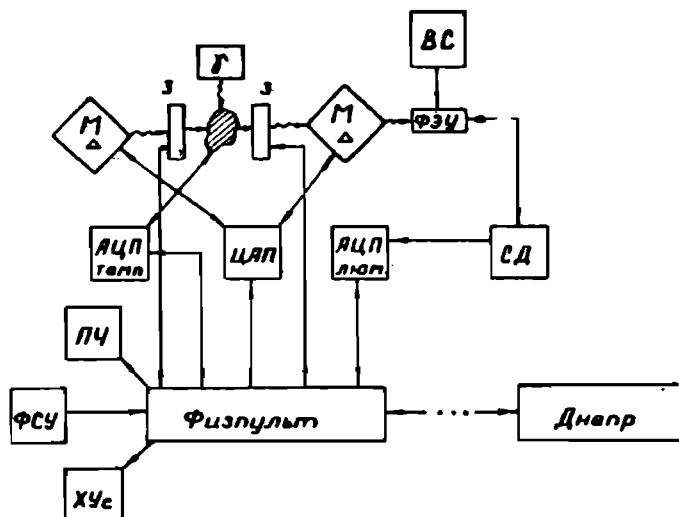


Рис. 8.

Для сбора измерительной информации применяются специальные методы.

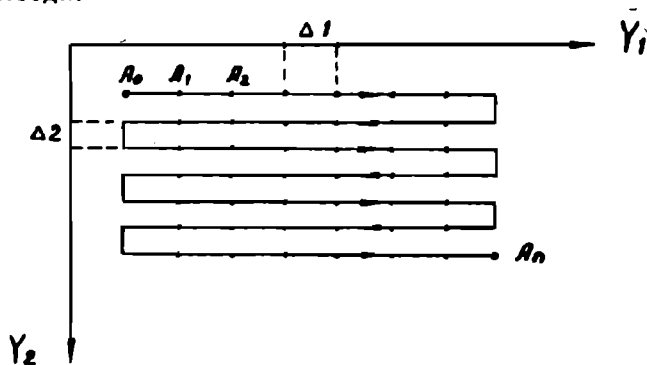


Рис. 9.

На рис.9 изображен метод получения измерительной информации типа "спектр возбуждения спектров излучения", при котором система проходит последовательность точек

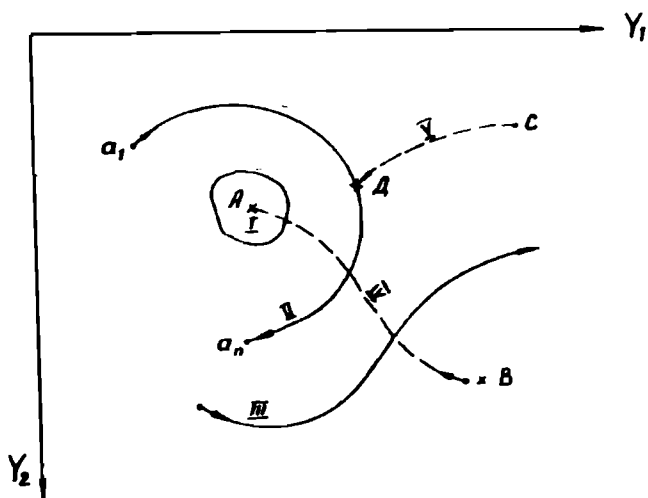


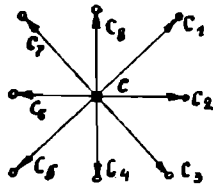
Рис. 10.

На рис. 10 показан результат метода изометрического съема информации I, II, III и результат метода поиска *exit*. Оказалось, что оба метода можно объединить в одном алгоритме, который при некоторых начальных условиях ведет себя как изометрический I + III в других, как метод поиска ближайшего *min*, либо максимума IV и, наконец, в специальном случае как метод поиска заданного значения *U* сигнала.

Суть алгоритма состоит в следующем.

1. Начальные установки.
2. Задание координат центра обследования.
3. Определение направления перемещения центра обследования объекта.
4. Определение графа обследования.
5. Выяснение принадлежности точек графа обследования к заданной области, иначе - выход из программы.
6. Реализация графа и измерения λ объекта.
7. Определение координат точки, в которой отклонение замера от заданного значения λ_0 минимально.
8. Переход к пункту 2.

Центр обследования "С" задает следующий граф 8 возможных переходов:



Граф обследования строится на основании определения перехода. При этом система различает следующие элементарные обследования:

$$L_1: \leftarrow, L_2: \rightarrow, L_3: \vee, L_4: \wedge$$

Таким образом, зная направление перехода, получим следующие графы обследования:

$$C_1 \Rightarrow L_1 U L_3, C_2 \Rightarrow L_1, C_3 \Rightarrow L_1 U L_4,$$

$$C_4 \Rightarrow L_4, C_5 \Rightarrow L_2 U L_4, C_6 \Rightarrow L_2,$$

$$C_7 \Rightarrow L_2 U L_3, C_8 \Rightarrow L_3.$$

При обследовании возможны, по крайней мере, 4 способа задания X_0 , которые обуславливают 4 типа поведения системы.

- 1) Система ищет ближайший *min*, если $X_0 = 0$.
- 2) Система ищет ближайший *max*, если X_0 равно значению не меньшему *max* значения X_i .
- 3) Система проводит изометрические измерения, если X_0 равно значению X_c - центра графа обследования.
- 4) Система идет по пути, ближайшему к X_0 , и переходит на изометрические измерения, если $X_0 \neq X_c, X_0 \neq \text{ext}$

Работа с системой возможна, по крайней мере, в V вариантах:

- I. Контроль системы, отладка эксперимента по командам. Осуществляется централизованно, с пульта управления, покомандно.
- II. Исследование по отлаженным алгоритмам. Осуществляется путем ввода программы с перфокарты и пуска системы.
- III. Поисковые исследования с помощью операторного программирования. Возможен последовательный вызов специальных операторов с пульта. Рабочие ячейки операторов пересекаются определенным образом, благодаря которому практически исключается необходимость задания пересылок чисел.

В настоящее время имеется набор следующих операторов:

1. Печать числа в IO-коде Π .
2. Измерение с усреднением \tilde{Y} .
3. Установка монохроматора в определенное состояние M .
4. Перевод $2 \Rightarrow 10$ Π_2^0 .
5. Задание 4 графов обследования L_i .
6. Определение границ обследования (иначе "стоп").
7. Вычисление состояния $\lambda + \Delta$.
8. Переход к оператору "к" и т.п. Π

В качестве примера приведем следующий алгоритм;

$$\underbrace{(\lambda + \Delta), M, \Pi_2^0, \Pi, \tilde{Y}, \Pi_2^0, \Pi, \Gamma, \Pi}$$

- IV. Эксперимент с автоматизацией программирования с помощью "Днепр-I". В этом режиме программы составляются машиной "Днепр-I", чем достигается большая оперативность программирования.
- V. Эксперимент с параллельной работой "Днепр-I". Выполняется при необходимости сложных расчетов (обработка данных, планирование и т.п.).

Л и т е р а т у р а

1. Евреинов Э.В., Косарев Ю.Г., О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительных систем. Сб. трудов "Вычислительные системы", 1963, вып. 8.
2. Лискер И.С., Использование электронных вычислительных машин для комплексного исследования характеристик полупроводниковых материалов и управления научным экспериментом, сб. трудов "Вычислительные системы", 1963, вып. 8.
3. Карандеев К.Б., Измерительные информационные системы и автоматика. "Вестник АН СССР", 1961, № 10.
4. Карандеев К.Б., Измерения в автоматизации умственного труда. "Измерительная техника", 1962, № 3.
5. Карандеев К.Б., Розов И.А., О методологических проблемах автометрии. "Автометрия", 1967, № 3.
6. Евреинов Э.В., Косарев Ю.Г., О методике разработки вычислительных систем. Сб. трудов "Вычислительные системы", 1963, вып. 6.
7. Горубчик Г.П., Кирилук П.Г., Модель системы автоматизации научных экспериментов для проведения технологических исследований. Сб. трудов "Вычислительные системы", 1963, вып. 8.
8. Маталин Л.А., Чубаров С.И., Иванов А.А., Многоканальные анализаторы ядерной физики, изд-во "Атомиздат", 1967.
9. Ицкович Э.Л., Трахтенгерц Э.А., Алгоритмы централизованного контроля и управления производством. М. изд-во "Советское радио", 1967.
10. Юенко Е.Л., Малиновский Б.Н., Полищук Г.А., Ядренко Э.К., Никитин А.И., Управляющая машина широкого назначения "ДНІПРО" и программирующая программа к ней., К., изд-во "Наукова думка", 1964.
1. Эдвардс Д.В., Боуден К.Ф., Применение малой ЦВМ для сбора текущей информации. Экспресс информация "Вычислительная техника", 1966, № 32.
2. Лоскоутов В.И., Управляющие математические машины. М., изд-во "Машиностроение", 1967.

13. Детронзос., Система CIRCAL для построения электрических схем при непосредственной связи с цифровой вычислительной машиной. Экспресс информация "Вычислительная техника", 1967, № 34.
14. Грубов В.И., Ивахненко А.Г., Мандровский-Соколов Б.Ю., Промышленная кибернетика, Киев 1966.
15. Каган Б.И., Логическая организация вычислительной машины ВНИИ ЭМ-3 "Электричество", 1966, № 3.
16. Данильченко И.А., К вопросу о систематизации электронных цифровых вычислительных машин, сб. "Цифровая вычислительная техника и программирование", 1966, № 1.
17. Иванов И.Н., Кадашевич В.И., Многоходовая счетная система с выводом информации. Приборы и техника эксперимента, 1966, № 6.
18. Миллер Д.К., Тале И.А., Витол И.К., Гурдзиел П.Я., Научно-исследовательская система НИКС-2 для изучения физических явлений оптическими и электрическими методами в неизотермических условиях. Тезисы докладов XV совещания по люминесценции. Тбилиси 17 + 23 ноября 1966 г.
19. Иванов М.Н., Кадашевич В.И., Кондуров И.А., Измерительный центр для обработки физической информации. Препринт ФТИ, 032, Ленинград, 1967.
20. Управляющая и регулирующая ЭВМ 303-Р., Экспресс информация "Приборостроение за рубежом", 1966, № 20.
21. Электронная вычислительная машина B660tron - 300. Экспресс информация "Приборостроение за рубежом", 1967, № 2.
22. Новая вычислительная машина с распределением времени "Scientific control" SCC, Экспресс информация "Приборостроение за рубежом", 1967, № 6.
23. Дешевая вычислительная машина, работающая в реальном масштабе времени РДР-8. Экспресс информация "Приборостроение за рубежом", 1966, № 2.
24. Павлов В.В., Управляющие логические машины - новое средство автоматизации управления производственными процессами "Приборы и средства автоматизации", 1966, № 3.
25. Кошлов В.А., Силин В.Б., Некоторые вопросы построения логических универсальных машин, "Приборы и средства автоматизации", 1966, вып. 1.

26. Альтшуль С.Д., Буяков Б.Б., Универсальная логическая машина для управления производственными процессами. "Приборы и системы управления", 1967, № 6.
27. Павлов В.В., Логические устройства для автоматизации управления энергетическими установками. Сб. "Приборы и средства автоматизации", 1966, вып. 6.
28. Стогный А.А., Один вариант структуры цифровой машины для преобразования буквенной информации. "Проблемы кибернетики", 1963, вып. 10.
29. Ордынцев В.М., Пирамидальная информационная система для сбора данных от датчиков и передачи их в вычислительную машину удаленную от объекта. "Приборы и системы управления", 1968, № 1.
30. Балакирев В.С., Гамий В.А., Зиньковский Ю.Ф., Автоматизация сбора и обработки результатов сложных экспериментов с помощью цифровых вычислительных машин. "Приборы и системы управления", 1967, № 3.
31. Быков Ю.И., Иванов В.Н., Универсальная аналого-цифровая система оперативной обработки данных при исследовании объектов с помощью универсальных цифровых вычислительных машин. "Приборы и системы управления", 1967, № 7.
32. Диденко К.И., Марков Б.Ф., Розен Ю.В., Многоканальное устройство управляющих вычислительных машин с регуляторами. "Приборы и системы управления", 1968, № 1.
33. Клепиков Н.П., Соколов С.Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия, М., изд-во "Наука", 1964.
34. Налимов В.В., Чернова Н.А., Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., изд-во "Наука", 1965.
35. Принс М.Д., Графические методы связи человек-вычислительная машина при машинном проектировании. "Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике" (русский перевод), том 54, 1966, № 12.
36. Ломов Б.Ф., Человек в системах управления., М., изд-во "Знание", 1967.

37. Бойко Е.И., Динкин Н.М., Кибернетика и проблемы психологии. Сб. "Кибернетику на службу коммунизму", М., изд-во "Энергия", 1967.
38. Домов Е.Ф., Человек и техника, М., изд-во "Советское радио", 1966.
39. Блочная конструктория пультов оператора цифровой вычислительной машины. Экспресс информация "Вычислительная техника", 1967, № 45.

ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.

ВВЕДЕНИЕ.

Задача выбора оптимальных алгоритмов управления экспериментом и математической обработки измерительной информации (ИИ) является одной из важнейших задач при организации работы измерительных систем с управляюще-вычислительными машинами в контуре. Задача обработки ИИ от объекта относится к некорректным задачам математической физики и формулируется как задача определения возмущенного состояния системы по измерениям приборов, характеристики которых известны /14/. Всю математическую обработку ИИ можно разбить на два этапа. Первый - преобразование показаний приборов в информацию о воздействиях на объект и соответствующих им реакций объекта. На этом же этапе ИИ подвергается ряду дополнительных операций для упорядочения и улучшения ее качества. Второй этап - непосредственное вычисление конечных результатов задачи. Назовем первый этап первичной обработкой ИИ, второй - вторичной обработкой ИИ. Строгого разделения между этапами нет. В зависимости от целей задачи они могут перекрываться.

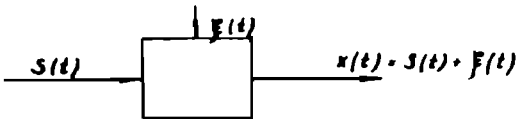
Поскольку измерения всегда проходят в условиях помех, то одной из главных задач первичной обработки становится сглаживание. Под сглаживанием будем понимать выделение полезного сигнала из его смеси с помехами. При сглаживании вручную применялся графический метод, заключающийся в том, что согласно нанесенным на график точкам измерений и априорной информации проводится гладкая кривая, рассматриваемая в дальнейших задачах как исходная. Применение управляюще-вычислительных машин выдвигает задачу разработки машинных методов сглаживания. В связи с этим в §§ 1, 2 этой главы будут рассмотрены вычислительные методы сглаживания и возможнос-

ти их реализации на машине. В §§3,4 будут рассмотрены некоторые теоретические вопросы и конкретные задачи, встречающиеся при вторичной обработке ИИ. В пятом параграфе будет дан пример конкретного алгоритма машинной обработки данных физического эксперимента по определению высоты и толщины барьера по формуле Шоттки-Ричардсона.

§ I. МЕТОДЫ СГЛАЖИВАНИЯ /27/.

I.I. Постановка задачи.

Пусть на выходе измерительной системы имеется последовательность величин, представляющая собой аддитивную смесь сигнала $S(t)$ с помехой $F(t)$:



Линейное сглаживание ИИ заключается в том, что необходимо подобрать линейный оператор V , чтобы $V[x(t)]$ доставляло возможно более точное приближение $S(t)$. За меру точности такого приближения принимаем математическое ожидание

$$M\{V[x(t)] - S(t)\}^2 \tag{1}$$

Главным источником помех являются различного рода случайные отклонения тех или иных физических величин от их средних. С точки зрения временного поведения помеха означает сигнал, мгновенная амплитуда которого непредсказуема. Нами будут рассматриваться помехи флуктуационные, т.е. представляющие собой непрерывный во времени процесс; аддитивные, результат взаимодействия которых с сигналом можно рассматривать как сложение. Рассматриваемые нами помехи описываются случайными стационарными последовательностями, т.е. их статистические характеристики не зависят от положения начала отсчета времени. Существует два метода исследования статистических характеристик случайных последовательностей /13/. Один из

них определяет статистические характеристики в результате усреднения при длительном наблюдении случайных последовательностей во времени. Второй метод связан с усреднением случайных последовательностей в каждый момент времени. При этом статистические характеристики определяются по совокупности значений последовательности в каждый момент времени.

Эквивалентность обоих методов усреднения базируется на свойстве эргодичности стационарных случайных последовательностей. Величина математического ожидания случайной последовательности $\xi(t)$ равна

$$M[\xi(t)] = \frac{\sum \xi(t_i)}{n} = \xi_{cp}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

величина дисперсии -

$$D[\xi(t)] = \frac{\sum [\xi(t_i) - \xi_{cp}]^2}{n-1} = \sigma^2, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

Корреляционная функция характеризует степень статистической связи соседних элементов случайной последовательности:

$$R[\xi(t_i), \xi(t_{i+k})] = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} \xi(t_i) \cdot \xi(t_{i+k}) - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi(t_i) \right)^2, \quad k = \overline{0, n-1} \quad (4)$$

Полной вероятностной характеристикой значения случайной последовательности $\xi(t)$ в любой момент времени t является закон распределения значений случайной последовательности $\xi(t)$ при данном t . Одномерный закон распределения задается одномерной плотностью вероятности $p(\xi)$. Распределение амплитуд флуктуационных помех наиболее часто описывается нормальным законом, плотность вероятности которого равна:

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \cdot e^{-\frac{(\xi - \xi_{cp})^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Согласно центральной предельной теореме распределение суммы большого числа независимых случайных воздействий сходится к нормальному закону [9]. Поэтому в реальных условиях, когда вид помех нам неизвестен, мы тем не менее можем пользоваться оценками, справедливыми для нормального распределения.

Н. Винер /10/ сформулировал и решил задачу о построении оптимального непрерывного фильтра с постоянными параметрами и конечной памятью для стационарного случайного сигнала, искаженного стационарной случайной помехой. В работе Л.А. Заде и Дж. Рагазини /11/, обобщающей задачу Винера, полезный сигнал состоит из неслучайного полинома и стационарной случайной составляющей. Развитие вычислительной техники привело к необходимости решать аналогичные задачи и для дискретных фильтров. П. Кованц /12/ рассмотрел обобщенный дискретный аналог задачи Заде - Рагазини. Однако в методах, разработанных в выше перечисленных работах, требуется задание вероятностных характеристик входных и выходных данных. Нами здесь будут рассмотрены численные методы сглаживания, не связанные с вероятностными характеристиками входных и выходных данных.

1.2. Сглаживание скользящим средним.

Простейшим линейным методом сглаживания является скользящее среднее. Пусть имеется последовательность измерений, представляющих собой аддитивную смесь полезного сигнала и помехи.

$$x(t_i) = S(t_i) + \xi(t_i) \quad i = \overline{1, N} \quad (6)$$

Под сглаженным значением сигнала будем понимать усредненный сигнал:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{2n+1} \cdot \sum_{\kappa} x(t_{i+\kappa}) \quad \kappa = \overline{-n, n} \quad (7)$$

Ошибка, полученная при усреднении равна:

$$e_x(t_i) = \tilde{x}(t_i) - S(t_i) = \frac{1}{2n+1} \cdot \sum_{\kappa} x(t_{i+\kappa}) - S(t_i), \quad \kappa = \overline{-n, n} \quad (8)$$

Вместо в выражении (8) $x(t_{i+\kappa})$ через (6) и внесем $S(t_i)$ под знак суммы:

$$e_x(t_i) = \frac{1}{2n+1} \sum_{\kappa} [S(t_{i+\kappa}) - S(t_i)] + \frac{1}{2n+1} \sum_{\kappa} \xi(t_{i+\kappa}), \quad \kappa = \overline{-n, n} \quad (9)$$

Первое слагаемое в этой сумме представляет собой динамическую составляющую суммарной ошибки, а второе - случайную составляющую. Т.к. случайная и динамическая составляющие ошиб-

ки не коррелированы, то дисперсия суммарной ошибки равна:

$$\sigma_z^2(t_i) = \sigma_a^2(t_i) + \sigma_g^2(t_i) \quad (10)$$

Дисперсия случайной ошибки равна:

$$\sigma_{ca}^2 = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{\kappa} \sum_j M[\xi(t_{i+\kappa}) \cdot \xi(t_{i,j})], \quad \kappa, j = \overline{-n, n} \quad (11)$$

Предположим, что помеха не коррелирована, дисперсия равна $M[\xi(t)] = 0$, тогда

$$M[\xi(t_{i+\kappa}) \cdot \xi(t_{i,j})] = R[\xi(t_{i+\kappa}) \cdot \xi(t_{i,j})] = \begin{cases} \sigma_{\xi}^2 & \kappa, j (=) \\ 0 & \kappa, j (\neq) \end{cases} \quad (12)$$

Получаем выражение для случайной составляющей ошибки:

$$\sigma_{ca}^2(t_i) = \frac{1}{2n+1} \sigma_{\xi}^2(t_i) \quad (13)$$

В общем случае, если помеха не коррелирована и ее дисперсия равна σ_{ξ}^2 , то дисперсия после сглаживания будет равна:

$$\sigma_{ca}^2 = \sigma_{\xi}^2 \sum_{\kappa} \omega_{\kappa}^2, \quad \kappa = \overline{-l, l} \quad (14)$$

где ω_{κ} - весовые коэффициенты в формуле сглаживания. Из (13) можно сделать вывод, что, чем больше n , тем меньше случайная ошибка. Однако мы должны учитывать, что сглаживание приводит не только к уменьшению случайной ошибки, но и к появлению динамической ошибки. Пренебрежение последней приводит к искажению полезного сигнала. Рассмотрим первое слагаемое в выражении (9), оно представляет собой динамическую составляющую суммарной ошибки. Согласно /1/ динамическая ошибка равна:

$$\sigma_g(t_i) = c_0 S(t_i) + c_1 S'(t_i) + \dots + c_{\tau} S^{(\tau)}(t_i)$$

где $c_{\tau} = \mu_{\tau} - a_{\tau}$, (15)

$$\mu_{\tau} = (-1)^{\tau} (\tau!)^{-1} \sum_{\kappa} \omega_{\kappa} \kappa^{\tau}, \quad \tau = \overline{0, l}, \quad \kappa = \overline{-l, l}$$

ω_{κ} - весовые коэффициенты в формуле сглаживания, l - степень многочлена, описывающего полезный сигнал. Коэффициенты a_{τ} при сглаживании по формуле (7) равны:

$$a_0 = 1, \quad a_{\tau} = 0, \quad \tau = \overline{1, l}$$

Предположим, что на интервале сглаживания полезный сигнал может описываться константой, линейной функцией или параболой.

В этом случае:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = \sum_{\kappa} \frac{1}{2^{n+1}} = 1, \\ \mu_1 = -\sum_{\kappa} \frac{\kappa}{2^{n+1}} = 0, \\ \mu_2 = 0.5 \sum_{\kappa} \frac{\kappa^2}{2^{n+1}} = \frac{n(n+1)}{6} \\ \kappa = -\overline{n, n} \end{array} \right. \quad (16)$$

соответственно:

$$c_0 = 0, c_1 = 0, c_2 = \frac{n(n+1)}{6}$$

Следовательно, если на интервале сглаживания полезный сигнал описывается константой или линейной функцией, то при сглаживании скользящей средней динамическая ошибка будет равна нулю. Если порядок полинома, описывающего полезный сигнал, выше I, то появляется динамическая ошибка, в случае полинома второго порядка она равна:

$$\sigma_g(t_i) = \frac{n(n+1)}{6} \cdot S^{(2)}(t_i) \quad (17)$$

Суммарная ошибка будет равна:

$$\sigma_{\Sigma}(t_i) = \frac{n(n+1)}{6} \cdot S^{(2)}(t_i) + \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}} \sigma_{\xi}(t_i) \quad (18)$$

Оценив вторую производную полезного сигнала на интервале сглаживания, при дискретных измерениях аналогом вторых производных являются вторые разности, можно определить n оптимальное. Для этого нужно продифференцировать (18) по n и приравнять нулю.

1.3. Метод наименьших квадратов в сглаживании.

Задача сглаживания методом наименьших квадратов совпадает с задачей обработки косвенных безусловных измерений [2]. Отличием от стандартного метода наименьших квадратов является то, что в сглаживании значения в данной точке участвуют ближайшие соседние точки, а не вся совокупность измерений. Пусть у нас имеется последовательность N измерений

$$x(t_i) = S(t_i) + \xi(t_i), \quad i = \overline{1, N} \quad (19)$$

где: $S(t)$ - полезный сигнал, описываемый полиномом
 $S(t_i) = \sum_j a_j t_i^j$, $j = \overline{0, r}$, $r < N$ (20)

Для сокращения записи введем следующие обозначения:

$$X_m = \begin{vmatrix} x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_m) \end{vmatrix}, \quad \tilde{A}_{r+1, r} = \begin{vmatrix} \tilde{a}_0 \\ \vdots \\ \tilde{a}_r \end{vmatrix}, \quad T_{n, r+1} = \begin{vmatrix} 1 & t_1 & \dots & t_1^r \\ 1 & t_2 & \dots & t_2^r \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & t_n & \dots & t_n^r \end{vmatrix} \quad (21)$$

$$\Xi = \begin{vmatrix} y(t_1) \\ \vdots \\ y(t_n) \end{vmatrix},$$

где: $\tilde{A}_{r+1, r}$ - матрица оценок коэффициентов (20), найденных по методу наименьших квадратов. Тогда уравнения (19) и (20) запишутся:

$$X = S + \Xi \quad (22)$$

$$S = T \tilde{A} \quad (23)$$

После подстановки (22) в (23) получим:

$$T \tilde{A} - X = \Xi \quad (24)$$

Так как Ξ - вектор случайных помех, то левая часть уравнения (24) есть запись произвольного случайного вектора; обозначим соответствующую ему матрицу через W

$$T \tilde{A} - X = W \quad (25)$$

Тогда идея метода наименьших квадратов заключается в том, чтобы выбрать матрицу \tilde{A} так, чтобы $W^T W = 0$, или, что равносильно условию /2/

$$T^T W = 0 \quad (26)$$

Умножая (25) слева на T^T , получим

$$T^T T \tilde{A} - T^T X = T^T W = 0 \quad (27)$$

(27) есть матричная запись системы нормальных уравнений. Вектор оценок \tilde{A} по методу наименьших квадратов однозначно находится из (27), так как матрица $B = T^T T$ неособенная. T есть определитель Вандермонда, он не равен нулю, если все точки t_i различны.

В настоящее время известен целый ряд вычислительных методов для решения системы нормальных уравнений /2-3/.

Наиболее широко распространен метод исключения Гаусса.

В качестве конкретного примера рассмотрим случай, когда

измеряемый процесс описывается на интервале сглаживания полиномом второй степени :

$$S(t_i) = a + bt_i + 0.5 ct_i^2 \quad i = \overline{1, N} \quad (28)$$

Система нормальных уравнений в этом случае будет иметь

$$\begin{aligned} \text{вид:} \quad a n + b \sum_i t_i + 0.5 c \sum_i t_i^2 &= \sum_i x_i \\ a \sum_i t_i + b \sum_i t_i^2 + 0.5 c \sum_i t_i^3 &= \sum_i x_i t_i \\ a \sum_i t_i^2 + b \sum_i t_i^3 + 0.5 c \sum_i t_i^4 &= \sum_i x_i t_i^2 \end{aligned} \quad (29)$$

Оцениваемые параметры равны :

$$\begin{aligned} a = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} \sum x_i & \sum t_i & \frac{1}{2} \sum t_i^2 \\ \sum x_i t_i & \sum t_i^2 & \frac{1}{2} \sum t_i^3 \\ \sum x_i t_i^2 & \sum t_i^3 & \frac{1}{2} \sum t_i^4 \end{vmatrix} & \quad c = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} n & \sum t_i & \frac{1}{2} \sum t_i^2 \\ \sum t_i & \sum t_i^2 & \frac{1}{2} \sum t_i^3 \\ \sum t_i^2 & \sum t_i^3 & \frac{1}{2} \sum t_i^4 \end{vmatrix} \\ b = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} n & \sum x_i & \frac{1}{2} \sum t_i^2 \\ \sum t_i & \sum x_i t_i & \frac{1}{2} \sum t_i^3 \\ \sum t_i^2 & \sum x_i t_i^2 & \frac{1}{2} \sum t_i^4 \end{vmatrix} & \quad D = \begin{vmatrix} n & \sum t_i & \sum t_i^2 \\ \sum t_i & \sum t_i^2 & \sum t_i^3 \\ \sum t_i^2 & \sum t_i^3 & \sum t_i^4 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (30)$$

Оценки довольно громоздки. Значительные упрощения можно получить, если измерения равноотстоящие: $t_i = (i-1)T_0$, где T_0 - шаг измерений.

В этом случае нормальные уравнения запишутся так:

$$\begin{aligned} a n + b T_0 \sum (i-1) + 0.5 c T_0^2 \sum (i-1)^2 &= \sum x_i, \\ a \sum (i-1) + b T_0 \sum (i-1)^2 + 0.5 c T_0^2 \sum (i-1)^3 &= \sum x_i (i-1), \\ a \sum (i-1)^2 + b T_0 \sum (i-1)^3 + 0.5 c T_0^2 \sum (i-1)^4 &= \sum x_i (i-1)^2, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (31)$$

Обозначим $b^* = b T_0$ и $c^* = c T_0^2$. Воспользуемся значениями сумм /17/.

$$\begin{aligned} \sum (i-1) &= \frac{n(n-1)}{2}, \quad \sum (i-1)^2 = \frac{n(n-1)(2n-1)}{6}, \\ \sum (i-1)^3 &= \frac{n^2(n-1)^2}{4}, \quad \sum (i-1)^4 = \frac{n(n-1)(2n-1)(3n^2+3n-1)}{30} \end{aligned} \quad (32)$$

Тогда, решая систему нормальных уравнений, получим следую-

щие оценки для a, b, c : $a = \sum_i \alpha_i x(t_i)$,

$$b = \sum_i \beta_i x(t_i), \quad c = \sum_i \gamma_i x(t_i), \quad i = \overline{1, n},$$

$$\alpha_i = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} [3(n+1)(n+2) - 2(2n+7)i + 10i^2],$$

$$\beta_i = \frac{-6}{T_0 n(n^2-4)(n^2-4)} [(n+1)(n+2)(6n-7) - 2i(16n^2-19) + 30i^2(n-1)], \quad (33)$$

$$\gamma_i = \frac{60}{T_0^2 n(n^2-4)(n^2-4)} [(n+1)(n+2) - 6i(n+1) + 6i^2]$$

Сглаженное значение $\tilde{X}(t_*)$ будет равно

$$\tilde{X}(t_*) = \sum_i \eta_i x(t_i), \quad i = \overline{1, n},$$

$$\eta_i = \frac{3}{n} - \frac{6(4n+3)}{n(n+1)(n+2)} i + \frac{30}{n(n+1)(n+2)} i^2 \quad (34)$$

Для дальнейшего упрощения формулы (34) перенесем вершину проводимой параболы в сглаживаемую точку. Для простоты, пусть мы должны провести параболу через $(2n+1)$ измерение. Строим параболу вида:

$$S(t_i) = a + b(t_n - t_i) + 0.5c(t_n - t_i)^2, \quad \kappa = \overline{i-n, i+n} \quad (35)$$

Тогда сглаженное значение в точке t_i будет равно a .

Оценим этот параметр. Нормальные уравнения для получения a будут иметь вид: $(2n+1)a + 0.5c T_0^2 \sum_j j^2 = \sum_j x_j$

$$a \sum_j j^2 + 0.5c T_0^2 \sum_j j^4 = \sum_j j^2 x_j \quad (36)$$

Здѣсь через j обозначено $(\kappa - i)$ Сглаженное значение будет равно

$$\bar{x}(t_i) = \sum_j \eta_j x(t_{i+j}), \quad j = \overline{-n, n} \quad (37)$$

где
$$\eta_j = \frac{3(5n^2 + 3n - 1 - 5j^2)}{(2n-1)(2n+1)(2n+3)}$$

Пример. Если взять $n = 2$ то получим сглаживание по 5 точкам:

$$\tilde{x}(t_i) = \frac{1}{35} [-3x(t_{i-2}) + 12x(t_{i-1}) + 17x(t_i) + 12x(t_{i+1}) + (-3)x(t_{i+2})] \quad (38)$$

Формула (38) представляет метод сглаживания известный в литературе /7/ как метод четвертых разностей. В /3/ вычислены расчетные формулы для парабол от второй до пятой степени для $n = 2, 3, \dots, 10$.

Так как дисперсия случайной помехи после сглаживания (в предположении, что помеха некоррелирована) равна:

$$\sigma_{сг}^2 = \sigma_{\xi}^2 \sum_i \eta_i^2$$

то при сглаживании по формуле (37) случайная среднеквадратичная ошибка будет равна:

$$\sigma_{сг}^2 = \sigma_{\xi}^2 \frac{3(3n^2 + 3n - 1)(4n^2 + 4n - 3)}{(2n + 1)(2n - 1)^2(2n + 3)^2} \quad (39)$$

Известны различные модификации метода наименьших квадратов, улучшающих качество сглаживания. Так, в методе сглаживания Родса /8/, при построении полинома на интервале сглаживания, на него накладываются дополнительные условия касания с полиномом, построенным на предыдущем интервале сглаживания. При этом, если через $(2n+1)$ точку проведен полином

$$S(t_i) = a_0 + a_1 t_i + \dots + a_n t_i^n$$

коэффициенты которого определяются из (27), то через следующие $(2n+1)$ точки проводится полином

$$S'(t_i) = b_0 + b_1 t_i + \dots + b_n t_i^n$$

коэффициенты которого b_1, \dots, b_n находятся из уравнений, аналогичных уравнением для определения a_0, \dots, a_n ; а b_0, b_1 определяются из условия касания этого полинома с предыдущим

$$b_0 = a_0 + a_1 + \dots + a_n, \quad b_1 = a_1 + 2a_2 + \dots + n a_n$$

Точность сглаженных значений повышается, если применять итерационное сглаживание ($(n+1)$ -е сглаженное значение получается по $(n-1)$ предыдущим сглаженным значениям и n -ому искаженному). Такое итерационное сглаживание реализуется с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов

1.4. Метод экспоненциального сглаживания.

Как мы видели, в методе скользящей средней весовые коэффициенты равнялись $\frac{1}{2n+1}$ для $k=1, 2, \dots, n$ и нулю для $k > 2n+1$. Другие методы с иными весовыми схемами тоже вероятны. R. G. Brown предлагает метод экспоненциального сглаживания /4/, в котором весовые коэффициенты убывают по экспоненциальному закону.

$$S_t(x) = \alpha \sum_{k=0}^t (1-\alpha)^k x_{t-k} + (1-\alpha)^t x_0 \quad (40)$$

S_t - назовем оператором экспоненциального сглаживания,

α - произвольная константа: $0 \leq \alpha \leq 1$. Если $\alpha = 1$, то сглаживание производиться не будет, при $\alpha = 0$ сглаженное значение в точке t будет равняться сглаженному значению в предыдущей точке $(t-1)$. Введем обозначение $\beta = 1 - \alpha$. Покажем, что экспоненциальное сглаживание дает несмещенную оценку, т.е.:

$$M[S_t(x)] = \alpha \sum_{k=0}^t \beta^k M[x_{t-k}] = M[x_t] \sum_{k=0}^t \alpha \beta^k = M[x_t] \quad (41)$$

Дисперсия случайной ошибки, если сглаживание проводилось по формуле (40), будет равна

$$\sigma_{сл}^2 = \frac{\alpha}{2 - \alpha} - \sigma_x^2 \quad (42)$$

Динамическая ошибка в этом случае будет равна "0".

$$\alpha_0 = 1, \sigma_0 = 0, \mu_0 = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha \beta^j = \frac{\alpha}{1-\beta} = 1 \quad (43)$$

Для определения формул экспоненциального сглаживания процессов, описываемых кривыми более высоких порядков, чем константа, введем понятие оператора сглаживания n -ого порядка.

$$S_t^n(x) = \alpha S_t^{n-1}(x) + (1-\alpha) S_{t-1}^n(x) \quad (44)$$

Через несглаженное значение $x(t_i)$ n -кратный оператор экспоненциального сглаживания выражается следующим образом:

$$S_t^n(x) = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\alpha^n \beta^j (n-1+j)!}{j! (n-1)!} x_{t-j} \quad (45)$$

Теорема 1./5/

Если $X_{t+i} = a_t^0 + a_t^1 i + a_t^2 i^2 + \dots + a_t^{n-1} i^{n-1} + a_t^n i^n$, то оценка коэффициентов a_t^0, \dots, a_t^n может быть получена как линейная комбинация величин, полученных в результате применения оператора экспоненциального сглаживания $(n+1)$ - порядка к X_t . Непосредственный способ получения коэффициентов a_t^n через экспоненциально сглаженные величины дает нам теорема 2.

Теорема 2./6/

Для любой последовательности наблюдений полином P (степени n), полученный многократным экспоненциальным сглаживанием, минимизирует взвешенный критерий среднеквадратичной ошибки

$$\alpha \sum_j \beta^j (x_{t-j} - P_{t-j})^2 = \min, \quad j = \overline{0, \infty} \quad (46)$$

Пусть на интервале сглаживания процесс описывается параболой

$$x_{t-j} = a_t^0 - a_t^1 j + 0.5 a_t^2 j^2 \quad (47)$$

Ее коэффициенты определяем из условия, что

$$\alpha \sum_j \beta^j (x_{t-j} - a_t^0 + a_t^1 j - 0.5 a_t^2 j^2)^2 = \min, \quad j = \overline{0, \infty} \quad (48)$$

Составляем нормальные уравнения

$$\begin{aligned} a_t^0 \alpha \sum_j \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^2 \beta^j &= \alpha \sum_j \beta^j x_{t-j} \\ a_t^0 \alpha \sum_j j \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j^2 \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^3 \beta^j &= \alpha \sum_j \beta^j j x_{t-j} \\ a_t^0 \alpha \sum_j j^2 \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j^3 \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^4 \beta^j &= \alpha \sum_j \beta^j j^2 x_{t-j} \end{aligned} \quad (49)$$

Принимая во внимание /17/, что

$$\begin{aligned} \sum_j \beta^j &= \frac{1}{1-\beta}, \quad \sum_j j \beta^j = \frac{\beta}{(1-\beta)^2}, \quad \sum_j j^2 \beta^j = \frac{\beta(1+\beta)}{(1-\beta)^3}, \\ \sum_j j^3 \beta^j &= \frac{\beta(1+4\beta+\beta^2)}{(1-\beta)^4}, \quad \sum_j j^4 \beta^j = \frac{\beta(1+11\beta+11\beta^2+\beta^3)}{(1-\beta)^5}, \quad j = \overline{0, \infty} \end{aligned} \quad (50)$$

в (40), (45), получим следующие выражения для коэффициентов

$$\begin{aligned} a_t^0 &= 3 S_t(x) - 3 S_t^2(x) + S_t^3(x), \\ a_t^1 &= \frac{\alpha}{2\beta} [(6-5\alpha) S_t(x) - 2(5-4\alpha) S_t^2(x) + (4-3\alpha) S_t^3(x)], \\ a_t^2 &= \frac{\alpha^2}{\beta^2} [S_t(x) - 2 S_t^2(x) + S_t^3(x)] \end{aligned} \quad (51)$$

Сглаженное значение в точке t будет равно a_t^0 , или

$$\tilde{x}(t) = 3S_t(x) - 3S_t^2(x) - S_t^3(x) \quad (52)$$

При сглаживании по формулам (40) или (52) требуется знать начальные сглаженные значения $S_0(x), S_0^2(x), S_0^3(x)$. Можно положить $S_0(x) = S_0^2(x) = S_0^3(x)$ равными средней, вычисленной по n предшествующим значениям. Если предшествующих значений нет, то необходимо предсказать значение средней другим способом. В худшем случае можно положить начальные сглаженные значения равными несглаженным начальным значениям. Случайная составляющая ошибки при некоррелированных помехах вычисляется по формуле (14). Динамическая составляющая ошибки будет равна нулю, если правильно выбрана гипотеза о порядке полинома, описывающего процесс на интервале сглаживания.

1.5. Сглаживание рядами Фурье.

Предидущие методы сглаживания можно назвать "локальными" в том смысле, что для получения одной сглаженной точки они использовали лишь ее окрестные точки. Сглаживание рядами Фурье проводится по всей совокупности измерений. Пусть мы имеем последовательность измерений полезного сигнала с наложенными на него помехами

$$x(t_i) = S(t_i) + F(t_i), \quad i = \overline{1, N} \quad (53)$$

Рассмотрим спектр амплитуд гармоник данной последовательности. Первые n гармоник будут иметь тенденцию уменьшаться, последующие начинают хаотично меняться как по знаку, так и по величине. Так как амплитуда сигнала меняется медленно, по сравнению с изменением амплитуды помехи, то первые гармоники ряда Фурье будут соответствовать полезному сигналу, "хвост" будет представлять высокочастотную часть помехи. Резкой границы между частями нет.

Алгоритм разложения в ряд Фурье предлагается следующий [7]. Вычитаем из $x(t_i)$ специально подобранный полином

$$y(t_i) = x(t_i) - (a + bt_i), \quad (54)$$

где коэффициенты a и b определяются из условий:

$$y(t_0) = 0, \quad y(t_N) = 0,$$

где $t_0 = 0$, в противном случае последовательность необходимо сдвинуть. Затем продолжим $y(t_i)$ для отрицательных t как нечетную функцию

$$y(-t_i) = -y(t_i)$$

Если такую функцию теперь периодически продолжить с периодом $2t_N$, то ее разложение в ряд Фурье будет иметь вид:

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{\kappa} b_{\kappa} \sin \kappa \frac{\pi}{t_N} t_i, \quad \kappa = \overline{1, \infty} \quad (55)$$

где:

$$b_{\kappa} = \frac{2}{N} \sum_j y(t_{\kappa j}) \cdot \sin j \frac{\pi}{t_N} t_{\kappa}, \quad j = \overline{1, N}$$

Для определения m , на котором следует оборвать ряд, можно воспользоваться оценкой среднеквадратичной амплитуды помехи

$$\hat{\sigma}_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum b_{\kappa}^2}{N-m}, \quad \kappa = \overline{m+1, N} \quad (56)$$

Отсюда получаем приближенную границу обрыва "хвоста". Ошибка оценок амплитуд полезного сигнала приближенно равна среднеквадратичной амплитуде "хвоста". Для достаточно хорошей оценки \hat{b} нужно брать $N-m \geq 5$. Сглаженное значение полезного сигнала будет равно:

$$\tilde{X}(t_i) = a + bt_i + \sum_{\kappa} b_{\kappa} \sin \kappa \frac{\pi}{t_N} t_i, \quad \kappa = \overline{1, m} \quad (57)$$

Ошибка сглаживания:

$$\Delta \tilde{X}(t_i) = \sum_{\kappa} \frac{\hat{b}}{b_{\kappa}} \sin \frac{\pi \kappa}{t_N} t_i \leq \sum_{\kappa} \left| \frac{\hat{b}}{b_{\kappa}} \right|, \quad \kappa = \overline{1, m} \quad (58)$$

§ 2. ОЦЕНКА МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ.

Выше нами были рассмотрены наиболее употребительные методы сглаживания. Все они линейны, дискретны, инвариантны относительно времени. Для получения эффекта сглаживания необходимо, чтобы отношение среднеквадратичной ошибки после сглаживания было меньше единицы. Ранее было показано, что

ошибка сглаживания состоит из двух составляющих: случайной и динамической. На рис. 1 и 2 показаны зависимости отношений среднеквадратичных ошибок до сглаживания и после для случайной составляющей ошибки с возрастанием n и α .

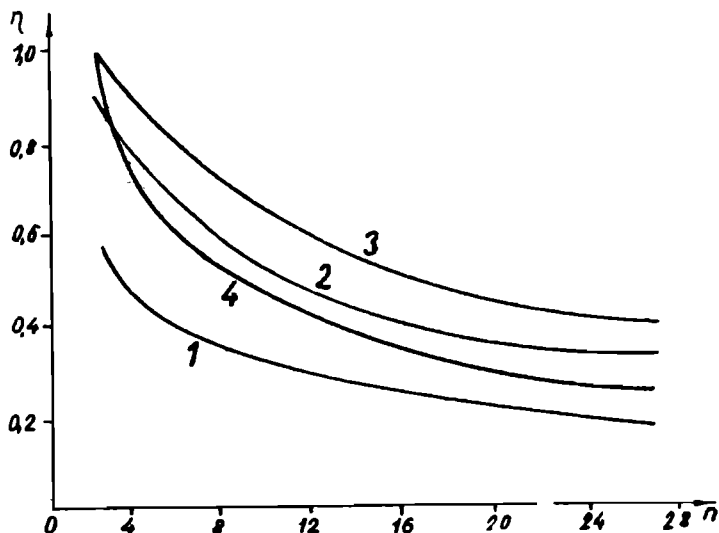


Рис. 1.

Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют сглаживанию, по формулам (7), (28), (34), (37).

Из рис. 1 видно, что с возрастанием n случайная составляющая ошибки уменьшается.

На рис. 2 зависимость обратная, это естественно, ибо по определению константа α точно не равна, но имеет смысл $(2n+1)^{-1}$ в методе скользящей средней. Из обоих рисунков видно, что чем большее число точек участвует в сглаживании, тем лучше получаемый результат. Но с другой стороны для динамической составляющей ошибки наблюдается обратная зависимость, поэтому необходимо пойти на компромисс. Для метода скользящей средней динамическая составляющая ошибки равна нулю, если процесс описывается полиномом нулевой или первой степени. Если степень выше 1, то динамическая составляющая ошибки обратно возрастает с увеличением n . В этих случаях метод сколь-

заящей средней применять не рекомендуется. Иначе после сглаживания получится искаженный полезный сигнал.

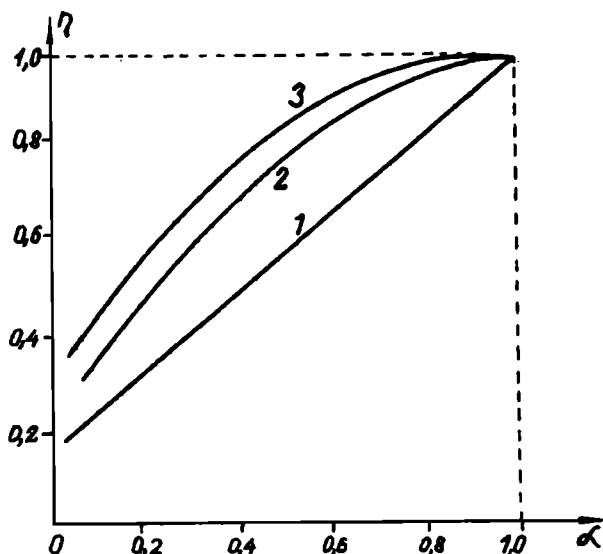


Рис. 2.

1, 3 - соответствует сглаживанию по формулам (30), (51).

2 - по формуле: $\tilde{x}_t = 2S_t(x) - S_t^2(x)$

При сглаживании по формулам, полученным с помощью метода наименьших квадратов, динамическая ошибка равна нулю, при условии, что гипотеза о степени полинома, описывающего процесс, оказалась верной. Для ее проверки можно воспользоваться критерием Фишера /15/. Если в процессе измерений нами получена последовательность значений $x(t_i)$, представляемых в виде:

$$x(t_i) = a_0 + a_1 t_i + \dots + a_n t_i^n + \eta(t_i), \quad i = \overline{1, n}$$

где η неизвестно, то с помощью критерия Фишера проверяется значимость коэффициентов a_i . Метод экспоненциального сглаживания наиболее универсален. С одной стороны он совмещает в себе метод скользящей средней, который, как видно из рис.1 дает наибольшее уменьшение случайной ошибки. Одинаковый результат получится /4/, если выбрать $\alpha = 2/(n+1)$.

где n - число точек усреднения.

С другой стороны формулы экспоненциального сглаживания получены из видоизмененного метода наименьших квадратов, и, если гипотеза о степени полинома, описывающего процесс была выбрана правильно, динамическая составляющая ошибки сглаживания по ним будет равна нулю. Машинный эксперимент показал, что при сглаживании процесса, описываемого константой, наиболее точный и стабильный результат получается при малых значениях $\alpha = 0,01 + 0,2$. При сглаживании процессов, описываемых полиномами более высоких порядков, α выбирается из условия/4/:

$$(1 - \alpha_k)^k = 1 - \alpha_k$$

Т.е. если бы процесс описывался константой, равной постоянному члену полинома, то результаты сглаживания относительно этого члена в обоих случаях были бы одинаковы.

Все рассмотренные нами методы можно назвать "локальными", так как сглаживание проводится не по всей совокупности точек. В этом смысле сглаживание рядом Фурье можно считать методом сглаживания в "целом". Его применение исключено, если требуется сглаживать ИИ по мере ее поступления. Машинный эксперимент показал, что этот метод дает хороший результат, если в частотных спектрах сигнала и помех наблюдается резкое отличие. В противном случае, в силу неопределенности места обрыва "хвоста", наблюдается искажение полезного сигнала.

Необходимо также отметить, что все методы, кроме сглаживания по формуле (50), применимы только к равноотстоящим измерениям. Далее, в /16/ показано, что, в силу их линейности, оптимальное сглаживание получается только для помех гауссового распределения. Для негауссовых помех ведутся поиски других методов. В /19/ предложен нелинейный метод сглаживания помех, ограниченных по амплитуде и имеющих симметричное распределение.

§ 3. АНАЛИЗ ОДНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КРИВОЙ.

Обработка результатов эксперимента, представленных в виде одной кривой, может преследовать различные цели:

- а) в самом простом случае целью является проведение оптимальной кривой между точками, для получения наиболее достоверной графической зависимости или получения эмпирической формулы для быстрого воспроизведения данной зависимости в ЭВМ.
- б) Переменные величины, полученные в результате эксперимента, связаны формулой, в правильности которой нет сомнений, но некоторые параметры меняются в зависимости от материала образца, и целью эксперимента является определение численных величин параметров.
- в) Переменные связаны гипотетической зависимостью, полученной методами теоретической физики и целью математической обработки является получение подтверждения или опровержения данной гипотезы. Необходимо отметить, что только в исключительных случаях подобное решение может быть вынесено после обработки одной экспериментальной кривой.

Несколько слов о виде получаемой кривой.

Обычно экспериментальная кривая задается в виде таблиц аргумента и функции, содержащих n точек (рис. 3).

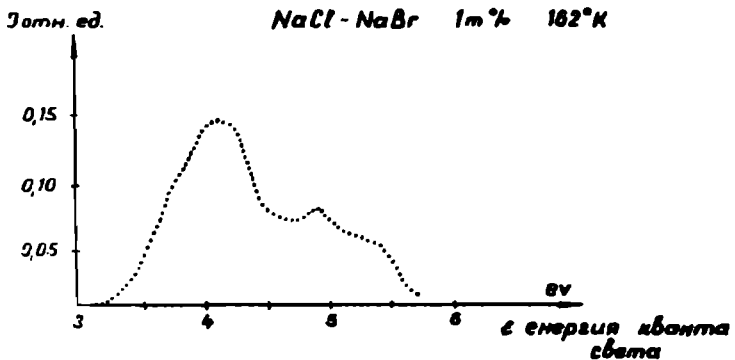


Рис. 3.

В некоторых случаях целесообразно произвести многократные измерения в каждой точке (выборка объема τ_i), где τ_i может меняться от точки к точке (см. Гл. I § 3.4). В таком случае каждая точка задается средним группы и дисперсией среднего группы /22/. В случае неравноточных измерений это обеспечивает введение статистически обоснованных весов точек для приведения результатов измерений к равноточным. Однако, веса могут быть введены в результате определения погрешностей измерительных приборов от точки к точке.

Согласно /22/, задание кривой средними групп и дисперсиями средних обеспечивает возможность получения двух статистически независимых оценок одной и той же величины - генеральной дисперсии, сравнение которых дает ценную информацию о правильности формулы - гипотезы. Кроме того, в таком случае возможно предварительное планирование точности эксперимента. Обозначим результат одного элементарного измерения через y_i :

$$y_i = \eta(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m), \quad i = \overline{1, n}$$

Обычно число измеренных точек $n \gg m$, где m - число вводимых параметров.

Если взять из множества полученных результатов выборку объема m и решить систему уравнений

$$y_i = \eta(a_1, a_2, \dots, a_m, x_i), \quad i = \overline{1, m}$$

где a_1, \dots, a_m являются оценками параметров a_1, \dots, a_m , то в зависимости от того, из каких элементов составлена выборка, значения a_1, \dots, a_m получатся разными, в некоторых случаях решений может не существовать ввиду ошибочности точек, даже, если гипотеза правильна. В целом же, при $n > m$ множество всех измерений представляет собой переопределенную систему уравнений относительно неизвестных a_1, \dots, a_m .

Независимо от количества экспериментальных данных нельзя найти точные значения параметров a_1, \dots, a_m , /22/, /23/; статистическая обработка позволяет определить только оценки параметров a_1, \dots, a_m и в некоторых случаях дисперсии оценок $b_{a_1}, b_{a_2}, \dots, b_{a_m}$, что особенно важно.

Согласно /22/, проведение кривых через экспериментальные точки сводится к способу наименьших квадратов (регрессионному анализу), который является частным случаем метода максимума правдоподобия, когда наблюдения распределены нормально и можно считать, что при гипотезе

$$y = \eta(x, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$$

ошибки содержатся только в результатах измерения величины y , но величина x измерена точно. Во многих случаях такое предположение выполняется только приближенно.

Часто неизвестные параметры входят в гипотетическую зависимость линейно, например,

$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x + \dots + \alpha_m x^{m-1}$$

Определение величин оценок параметров

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$$

в этом случае производится решением системы нормальных уравнений, получаемой из условия минимума квадратичной формы

$$M = \sum_{i=1}^n \omega_i \{y_i - \eta(x_i, \alpha_1, \dots, \alpha_m)\}^2, \\ \frac{\partial M}{\partial \alpha_j} = 0, \quad j = \overline{1, m}$$

Оценки параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ являются линейными функциями от случайных ошибок; при независимости ошибок измерений в отдельных точках можно определить дисперсии для линейной функции от независимых величин.

Дисперсионная матрица /22/ определяется через обратную матрицу системы нормальных уравнений и генеральную дисперсию σ^2 , для которой можно получить оценку S_2^2 от разброса экспериментальных точек относительно проведенной кривой и оценку S_1^2 от разброса экспериментальных точек относительно средних групп (если произведены многократные измерения в каждой точке). Именно необходимость определения оценок дисперсий параметров требует линейную гипотезу.

В ряде случаев гипотетическую зависимость можно привести к линейному виду заменой переменных, хотя это грозит опасностью, что относительно новых переменных не будут выполнены условия нормальности.

Например: а) гипотеза $y = \alpha e^{-\frac{t}{\tau}}$, необходимо определить α и τ , причем в результате эксперимента t ; измерены точно, а y : подвержены случайным ошибкам и распределены нормально. Переходом к

$$\ln y = \ln \alpha - \frac{1}{\tau} t$$

переменная $\ln y$ получается нераспределенной нормально. Однако небольшие отклонения от нормальности несущественны.

б) Вместо гипотезы:

$$t - t_0 = \frac{1}{\omega_0} \left(e^{\frac{\epsilon}{\kappa T_0}} - e^{\frac{\epsilon}{\kappa T}} \right)$$

при измеренной зависимости $t - t_0 = f(T)$,

для обработки удобно использовать приведенную линейному виду зависимость

$$\ln \left(\frac{d(t-t_0)}{d(1/\kappa T)} \right) = \ln \epsilon - \ln \omega_0 + \epsilon \frac{1}{\kappa T},$$

$$\ln \left(-\frac{d(t-t_0)}{d(1/\kappa T)} \right) = \varphi \left(\frac{1}{\kappa T} \right)$$

Ясно, что в данном случае также неизбежны отклонения от нормальности, но определение оценок параметров ϵ и ω_0 по преобразованной формуле значительно проще, кроме того, можно получить оценки дисперсий параметров величин ϵ и $(\ln \epsilon - \ln \omega_0)$, а затем определить дисперсию параметра ω_0 .

В случае, когда целью статистической обработки является получение решения о правильности сложной гипотезы, измеренную зависимость можно аппроксимировать конечным числом ортогональных функций, определяя оценки коэффициентов с которыми каждая из функций представлена в разложении. Согласно /22/, определение коэффициентов не отличается от определения параметров в случае линейной гипотезы. Для сравнения теоретическую кривую разлагают по той же системе функций и сравнивают все коэффициенты α_k с соответствующими оценками α_k с помощью критерия сравнения генеральных средних.

При аппроксимации ортогональными полиномами возможно определение необходимого числа последних m_0 , в таком случае расчет должен предусматривать разложение по переменной m в ходе расчета. Поведение оценки дисперсии (S_{ϵ}), характеризующей разброс экспериментальных точек относительно

кривой регрессии, позволяет оценить количество функций m , достаточное для удовлетворительного описания изучаемой зависимости. Разложение по ортогональной системе функций применяется также, если целью обработки является только сглаживание данных. Во многих случаях, однако, невозможно провести преобразования, приводящие к новым параметрам, относительно которых гипотеза является линейной.

От аппроксимации ортогональными полиномами также приходится отказаться, если исследуемая зависимость характеризуется многими пиками.

При нелинейной гипотезе $\eta(\alpha, x)$ оценками параметров α_k считаются любые значения α_k , которые удовлетворяют условиям:

1) квадратичная форма

$$M(\alpha_k) = \sum_i \omega_i [y_i - \eta(\alpha_k, x_i)]^2, \quad i = \overline{1, n}$$

достигает локального минимума,

2) минимум не является вырожденным,

3) кривая $\eta(\alpha_k, x)$ совместна с экспериментальными данными.

Определение оценок параметров в данном случае представляет вычислительную задачу, решаемую методами минимизации - скорейшего спуска, методом оврагов, методом квадратичной минимизации. В данном случае значительно усложняется определение дисперсий параметров, согласно /22/, дисперсию можно подсчитать лишь приближенно в точках локального минимума M , в случае, когда размеры области в направлении данного параметра, в которой гипотеза $\eta(\alpha, x)$ приблизительно линейна относительно данного параметра, больше величины дисперсии данного параметра.

Кратко рассмотрим способы минимизации квадратичной формы

$$M(\alpha) = \sum_i \omega_i (y_i - \eta(\alpha, x_i))^2, \quad i = \overline{1, n}$$

Перед началом минимизации необходимо задать исходное приближение для всех уточняемых параметров, причем расчет исходного приближения весьма сложен, если отдельные параметры дублируют друг друга (вливают на одни и те же участки кривой сходным образом).

В некоторых случаях для этого достаточно выбрать из экспериментальных данных столько точек, сколько параметров содержит гипотеза и решить систему уравнений

$$y_i = \gamma(a_1, a_2, \dots, a_m, x_i), \quad i = \overline{1, m}$$

причем точки должны быть примерно одного разброса в пределах кривой.

Если экспериментальная кривая имеет вид явно выделяющихся пиков, определение параметров нулевого приближения не является трудным. В особо сложных случаях минимизацию следует проводить многократно из разных начальных приближений, примерно одинаково распределенных по области возможных значений.

При использовании метода градиента и исходных значениях параметров $\{a_{10}, a_{20}, \dots, a_{m0}\}$ численно или аналитически рассчитывается

$$\overrightarrow{\text{grad}} M|_{a_0} = \left\{ \frac{\partial M}{\partial a_1}, \frac{\partial M}{\partial a_2}, \dots, \frac{\partial M}{\partial a_m} \right\}$$

и несложным поиском определяется такое значение коэффициента K_0 , чтобы при параметрах

$$\bar{a} = \left\{ a_{10} + \frac{\partial M}{\partial a_1} \Big|_{a_0} \cdot K_0, \dots, a_{m0} + \frac{\partial M}{\partial a_m} \Big|_{a_0} \cdot K_0 \right\}$$

получился локальный минимум M , полученные значения параметров будут первым приближением, и при этих значениях параметров снова определяется $\overrightarrow{\text{grad}} M|_{\bar{a}}$ и число K_1 , приводящее к локальному минимуму M и т.д.

Если параметры сильно дублируют друг друга, метод градиента сходится очень медленно. В таком случае результаты, полученные после несколько шагов минимизации методом градиента, следует рассматривать как исходное приближение для более точного метода квадратичной минимизации.

Сущность метода квадратичной минимизации заключается в следующем [24]. Метод применим, если исходное приближение настолько точно, что справедливо разложение квадратичной формы M в ряд по приращениям параметров в окрестности точки минимума.

$$M_a = M_0 + \sum_i \frac{\partial M}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \frac{\partial^2 M}{\partial a_i \partial a_j} \Delta a_i \Delta a_j + \dots$$

В точке минимума $M = M_0$ и $\frac{\partial M}{\partial a_i} = 0$

В исходной точке это несправедливо, но требование $M_n = M_0$ приводит к системе уравнений, решениями которой являются такие значения приращений параметров, которые приводят к точке, более близкой к минимуму.

$$\frac{\partial M}{\partial a_i} + \sum_j \frac{\partial^2 M}{\partial a_i \partial a_j} \Delta a_j = a_j = 0, \quad (i, j) = \overline{1, m}$$

В развернутом виде получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 M}{\partial a_1^2} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial^2 M}{\partial a_1 \partial a_m} \Delta a_m = - \frac{\partial M}{\partial a_1}, \\ \frac{\partial^2 M}{\partial a_m \partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial^2 M}{\partial a_m^2} \Delta a_m = - \frac{\partial M}{\partial a_m} \end{cases}$$

Полученные приращения параметров добавляются к исходным значениям и в полученной точке расчет повторяется до получения минимума M , или пока приращения не станут меньше заданной величины. Метод сходится много быстрее метода градиента, но требует хорошего исходного приближения.

Комбинация их может дать хорошие результаты при численных расчетах минимизации M , однако, подпрограмма, включающая оба метода (и переход от одного к другому), пригодная для любых нелинейных функционалов, получается громоздкой.

3.1. Разложение сложных кривых на составляющие типа гауссовых.

Во многих случаях экспериментальные кривые имеют вид взаимно перекрывающихся колоколообразных полос, допускающих аппроксимацию функциями типа гауссовых для элементарных составляющих /24-26, 28/. К таким результатам относятся измерения интенсивности люминесценции в зависимости от энергии квантов света (или зависимость оптического поглощения от энергии квантов света), измерение числа рассеянных рентгеновских квантов от угла и другие.

Во всех этих случаях появляется необходимость в быстром и точном получении возможных составляющих спектра. Заключение о том, что для данного образца характерны элементарные полосы, полученные в результате разложения, может быть сделано после обработки и сравнения нескольких кривых. Экспериментальные кривые обычно имеют следующий вид (рис. 4).

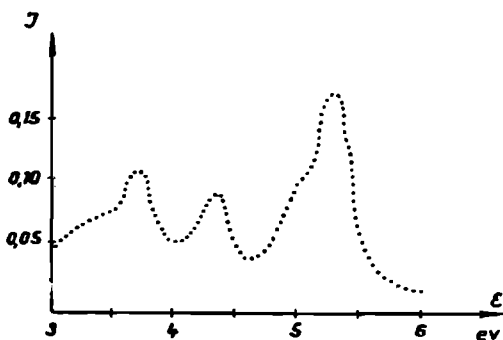


Рис. 4.

Программа анализа не требует никаких предварительных данных о количестве отдельных пиков или их параметрах. Кривая задается в виде таблиц значений аргумента и функции, содержащих не более 63 точек. Аргументы должны быть расположены в возрастающем порядке, признак конца таблицы — нулевое значение после последнего аргумента и функции.

Единственное предположение, которое необходимо сделать до начала анализа — предположение об отсутствии или наличии скрытых компонент. На рис. 4 приведена типичная кривая, имеющая 3 явно выраженных и 2 скрытых компонента.

Если предполагается, что скрытые компоненты отсутствуют (это предположение вводится в машину нажатием клавиши, положение которой опрашивается программой во время вычислений), программа производит просмотр заданных таблиц, определяет число составляющих и их параметры в нулевом приближении.

Экспериментальная кривая аппроксимируется по формуле

$$y = \sum_k \alpha_k \exp\left[-\frac{(\kappa - \varepsilon_k)^2}{2\sigma_k^2}\right], \quad \kappa = \overline{1, N}.$$

Далее минимизируется квадратичная форма

$$M = \sum_i \left\{ y_i - \sum_{\kappa} a_{\kappa} \exp\left[-\frac{(x_i - \varepsilon_{\kappa})^2}{2\sigma_{\kappa}^2}\right] \right\}^2, \quad i = \overline{1, n}, \quad \kappa = \overline{1, N}$$

методом градиента. Расчет производных запрограммирован по их аналитическим выражениям. Во время расчета, по желанию оператора, можно вызвать на экран осциллоскопа заданную кривую, все выделенные составляющие и кривую невязок. Размер рисунка - 16x16см. В случае предположения о наличии скрытых компонент в первом этапе расчета определяется нулевое приближение только для явно выраженных компонент и осуществляется минимизация видоизмененной величины

$$M' = \sum_i \left\{ y_i - \sum_{\kappa} a_{\kappa} \exp\left[-\frac{(x_i - \varepsilon_{\kappa})^2}{2\sigma_{\kappa}^2}\right] \right\}^2 \mathcal{F}\left(y_i - \sum_{\kappa} a_{\kappa} \exp\left[-\frac{(x_i - \varepsilon_{\kappa})^2}{2\sigma_{\kappa}^2}\right]\right)$$

где N_0 - число явно выраженных компонент, $i = \overline{1, n}$, $\kappa = \overline{1, N_0}$.

\mathcal{F} - функция, аргументом которой является невязка, составлена из кусков прямой, параболы и круга, служит для оформления запрета в том направлении, которое проводит аппроксимирующую кривую выше заданной. При наличии скрытых компонент кривая невязок имеет вид явно выраженных пиков; просмотром кривой невязок осуществляется определение параметров в нулевом приближении для скрытых компонент. Полное число компонент $N = N_0 + N_1$, N_1 - число компонент, выделенных просмотром разностной кривой. После анализа разностной кривой (кривой невязок) осуществляется переход к минимизации квадратичной формы

$$M = \sum_i \left\{ y_i - \sum_{\kappa} a_{\kappa} \exp\left[-\frac{(x_i - \varepsilon_{\kappa})^2}{2\sigma_{\kappa}^2}\right] \right\}^2, \quad \begin{matrix} i = \overline{1, N} \\ j = \overline{1, N} \end{matrix}$$

с учетом всех компонент.

Все этапы расчета можно проследить вызовом на экран осциллоскопа кривой, кривой невязок и выделенных Гауссовых составляющих.

На рис. 4 видны 2 этапа минимизации: 5а - выделение двух явно выраженных компонент и разностная кривая, на 5б -

разложение после просмотра и анализа разностной кривой.

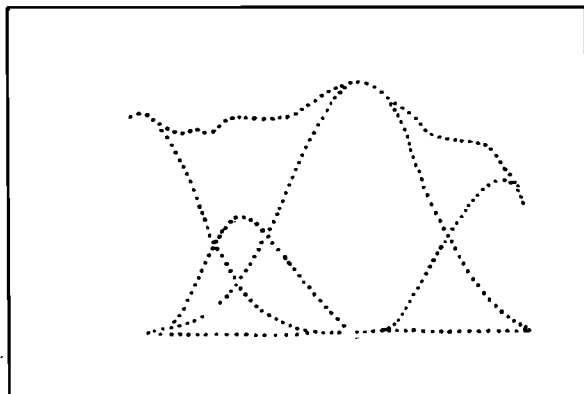


Рис. 5а.

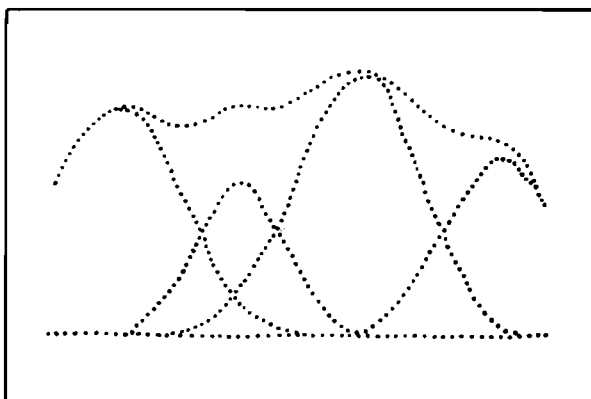


Рис. 5б.

§ 4. РАЗЛОЖЕНИЕ КРИВЫХ НА НЕЗАВИСИМЫЕ КОМПОНЕНТЫ /29/.

Постановка задачи. Дано m функций $f_1(\lambda), \dots, f_m(\lambda)$, $\lambda \in (a, b)$. Требуется найти такую систему функций $x_1(\lambda), \dots, x_n(\lambda)$ и числа a_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, чтобы для каждого i и всех $\lambda \in (a, b)$ имели место равенства

$$f_i(\lambda) = \sum_j a_{ij} x_j(\lambda) \quad , \quad j = \overline{1, n}$$

или в векторной форме: $\vec{f}(\lambda) = A x(\lambda)$,

где $\vec{f}(\lambda)$ - вектор-столбец с компонентами $f_1(\lambda), \dots, f_m(\lambda)$ (I)

$x(\lambda)$ - вектор-столбец с компонентами $x_1(\lambda), \dots, x_n(\lambda)$;

A - матрица a_{ij} порядка $m \cdot n$ функции

x_1, \dots, x_n должны, кроме того, удовлетворять еще некоторым дополнительным требованиям (задача L).

Исходные определения.

Определение I. Система функций $x = \{x_1, \dots, x_n\}$

называется решением задачи L , а матрица A - решающей матрицей задачи L , если кроме (I), выполнены еще условия:

а) функции x_1, \dots, x_n независимы в промежутке (a, b) ;

б) столбцы матрицы A линейно независимы. Число n называется при этом порядком решения x , а функции x_1, \dots, x_n его компонентами.

Условие б) здесь эквивалентно условию б'):

б') любая система функций, удовлетворяющих (I), содержит не менее, чем n функций.

Непосредственно из этого определения следует два предложения

Предложение I. Все решения задачи L имеют одинаковый порядок, равный рангу системы $\{f_1, \dots, f_m\}$, т.е. максимальному числу линейно независимых функций в этой системе.

Предложение 2. Если x решение, то x' является решением тогда и только тогда, если существует неособенная матрица C , такая, что

$$x' = C x \quad (2)$$

Определение 2. Решения x и x' называются эквивалентными, если матрица C в (2) содержит в каждой строке ровно один ненулевой элемент, т.е. если компоненты этих решений можно пронумеровать так, чтобы для каждого j и всех $\lambda \in (a, b)$ выполнялись ра-

венства $x_j(\lambda) = C_j x_j(\lambda)$.

Определение 3. Решение x называется простым, если оно удовлетворяет требованию:
 в) в любом подинтервале промежутка (α, β) линейно независимы все компоненты решения x , принимающие в этом подинтервале ненулевые значения.

Определение 4. Пусть X некоторое решение. Обозначим через T_j множество всех тех и только тех $\lambda \in (\alpha, \beta)$, в которых не обращается в нуль компонента x_j .
 Решение X называется нормальным, если любое из множеств $T_{j_1} \setminus T_{j_2}$, $j_1 \neq j_2$, содержит бесконечно много точек.

Некоторые результаты. Мы будем интересоваться простыми решениями и выясним, при каких условиях такие существуют, а также — когда все они эквивалентны. Можно доказать следующее.

Предложение 3. Если задача L не имеет нормальных решений, то она может иметь простые решения, но среди них обязательно будут неэквивалентные. Если у задачи существует простое нормальное решение, то все простые ее решения ему эквивалентны. Если же существует нормальное, но не простое решение, то простых решений у задачи L нет вообще.

Существует алгоритм, позволяющий выяснить, существуют ли у задачи нормальные решения, и найти такие. Мы приведем только частный случай алгоритма, дающий положительный ответ в случае, если все множества T_j — суть интервалы (α_j, β_j) . Условие нормальности решения тогда означает, что при надлежащей нумерации компонент имеет место

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n; \quad \beta_1 < \beta_2 < \dots < \beta_n. \quad (3)$$

Такое решение для краткости назовем вполне нормальным.

Алгоритм напоминает метод Гаусса для решения системы линейных алгебраических уравнений. Сначала уравнение (I) постепенно преобразовывается так, чтобы матрица A приняла "треугольную" форму (прямой ход), а потом из полученного уравнения

вычисляется вполне нормальное решение (обратный ход).
Начало алгоритма. Введем обозначения $f' = f, f_i' = f_i, i = \overline{1, m}$
Начало прямого хода. Допустим, что уже построен вектор
 f^{κ} с компонентами $f_1^{\kappa}, \dots, f_m^{\kappa}, \kappa > 1$. Выполним следующие операции.

1. Пусть $U_i^{\kappa} = \{\lambda: f_i^{\kappa}(\lambda) \neq 0\}$. Положим $a_{\kappa} = \min d_i$,
 $i = \overline{\kappa, m}$, где $d_i = \inf U_i^{\kappa}$, если это множество не пустое,
и $d_i = b$, в противном случае
2. Если $a_{\kappa} = b$, то перейти к 6.
3. Если $\kappa = m$ то перейти к 7.
4. Пусть $a' > a_{\kappa}$ точка, обладающая свойством: все функции $f_i^{\kappa}, i = \overline{\kappa, m}$ в промежутке (a_{κ}, a') пропорциональны какой-нибудь одной из них (можно считать, что это функция f_{κ}^{κ} ; в противном случае достаточно изменить нумерацию функций f_i^{κ}):

$$\frac{f_i^{\kappa}(\lambda)}{f_{\kappa}^{\kappa}(\lambda)} = p_i^{\kappa}, \quad i = \overline{\kappa, m}, \quad \text{для всех } \lambda \in (a_{\kappa}, a')$$

Если такой точки a' не существует, перейти к 8.

5. Строим новый вектор $f^{\kappa+1}$ следующим образом:

$$f_i^{\kappa+1} = \begin{cases} f_i^{\kappa} & i \leq \kappa, \\ f_i^{\kappa} - p_i^{\kappa} f_{\kappa}^{\kappa} & i > \kappa. \end{cases}$$

Теперь можно опять перейти к началу прямого хода.

6. Этим прямой ход алгоритма заканчивается. В данном случае функции $f_{\kappa}, f_{\kappa+1}, \dots, f_m$ оказались линейными комбинациями $f_1, \dots, f_{\kappa-1}$, т.е. $n = \kappa - 1 \leq m - 1$. Кроме того, нетрудно убедиться, что $a_1 < a_2 < \dots < a_n$. Нужно перейти к обратному ходу.
7. И в этом случае прямой ход заканчивается. Все функции f_1, \dots, f_{κ} линейно независимы, т.е. $n = m$, а также $a_1 < a_2 < \dots < a_n$. Нужно перейти к обратному ходу.
8. В этом случае прямой ход обрывается безрезультатно. Вполне нормального решения задача не имеет, но она может иметь нормальные решения. Для нахождения их нужно пользоваться обобщением описываемого алгоритма. Этот вопрос мы здесь не будем рассматривать подробнее.

Обратный ход. После прямого хода имеем вектор f^n . Пусть B матрица, связывающая f^n с искомым решением $\lambda: f^n = B \cdot \lambda$. Можно показать, что $b_{ij} = 0$, если $i > j$. Строки с номером,

большим n (если такие имеются), можно отбросить, так как они состоят из нулей, а соответствующие функции f_j^n тождественно равны нулю. Положим поэтому $x^n = \{f_1^n, \dots, f_n^n\} = \{x_1^n, \dots, x_n^n$ Далее обратный ход ведется аналогично прямо-
му.

Начало обратного хода. Допустим, что уже построен вектор X^l с компонентами $x_i^l, \dots, x_n^l; l \leq n$.

1. Положим $b_l = \max \sup T_i^x, i = \overline{1, l}$,
здесь $T_i^x = \{\lambda; x_i^l(\lambda) \neq 0\}$ (эти множества не пустые!).
2. Если $l=1$, то перейти к 6.
3. Пусть $b' < b_l$ точка, обладающая свойством:
все функции $x_i^l, i \leq l$ в промежутке (b', b_l)
пропорциональны функции x_l^l (обязательно найдется такая
точка $b' < b_l$, что в интервале (b', b_l) функция x_l^l
принимает ненулевые значения):

$$\frac{x_i^l(\lambda)}{x_l^l(\lambda)} = q_i^l, \quad i = \overline{1, l} \quad \text{для всех} \quad \lambda \in (b', b_l)$$

Если такой точки b' не существует, перейти к 7.

4. Строим новый вектор X^{l-1} следующим образом:

$$x_i^{l-1} = \begin{cases} x_i^l & , \text{если } i \geq l \\ x_i^l - x_l^l \cdot q_i^l & , \text{если } i < l \end{cases}$$

5. Вернуться к началу обратного хода.
6. Обратный ход закончен. X^1 является вполне нормальным решением задачи, а множествами T_j являются T_j^1 . В нашем случае $T_j = (a_j, b_j)$, причем выполняется (3).
7. Обратный ход обрывается безрезультатно. Задача не имеет вполне нормального решения, но может иметь нормальное. Для выяснения этого нужен более сложный алгоритм.

§ 5. ПРИМЕР ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.

В качестве примера совместного применения первичной и вторичной обработки рассмотрим определение по данным физического эксперимента характеристик потенциального барьера,

образующегося на выпрямляющем контакте металл-полупроводник.

Исследуемые вольт-амперные характеристики описываются уравнением Ричардсона - Шоттки, (см. например, /20/):

$$J = SAT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \cdot \exp\left[\frac{e}{kT} \left(\frac{V}{ed}\right)^{1/2}\right] \quad (1)$$

Во время эксперимента были измерены J', V, T, S . Конечным результатом обработки явилось определение параметров A, ϕ, d , при этом вычислялся ряд промежуточных данных, представляющих интерес для экспериментатора. Измеряемые исходные данные J', V, T, S поступали в машину в относительных единицах. Поэтому первичная обработка состояла в преобразовании измеренных величин в соответствующие единицы (этот случай очень типичен для обработки измерительной информации). Значение J вычислялось по формуле:

$$J = \frac{B J'}{200 R} \quad (2)$$

где B и R - диапазоны измерений. Температура в эксперименте измерялась терморпарой, показания которой были проградуированы в милливольты. Поэтому машине задавалась градуировочная таблица соответствующей терморпары. По ней с помощью программы интерполяции по Лангранжу УМШН переводила исходную температуру в градусы Кельвина. На этом первичная обработка заканчивалась. По желанию переведенные исходные данные можно вывести на печать и перфоленду. Вторичная обработка состояла из следующих этапов:

1. Машина определяла диапазон температур, где $\ln \frac{J}{T}$ линейная функция от $\frac{1}{T}$ (рис. 6).

Отсюда вычислялась высота потенциального барьера ϕ_v при внешнем напряжении V на контакте

$$\phi_v = \frac{\ln \frac{J}{T_2} - \ln \frac{J}{T_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \cdot \frac{k}{e} \quad (3)$$

Экстраполируя прямо до пересечения с осью y , мы можем найти значения термоэлектронной постоянной Ричардсона A_v при

различных напряжениях V

$$A_v = \frac{J_0}{S T^2} \quad (4)$$

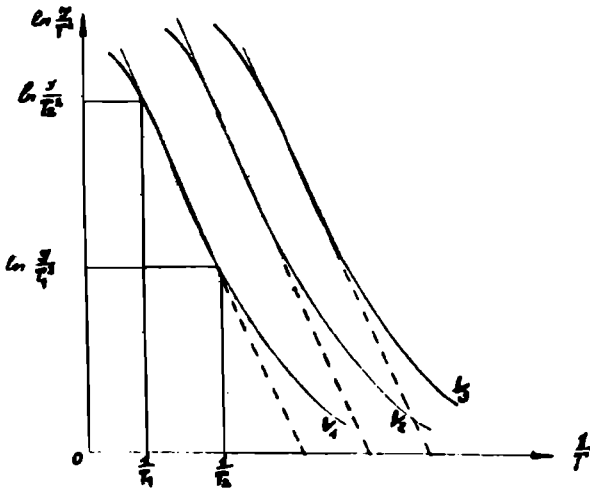


Рис. 6.

2. Аналогичным путем определялся интервал напряжений, где $\ln J$ - линейная функция \sqrt{V} , откуда вычислялась толщина d_T контактного слоя при температуре T (рис. 7)

$$d_T = \frac{e^3}{\epsilon \kappa^2 T^2} \cdot \left(\frac{\sqrt{V_2} - \sqrt{V_1}}{\ln J_2 - \ln J_1} \right)^2 \quad (5)$$

3. Экстраполируя прямые, полученные на втором этапе до пересечения с осью y , получаем массив $\ln J_0$. Построив зависимость $\ln J_0$ от $\frac{1}{T}$, можно определить φ по формуле (3).

4. Полученные на первом этапе φ_v являлись линейной функцией \sqrt{V} , из этого условия находим d :

$$d = \frac{e}{\epsilon} \left(\frac{\sqrt{V_1} - \sqrt{V_2}}{\varphi_{v1} - \varphi_{v2}} \right) \quad (6)$$

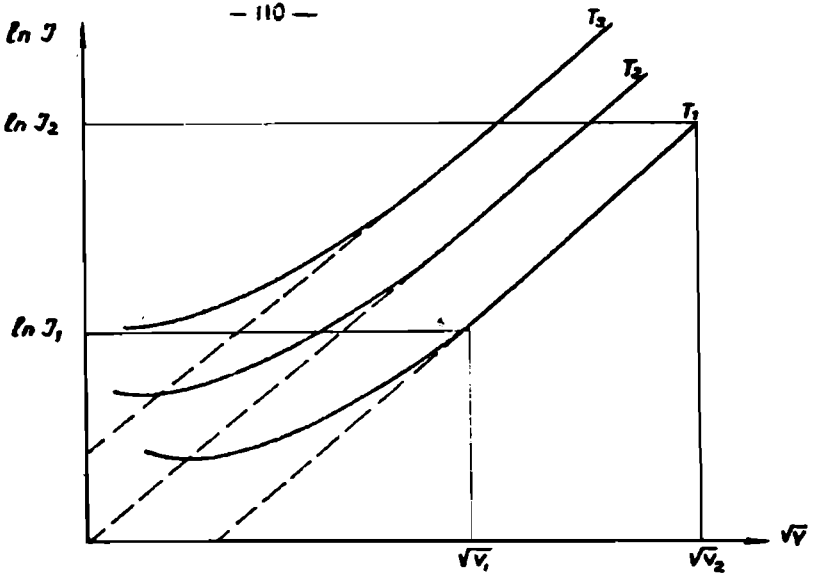


Рис. 7.

Для изображения логической схемы алгоритма, моделирующего обработку результатов эксперимента, введем следующие операторы /2I/.

- A_1 - первичная обработка измерительной информации,
- Φ_2 - формирование массивов,
- B_3 - вывод на осциллограф,
- P_4 - проверка условия - "ключ нажат",
- Φ_5 - формирование счетчика: (n_i) - число точек на кривой,
- A_6 - проведение прямой по методу наименьших квадратов,
- K_7 - вычитание I из n_i ,
- P_8 - проверка условия $(n_i - i) > I$,
- A_9 - вычисление $tg_{\alpha} \varphi$,
- P_{10} - проверка ограничений, налагаемых на участок линейной зависимости,
- A_{11} - вычисление конечных результатов,
- Γ_{12} - печать результатов,
- P_{13} - проверка условия $k = 2$,
- A_{14} - конец работы,
- A_{15} - уменьшение массива на одну точку.

$A_1, \Phi_2, B_3, P_4^{17a}, \Phi_5^{4,15}, A_6, K_7, P_8^{2a}, A_9, P_{10}^{19}, A_{11}, P_{12}$

$P_{13+2}, \Phi_{2a}^{13,18a}, B_{3a}, P_{4a}^{17a}, P_{4b}^{17b}, A_{6a}, A_{12}, P_{13+2a}, A_{14}$

$K_{7a}, A_{15}^{5,3a}$

K_{7b}, A_{15a}^{3a}

Остановимся кратко на определении промежутка линейной зависимости (см. I и II этапы). Промежуток температур ($T_{нач.}, T_{кон.}$), а на втором этапе - напряжений ($\sqrt{V_1}, \sqrt{V_2}$), разбивается на промежутки, отличающиеся друг от друга числом точек. В каждом таком интервале проводились прямые и определялся их наклон $tg \varphi$. Затем вычислялся усредненный $tg_{cp} \varphi$ по всем интервалам. За искомым интервал принимался максимальный промежуток, наклон прямой в котором не превышал среднего тангенса плюс за - данную погрешность.

Л и т е р а т у р а.

1. Перов В.П., Статистический синтез импульсных систем, Из-во "Советское радио", 1959.
2. Линник Ю.В., Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений, ФМ, 1962.
3. Уиттекер Э., Робинсон Г., Математическая обработка результатов наблюдений, 1933
4. Brown R.G., Smoothing, Forecasting, Prediction of Discrete Time Series, Prentice Hall, Inc, 1963.
5. Brown R.G., Meyer R.P., The fundamental Theorem of Exponential Smoothing., Operat. Res., V 9, N 5, 1961.
6. Д'Кворо Р.А., A simple proof of a theorem in exponential smoothing., Operat. Res., V 11, 1963, N 3.
7. Ланцос К., Практические методы прикладного анализа, ФМ, 1961.
8. N YI Tracts for computers, edited by K. Pearson, Camb. Univ. Press, 1921.
9. Прохоров Ю.В., Рок Ю.А., Теория вероятностей. "Наука", 1967.
10. Wiener N., Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. John Wiley, N.Y., 1949.

11. Zadeh L.A., Ragazzini J.R., An Extension of Wiener's Theory of Prediction. Jour. Applied Physics, V 21, 1950, № 7.
12. Кованц П., Обобщенный дискретный аналог задачи Заде - Раггазини, Автоматика и телемеханика, № 2, 1966.
13. Пугачев В.С., Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. ФМ, 1962.
14. О работах Тихонова А.Н. по методу решения некорректно поставленных задач, УМН, 1967.
15. Худсон Д., Статистика для физиков. Из-во "Мир", 1967.
16. Пугачев В.С., Автоматика и телемеханика. Т. XIX № 6, 1958.
17. Градштейн И.С., Рыжик И.М., Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. ФМ, 1963.
18. Levine N.A., A new Technique for Uncreasing the Flexibility of Recursive Least Squares Date Smoothing. Bell System Techn., 1961, N 3.
19. Полляк Ю.Г., О сглаживании шумов и случайных погрешностей измерений, ограниченных по амплитуде. Радиотехника, № 12, 1966.
20. Добрецов Л.Н., Гамольнова М.В., Эмиссионная электроника, Наука, 1966 г.
21. Бусленко Н.П., Моделирование производственных процессов на электронных цифровых машинах. Проблемы кибернетики, в. 9, ФМ, 1963 г.
22. Клепиков Н.П., Соколов С.Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия, М., 1964.
23. Шиголов Б.М., Математическая обработка наблюдений, М, 1962.
24. Bernhard J. Ronsil, Quadratic Minimization Procedure, Reviews of modern Physics, 1960, 32, N 2.
Bell I.T. and Biggers R.E., The Absorption Spectrum of the Uranyl Ion in Perchlorate Media. Journal of Molecular Spectroscopy, 1965, 18, 247-275.

26. Mariscotti M.A., A method for automatic identification of peaks in the presence of background and its application to spectrum analysis. Nucl. Instrum. and Methods, 1967, 50, N 2, 309-320.
27. Кузьмина Л.М., Сглаживание измерительной информации, Доклад на конференции "Вычислительные системы", Новосибирск, 1967.
28. Гайлитис А.А., Принципы обработки оптических спектров с помощью вычислительной машины, Тезисы докладов XV Собрания по люминесценции, Тбилиси, 17-23 ноября, 1966.
29. Цирулис Я.П., О разложении системы кривых на независимые компоненты, Доклад на конференции "Вычислительные системы", Новосибирск, 1967.

Г Л А В А 4

ФОРМАЛЬНЫЕ ЯЗЫКИ ЭКСПЕРИМЕНТА.

ВВЕДЕНИЕ.

Типичным для современного сложно-комплексного эксперимента является необходимость быстрого принятия решения при наличии большого (но часто недостаточного) объема информации, обрабатываемой по сложным алгоритмам. Тем не менее эти решения должны быть обоснованными. Кроме того, процесс должен как можно точнее следовать заранее разработанному плану. Эти и многие другие причины делают необходимым применение в эксперименте вычислительных и управляющих машин, что повышает требования к точности формулировки цели эксперимента и алгоритмов его проведения и обработки информации. Для подбых целей и, вообще, просто для связи с машиной уже давно применяются формализованные языки. В этой главе анализируются возможности и способы применения таких языков для нужд эксперимента. В § I описано понятие языка, используемое далее для анализа экспериментирующих систем. Определению экспериментирующей системы (ЭС) посвящен § 2; здесь же рассматриваются существенные для ЭС информационные процессы. На этой основе в § 3 разбираются характерные особенности языков ЭС. Наконец, в последнем параграфе на конкретном примере можно увидеть, какие задачи возникают при попытке построить язык для управления.

§ I. ПОНЯТИЕ ФОРМАЛЬНОГО ЯЗЫКА.

I.I В науках, занимающихся теоретическим изучением языка или его функций - в таких как математическая логика, структурная лингвистика и др. (см. /1,2,3/) - разработаны различные абстрактные определения языка. Мы изложим одну из существующих точек зрения, подходящую для нашей цели /4/.

В основу языка кладется некоторое множество (обычно конечное) — алфавит, состоящий из каких-то материальных объектов или процессов, играющих роль исходных, далее неразложимых знаков (символов). Для письменного русского языка таким алфавитом является совокупность букв вместе со знаками препинания и пробелом, для устного — определенные комбинации колебаний воздуха различной частоты и интенсивности. При сигнализации флажками пользуются алфавитом, состоящим из различных положений флажков относительно тела сигнальщика, а также некоторых манипуляций флажками.

Конечные последовательности исходных символов называются текстами (иногда — выражениями, словами, формулами и т.д.). Выделяется некоторое подмножество текстов, называемых правильно построенными (п.п.т.). Правила построения этого подмножества, т.е. правила правильного построения текстов в совокупности называются синтаксисом. Само множество п.п.т. называется знаковой или формальной системой. Алфавит и синтаксис однозначно определяют знаковую систему, поэтому их можно отождествить.

Обычно синтаксис представляет собой совокупность правил образования, т.е. правил, которые из некоторых п.п.т. образуют новые — составные п.п.т. Тогда должен быть указан способ, который по данному составному тексту дает возможность установить, из каких текстов и каким способом он построен.

Формальная система еще не исчерпывает языка. Ведь выражения языка должны иметь еще какое-то смысловое содержание, скажем, обозначать какие-нибудь предметы или действия или выражать их свойства и отношения между ними. Другими словами, мы имеем еще систему каких-то вещей, на которую отображается знаковая система. Такое отображение назовем интерпретацией знаковой системы или семантикой. Это отображение может быть неоднозначным (омонимия), или различные тексты могут интерпретироваться одинаково (синонимия). Некоторым правильно построенным текстам может вообще ничего не соответствовать (бессмыслица при грамматически правильном предложении), а в случае неразвитости знаковой системы некоторые важные понятия могут оказаться невыражаемыми.

Заметим, что иногда стараются для данной системы "вещей" подобрать такую формальную систему, чтобы, кроме прочего, правила образования составных текстов соответствовали бы каким-нибудь конструкциям, порождающим одни "вещи" из других, а иногда, наоборот, ищут для данной формальной системы такую семантику, чтобы и правила образования получили интерпретацию. Иногда под интерпретацией некоторого текста мы будем понимать саму "вещь", интерпретирующую этот текст, соответствующую тексту при упомянутом отображении).

Под языком будем понимать знаковую систему вместе с интерпретацией. Язык может быть более или менее точным, в зависимости от точности законов, определяющих его синтаксис и семантику. Достоинство формальных языков как раз в том и заключается, что для них эти законы определены намного точнее, чем в естественных языках. На практике часто оказывается, что различные пользователи языком используют отличные друг от друга интерпретации (что вызывается неточностью семантических правил или ошибочным их применением). Подробнее об этом см./5/, здесь мы приведем только иллюстрацию сказанному. При выполнении программы вычислительной машиной мы ожидаем от последней определенного поведения. Но каждый, кто работал на ВМ, знает, что часто машина ведет себя отнюдь не так, как мы ожидаем, хотя мы уверены, что программа составлена "правильно". Неизбежным элементом отладки программы, т.е. текста на определенном "машинном" языке, является согласование двух интерпретаций этого языка - нашей и машинной.

1.2. Какие же функции может взять на себя формальный язык в эксперименте? Здесь мы коснемся этого вопроса в самых общих чертах (см. также /6,8/).

Пожалуй, наиболее известной и в настоящий момент более всего используемой является функция формализованного языка как посредника между человеком и машиной. Но формальный язык можно использовать также и для общения между людьми. В журналах *Comm of ACM* и *Computer Journal* уже давно публикуются разработанные алгоритмы вычислительной математики на языках Алгол и Фортран. На специальных языках можно описать также и схемы и алгоритмы сложных экспериментов, разработка которых

требует много времени и затрат. Сейчас на обычных "человеческих" языках уже относительно простые эксперименты требуют больших и длинных разъяснений, после которых все равно нет уверенности, что все правильно понято - об этом мы уже писали в первом пункте.

Кроме того, формальный язык (как и язык вообще) помогает в мышлении. Обдумывая ход эксперимента или решения задачи, нужно отчётливо и со всеми деталями выразить свои мысли. Точность и строгость языка вынуждает при этом вскрыть все неясности и помогает устранить недостатки предполагаемого алгоритма. То же относится и к постановке и формулировке задачи.

Чтобы быть успешно применимым для указанных целей, язык должен удовлетворить ряду требований. Он должен быть выразительным - иметь достаточно широкую семантику. Желательно, чтобы он был ориентированным на круг решаемых проблем - чтобы наиболее часто встречающиеся понятия имели наиболее простые выражения. Мы уже говорили о том, что язык должен быть точным. Он должен быть также легко понятным с точки зрения всех или большинства пользователей.

Было бы неразумно пытаться построить один язык для всех указанных целей и поэтому удовлетворяющий всем упомянутым требованиям. Такой язык получился бы очень громоздким, а в каждом конкретном случае большинство его средств остались бы не использованными. Удобнее для каждого из этапов эксперимента разработать отдельный язык, учитывающий особенности данного этапа, поскольку различные задачи выдвигают различные требования к соответствующему рабочему языку. В следующем параграфе дается база, на основе которой можно анализировать различные встречающиеся в эксперименте типы языков.

§ 2. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСПЕРИМЕНТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ.

2.1. Чтобы выявить особенности языков, используемых на различных этапах эксперимента, и выделить сами этапы, мы сделаем анализ процессов в системе, проводящей эксперимент, и начнем с уточнения самого понятия экспериментирующей системы (ЭС).

Интуитивно ясно, что ЭС получает, обрабатывает и выдает некоторую информацию, т.е. является информационной системой. Понятно также, что для того, чтобы действительно называться экспериментирующей, ЭС должна осуществить взаимодействие (при том целенаправленное) с каким-нибудь объектом. Но не о каждой такой системе мы склонны говорить, что она экспериментирует с объектом. Чем же отличается ЭС от, например, обучающей или управляющей системы, а также различные ЭС между собой? Здесь обычно указывают на различные структурные особенности, например, на присутствие или отсутствии тех или других специализированных узлов, устройств и т.п., или их приспособленность, "назначение". До некоторой степени это верно, но суть все-таки не в этом.

Некоторая система является ЭС потому и только потому, что мы ее за такую принимаем, т.е. соответствующим образом интерпретируем ее работу (ср. с /4/). Нетрудно назвать многочисленные примеры, когда материальная система, если рассматривать ее с различных точек зрения, выполняет одновременно различные функции или, наоборот, различные по назначению системы заменяют друг друга.

Конечно, некоторые системы, будучи интерпретированы как ЭС, могут довольно плохо справиться со своей задачей, и тогда возникает вопрос об их оптимизации. Что касается предположения о различных структурных особенностях, характерных для ЭС, то оно возникло потому, что человек старается отобрать и использовать хорошие ЭС. Проявляющаяся закономерность заключается в том, что нечто общее, кроме интерпретации, с необходимостью имеются лишь у этих "хороших" (и то, может быть, только для известных до сих пор) ЭС, но эти же особенности могут иметь и плохие ЭС или системы, не являющиеся ЭС. Провести же грань между хорошими и плохими системами на этом основании нельзя.

2.2. В продолжении параграфа мы уточним высказанный выше тезис.

Никакая информационная система, в том числе и ЭС, не пользуется информацией как абстрактной сущностью: эта информация заключается в сигналах, циркулирующих внутри системы, т.е. в некоторых материальных образованиях. Можно считать, что сигналы или последовательности сигналов, наблюдаемые в каком-нибудь

канале, образуют знаковую систему в смысле § I или описывается такой. Выбор этой знаковой системы не однозначен, поскольку неоднозначным является уже выбор исходного алфавита, и зависит, с одной стороны, от точности измерения сигналов, с другой, от того, какие знаки мы признаем элементарными. Интерпретировать систему - это значит интерпретировать знаковые системы, связанные с различными ее узлами и каналами, т.е. превратить эти знаковые системы в языки. Экспериментирующая система отличается от других систем именно особой интерпретацией, к описанию которой мы переходим.

2.3. Мы будем считать, что ЭС - это система со следующей интерпретацией: она решает задачу о некотором объекте (из данного класса), взаимодействуя с ним и извлекая из этого взаимодействия необходимую информацию. Подчеркнем еще раз, что эта интерпретация делает систему экспериментирующей, а не просто обусловлена тем, что система является экспериментирующей. Представим ЭС в следующем виде (рис. 2.1).

Задача подается на вход I^+). Такой задачей обычно является уменьшение до некоторой величины (или на некоторую величину) неопределенности одного или нескольких параметров, характеризующих интересующий нас объект. Эти параметры, вообще говоря, могут иметь не только числовую, но и векторную, функциональную или любую другую природу. После получения задачи, ЭС, используя каналы 3, 4, вступает в взаимодействие с объектом. В терминах § I можно было бы сказать, что между ЭС и объектом происходит обмен информацией на языке воздействий и реакций. Выдаваемый на выходе 2 текст интерпретируется как ответ или решение задачи.

Прежде чем перейти к рассмотрению функциональной схемы ЭС, нужно сделать следующее замечание. Мы включаем в состав ЭС все источники воздействий, которым подвергается объект во время эксперимента, в том числе и те, которые обычно характеризуют словами "среда", "окружение". Это сделано потому, что та-

⁺)Точнее следовало бы сказать: текст, подаваемый на вход I , интерпретируется как задача. Однако, если не может быть недоразумения, для естественности языка, будем допускать такие "вольности речи".

кое разделение чисто условное, и попытка провести грань между "нужными" и "ненужными" воздействиями или между "преднамеренными" и "непреднамеренными" ведет к принципиальным затруднениям. Выбранная нами точка зрения, между прочим, значит, что, выбирая ту или иную ЭС, мы одновременно выбираем и обстановку, в которой будет проходить эксперимент, и наоборот - изменив последнюю, мы должны считать, что изменили и ЭС⁺).

2.4. ЭС, обладающую достаточным уровнем организации, можно разделить на четыре функциональных блока, причем это разделение не обязано быть связанным с конструктивным выполнением ЭС. Даже, наоборот, такое деление может оказаться неоднозначным, однако более или менее развитые блоки с указанными ниже интерпретациями могут быть найдены. Мы вкратце опишем работу схемы,

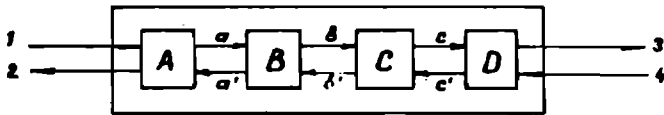


Рис.2.1.

считая, что каждый из блоков $A \div D$ решает некоторую подзадачу.

Блок A воспринимает текст задачи эксперимента. На выходе a выдается описание на некотором языке такого процесса взаимодействия с объектом, который ЭС должна осуществить для решения задачи. Блок D представляет часть ЭС, которая реализует это взаимодействие (источники воздействий и измерители). Блок B перерабатывает описание взаимодействий в программу управления блоком C , передаваемую ему по каналу b , а блок C на основе этой программы осуществляет само управление по каналу c .

Показания приборов по каналу c' поступают в блок C , выдающий по каналу b' описание этих показаний на некотором языке. Блок B преобразует это описание в описание реакций объек

⁺) Можно поступить по иному - считать, что среда является характеристикой объекта, точнее, что эксперимент проводится не просто над объектом, а над "объектом в среде", и, меняя среду, меняется объект исследования и наоборот.

та, которые подаются в блок A по каналу a' (первичная обработка информации). Здесь оно преобразуется в текст, представляющий ответ на поставленный ЭС вопрос (вторичная обработка).

Мы совсем не говорим об обратных связях внутри ЭС, поскольку они играют подчиненную роль в том смысле, что они нужны не для работы ЭС как таковой, а для достижения определенного качества ее работы. А эта вторичная задача отличается от той, по которой определяется ЭС, и решением ее занимается другая, оптимизирующая система (хотя их часто и не отделяют друг от друга). Если в дополнение сказанному считать, что по каналам a' , b' , c' подаются также и отчеты о выполнении команд, поданных по каналам a , b , c соответственно, то получим ЭС с оптимизацией.

§ 3. АНАЛИЗ ТИПОВ ФОРМАЛЬНЫХ ЯЗЫКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ.

3.1. Анализ ЭС в предыдущем параграфе мы начали с рассмотрения ее как системы, решающей некоторую задачу. Чтобы ответить на вопрос, какой должна быть структура языка формулировки таких задач, мы вкратце выясним, что собой представляет сама задача. При этом мы ориентируемся на задачи характерные эксперименту, но, видимо, такой же подход возможен и при формализации других задач (например, задачи оптимизации).

В корректно поставленной задаче указывается, во-первых, объект, которым мы интересуемся, и, во-вторых, условие задачи, т.е. цель эксперимента - то, что мы желаем узнать об объекте. Это может быть указано явно или в скрытом виде. Иногда условие только подразумевается, а вместо него указывается процесс, который должен быть осуществлен для решения задачи. Но это означает просто, что при поставлении задачи уже выполнена часть работы блока A в схеме ЭС (рис. 2.1).

Изложим эту мысль точнее. Пусть X, Y - два множества, а U - множество отношений между элементами $x \in X$ и $y \in Y$. Элементы множества X назовем объектами (эксперимента), а элементы из Y будем интерпретировать как возможные значения

некоторых параметров этих объектов. Отношения U , естественно, связываются с самими параметрами (как некоторыми переменными, зависящими от объекта X), а тот факт, что X и Y находятся в отношении U , означает тогда, что для объекта параметр U имеет значение y .

Задачу эксперимента можно определить как произвольную пару (X, U) . Здесь X играет роль объекта задачи, а U — условия задачи. Другими словами, задачу (X, U) можно читать так: найти такой $y \in Y$, который был бы значением параметра U объекта X , или, более отвлеченно, с которым объект X находится в отношении U . Такая задача может иметь одно или несколько решений, а может и не иметь ни одного.

Рассмотрим пример. Пусть множеством X является некоторая коллекция кристаллов, а множеством Y — отрезок $(0, 1)$ на числовой оси. В качестве условий можно взять множество всевозможных отношений, описываемых высказыванием вида "кристалл имеет для света длины волны λ , коэффициент абсорбции ..." или, более обще, "кристалл имеет для света длины волны λ , коэффициент абсорбции ... с ошибкой, меньшей ϵ ", где λ пробегает некоторое множество. Подставляя вместо первого многозначия названия различных элементов из X , (скажем, номера кристаллов в коллекции) получаем тексты различных задач (мы имеем в виду, что второе многозначие заполняется числами из Y) на определение коэффициента абсорбции.

Из вышесказанного следует, что языком задач должен быть язык, на котором а) легко перечислить элементы X , б) удобно определить новые объекты в случае необходимости, в) удобно задать отношения — условия, характерные для определенного круга экспериментов. Особенностью такого языка является тот факт, что он не алгоритмический, а реляционный, т.е., язык отношений.

Большая часть математического языка как раз и приспособлена для определения задач, в основном вычислительных. В связи с развитием вычислительной техники основное внимание было уделено разработке алгоритмических языков решения задач. Вопрос о специальных языках отношений для определения задач в процессе автоматизированного решения, по-видимому, впервые рассмотрен в /9/, см. также /10/. На нам неизвестно, чтобы подобные языки исполь-

зовались для нужд физического эксперимента. Потребность же в таких языках появляется не только при автоматизации или кибернетизации эксперимента, но и вообще в связи с возрастающим усложнением задач и методов экспериментальных наук.

3.2. В отличие от языков формулировки задач, все обычные языки программирования являются языками процессов. Первые языки программирования (FORTRAN, UNIVAC, MAC-MATIC), появившиеся, начиная с 1956 г., по необходимости оказались языками для записи алгоритмов вычислительной математики. Потом появились, опять-таки алгоритмические, языки обработки экономической информации (COBOL), информационные языки (IPL) и языки моделирования (SPS).

Обработка результатов эксперимента фактически состоит из вычислений, по крайней мере, в начальной стадии. Ясно поэтому, что здесь можно использовать любой из распространенных сейчас языков программирования, например, Алгол, Фортран и т.д. В нашу цель не входит привести описание какого-нибудь из них (по этому поводу отсылаем к /7, 8, 11, 12/) или дать их сравнение (см. /13/). Заметим лишь, что в СССР наибольшую популярность приобрел Алгол и различные его модификации /14, 15/.

Остановимся вкратце на некоторых особенностях алгоритмов вычисления, отличающих их от рассматриваемых далее алгоритмов управления и отражающихся в структуре соответствующих языков. Для определенности рассмотрим вычислительные процессы в ВМ, поскольку существующие языки программирования предназначены для них; суть наших рассуждений при этом не изменится. Нас будет интересовать работа машины на уровне команд.

Почти во всех существующих ВМ имеется только один процессор, т.е. не могут одновременно выполняться несколько команд или операторов, и во время выполнения каждого оператора может измениться содержание лишь ячеек, которые указаны в этом операторе, т.е. являются его выходами. Во всех интересных случаях можно считать, что состояния входов машины тоже меняются только при обращении программным путем к внешним устройствам. Поскольку единственной причиной изменения содержимого ячеек оказывается работа самой ВМ, существен лишь порядок выполняемых команд (операторов), а не время выполнения каждой из них или временные интервалы между их выполнением. Другими словами, ре-

зультат вычислений может зависеть только от первого из трех названных факторов, и не зависит от двух последних. Можно сказать, что вычисления проходят в искусственном времени.

Это есть общее правило, имеющее место для всех последовательно работающих вычислительных устройств, в том числе и человека. Поэтому и обычные языки программирования имеют соответствующую структуру. Например, в Алголе строго определен порядок выполнения операторов, а в составных выражениях скобки употребляются обязательно лишь там, где это существенно. Кроме того, внутри блока свободно можно пользоваться переменными, определенными вне его (но до обращения к нему). Хотя некоторые переменные могут меняться со временем, по мере выполнения программы, в выражениях не указывается явно момент времени, относительно которого рассматриваются значения переменных, и в этом действительно нет необходимости.

3.3. В процессе управления управляющее устройство (УУ) имеет дело с объектом, который может перейти из одного состояния в другое, вообще говоря, и при отсутствии воздействий со стороны УУ. Это значит, что входы УУ, связанные с объектом, могут менять состояния "самопроизвольно" с точки зрения УУ, т.е. УУ по необходимости работает в реальном времени. Кроме того, в многоканальном управлении обработка или, по крайней мере, передача и преобразование информации происходит одновременно в различных частях управляющей системы. Поэтому при составлении программы для УУ нужно считаться с тем, что, во время выполнения того или другого оператора, в системе могут происходить события, "внешние" относительно этого оператора, т.е. не являющиеся непосредственно результатом работы самого оператора, но изменяющие значения его входных переменных. Мы приходим к выводу, что языки программирования достаточно сложных процессов управления должны это учитывать и иметь средства для указания не только временного порядка операторов, но и их "сосуществования", т.е. для указания моментов начала и конца выполнения операторов и выдачи результатов по отношению к событиям в системе, а, возможно, также и допустимые сдвиги их (моментов). См. также /20/.

Сказанное относится к любым системам, осуществляющим параллельное протекание процессов и/или процессов в реальном времени.

Сюда относятся современные вычислительные системы, а также и достаточно сложные экспериментирующие, моделирующие и т.д. системы. Это отражается в соответствующих программах языках Средства для выражения обсужденных выше особенностей могут быть, разумеется, самыми различными (см. по этому поводу /16 + 21/).

§ 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ЯЗЫКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРОЙ.

4.1. В настоящем параграфе на конкретном примере иллюстрируются возможности стандартизации языка управления аппаратурой эксперимента, а также возникающие при этом затруднения. Мы не приводим точного описания такого языка; использованный фрагмент имеет структуру и синтаксис, сходные с Алголом, но имеются также и средства, увеличивающие его выразительность (см. п.3.3.). Для простоты и большей наглядности мы отказались от затемняющего суть дела использования описаний переменных внутри программы, предполагая, что их можно восстановить из контекста.

4.2. Допустим, что мы имеем в своем распоряжении приборы, схематическое описание которых приводится ниже.

Монохроматор.

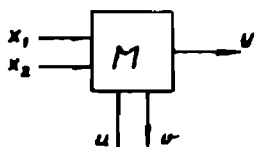


Рис. 4.1.

Это прибор для получения монохроматического светового луча фиксированной интенсивности и сизменяемой длиной волны $\lambda_0 + \ell \cdot \Delta \lambda$, $\ell = \overline{0, L}$ и шириной $\delta + d \cdot \Delta \delta$, $d = \overline{0, D}$. Числа ℓ и d подаются в определенном коде на X_1 , и X_2 соответственно. Во время настройки M выход v находится в состоянии, обозначаемом 0 , в рабочем положении выход находится в

состоянии 1. Когда на вход u подается сигнал 1, на выходе y можно наблюдать световой луч, когда подается 0 луч отсутствует.

Затвор.

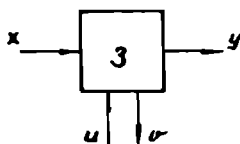


Рис. 4.2.

Затвор может находиться в двух состояниях: в открытом (тогда состояние выхода $v=1$) и в закрытом ($v=0$). В открытом состоянии световой луч, поданный на x , свободно проходит через затвор ($y=x$), в закрытом, луч y отсутствует. Затвор открывается через некоторое время после подачи сигнала 1 на вход u , и закрывается через такое же время, если подается сигнал $u=0$.

Термостат.

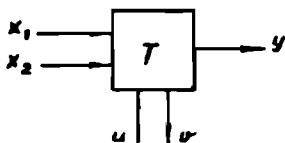


Рис. 4.3.

Прибор служит для поддержания постоянной температуры какого-нибудь объекта. На вход x_1 подается в определенном коде значение нужной температуры, вход x_2 имеет температуру объекта. На выходе y появляется значение температуры объекта в определенном коде. Термостат включается, если на вход u подается сигнал 1, и выключается, если подается сигнал 0. Подогреваемый объект связан с выходом y .

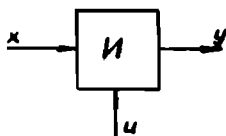


Рис. 4.4.

Прибор для измерения интенсивности света, падающего на вход X . Число, характеризующее интенсивность, выдается на выходе y . Вход U играет такую же роль, как и в предыдущих случаях.

Часы.

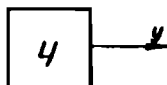


Рис. 4.5.

Прибор с одним выходом. Разность между показаниями в моменты t_1 и t_2 указывает длительность временного интервала (t_1, t_2).

4.3. Нам нужны еще несколько новых ограничителей и операторов.

а) Левая операторная скобка одновременно (см. /16/). Она отличается от скобки начало тем, что все следующие за ней операторы до первой скобки конец должны выполняться параллельно, т.е. начинают работу одновременно, а выход из составного оператора осуществляется после окончания работы всех составляющих операторов. Здесь нам не понадобится выход из составного оператора с помощью оператора перехода.

б) Отношение раньше. Мы будем с его помощью образовывать логические выражения по схеме " A раньше B ", где A и B - логические выражения. Интерпретировать такое выражение (обозначим его через C) будем следующим образом. Пусть нам надо прочитать C в момент времени t_0 . Тогда значение истин-

ности C для $t \geq t_0$ определим так:

неопределено для $t \in (t_0, t_1)$, если A и B ложны для всех $t \in [t_0, t_1)$;

истинно для $t \geq t_1$, если в момент t_1 A становится истинным, а B остается ложным;
ложно для $t \geq t_1$, если в момент t_1 B становится истинным.

В частности, может оказаться $t_1 = t_0$. Если в момент t_0 значение C не определено, то "машина ждет" наступления момента t_1 .

в) Условие когда /17/. С его помощью будем образовывать условные операторы по схеме "когда A O ", где A логическое выражение, O - оператор, со следующей интерпретацией: оператор O начинает работу в момент, когда после обращения к условному оператору выражение A становится истинным. В частности, если A истинно в момент обращения, то условный оператор равносильен оператору O . O может быть и пустым оператором.

г) Оператор цикла для х: $-A$ интервал T пока C цикл O
Он отличается от оператора для х: $-A$ шаг B пока C цикл O только тем, что оператор O выполняется с интервалом времени T , а не изменяя величину параметра x на B

д) Оператор пауза (τ) /17/. Выполнить этот оператор - это значит отложить обращение к следующему за ним оператору на время τ

4.4. Введем несколько сокращений. Мы будем пользоваться записью типа $y[M]$, $u[M]$, чтобы указать прибор, которому принадлежит соответствующий вход или выход. Кроме того, для некоторых из них введем специальные идентификаторы, а именно: время для $y[\tau]$ (ср. /17/), интенсивность для $y[u]$ температура для $u[T]$.

Нам будет удобно иметь также специальные идентификаторы для некоторых стандартных операторов-процедур:

открыть затвор: $u[3] := 1$;

закрыть затвор: $u[3] := 0$;

установить цель (d): $x_2[M] := \delta_0 + d \cdot \Delta \delta$;

установить волну (l): $x_1[M] := \lambda_0 + l \cdot \Delta \lambda$;

установить температуру (θ): $x_1[T] := \theta$.

Аналогично определяются идентификаторы включить М, выключить М и т.д.

4.5. Опишем теперь эксперимент, для осуществления которого мы в следующем пункте составим программу (управления аппаратурой) на нашем языке.

Представим, что нужно измерить интенсивность света люминесценции кристалла в зависимости от длины волны возбуждающего излучения и при заданной температуре. Пусть при этом процесс имеет следующие особенности. При облучении интенсивность излучаемого кристаллом света достигает своего истинного значения не сразу, а постепенно, например, по экспоненциальному закону. Через некоторое время после снятия возбуждения интенсивность люминесценции начинает постепенно падать до некоторого минимума. Лишь после этого кристалл облучается новой порцией света. Температура поддерживается постоянной при помощи термостата, но для контроля нужно отметить те промежутки времени, когда отклонение температуры от нормы превышает допустимую величину. Желательно также экономить время и поэтому различные манипуляции над аппаратурой проводить одновременно, где это возможно.

Для проведения этого эксперимента можно использовать описанные в п.2 приборы, включая их по следующей схеме (рис. 4.6. ; мы не указываем обозначения входов и выходов, считая их ясными из описанного выше алгоритма).

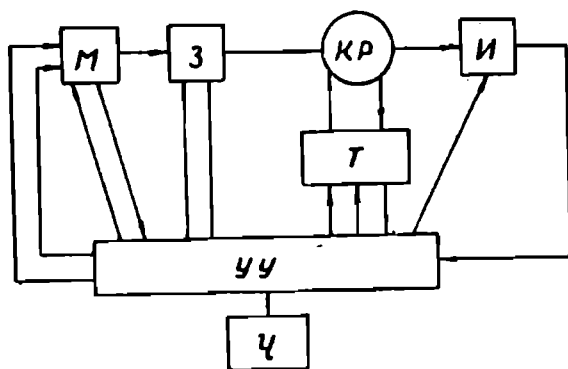


Рис.4.6. Схема эксперимента.

4.6. Мы опишем, дополнительно к п. 4.4, еще несколько процедур, характерных для данного эксперимента (связанных с измерением истинного значения интенсивности люминесценции и с фиксацией отклонений температуры), а потом составим программу управления аппаратурой.

а) ждать спада интенсивности (ϵ)

когда интенсивность $\leq \epsilon$;

б) фиксировать истинную интенсивность (Z, τ, ϵ) или, короче, фиксировать ист. инт. (Z, τ, ϵ)

начало

$b := 0$ интенсивность; пауза (τ);

для $a :=$ интенсивность интервал τ пока $|a - b| < \epsilon$ цикл
начало

$b := a$; $a :=$ интенсивность

конец;

$Z := a$

конец;

в) измерить истинную интенсивность ($Z, l, \tau, \epsilon_1, \epsilon_2$) или, короче, измерить ист. инт. ($Z, l, \tau, \epsilon_1, \epsilon_2$)

начало

одновременно

установить волну (l) ; ждать спада инт. (ϵ_1)

конец;

открыть затвор; фиксировать ист. инт. (Z, τ, ϵ_2) ;

закрыть затвор

конец;

г) фиксировать отклонения температуры (a, b, θ, δ) или фиксировать откл. темп. (a, b, θ, δ)

одновременно

когда | температура - θ | $> \delta$ $a :=$ время;

когда | температура - θ | $\leq \delta$ $b :=$ время

конец.

Смысл процедуры а) ясен. Процедура б) указывает: измерить интенсивность люминесценции через промежутки времени τ и приписать переменной Z последнее измеренное значение, если два последовательных измерения отличаются не более, чем на ϵ_2 (предполагается, что это и есть истинное значение интенсивности, см. п. 4-5). Процедура в) предписывает до этого облучить

кристалл. Смысл процедуры г) также ясен.

Напишем, наконец, саму программу.

Начало

одновременно

закреть затвор; установить цель (d) ;

установить уровень $T(\theta)$

конец;

одновременно

включить M ; включить I ; включить T

конец;

$i := 1$; $j := 1$;

для $l := 0$ шаг 1 до L цикл

одновременно

$a[l] :=$ время;

начало

измерить ист. инт. ($l[l], l, \tau, \epsilon_1, \epsilon_2$) ; $\alpha := 0$

конец;

для $i := i$ шаг 1 пока $\alpha = 1$ цикл

фиксировать откл. темп. ($a[i], \theta[i], \theta, \delta$)

конец;

одновременно

выключить M ; выключить I ; выключить T

конец

конец .

Литература.

1. Хомский Н., Три модели описания языка, **Клб. сб.**, вып. 2, ИЛ, 1961, 237 + 266.
2. Шрейдер Э.А., К вопросу об определении основных понятий семиотики, сб. Кибернетику на службу коммунизму, 3, "Энергия", 1966, 261 + 274.
- Черч А., Введение в математическую логику, ИЛ, 1960.
4. Козмидиади В.А., Чернявский В.С., О некоторых понятиях теории математических машин, вып. 2, ФМ, 1962, 128+143.
5. Дijkstra Э.В., Создание машинно независимых языков программирования, сб. Современное программирование, вып. I, "Сов.радио", 1966, 227 + 247.

6. Ефимова М.Н., Алгоритмические языки, "Сов. радио", М, 1965.
7. Давров С.С., Универсальный язык программирования, "Наука", 1964, 1967.
8. Алгоритмический язык АЛГОЛ-60. Пересмотренное сообщение, "Мир", 1965.
9. Шрейдер Ю.А., О понятиях обобщенного программирования, сб. Вопросы теории математических машин, вып. 2, ФМ, 1962, 122 + 127.
10. Gill S., Parallel programming, Comp. J., 1958, 1, 2+10.
11. Ледли Р.С., Программирование и использование ЦВМ, "Мир", 1966.
12. Сб. Автоматизация программирования, под ред. Ершова А.П., ФМ, 1961.
13. Трахтенгерц Э.А., Языки программирования, Автоматика и телемеханика, 1965, 26, № 6, III5 + III30.
14. Альфа-система автоматического программирования, под ред. Ершова А.П., изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1965, "Наука" СО, 1967.
15. Ершов А.П. и др., Входной язык для систем автоматического программирования, изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1964.
16. Парнас Д.Л., Язык для описания функций синхронных систем, ЭИ Выч. техника, 1966, № 19, I + II.
17. Knuth O.E., McNeley J.L., A formal definition of SOL, IEEE Trans EC 1964, 13, N 4, 409 + 414.
18. Каминин С.С., Любимский Э.З., Алгоритмический машинно-ориентированный язык АЛМО, Алгоритмы и алгоритмические языки, вып. I, изд. ВЦ АН СССР, 1967.
19. Дал О.И., Нигард., Симула - язык для программирования и описания систем с дискретными событиями, Алгоритмы и алгоритмические языки, вып. 2, изд. ВЦ АН СССР, 1967.
20. Opler A., Requirements for Real Time Languages, Comm ACM, 1966, 9, N 3, 196 + 199.
21. Трахтенгерц Э.А., Запись алгоритмов контроля, Приб. и средства автоматки, 1964, № 5.
22. Оплер А., Новые направления в разработке средств математического обеспечения 1960 + 1966, Proc IEEE 1966, 54, № 12, 147 + 154.

23. Минский М., Библиография по искусственному разуму, сб. Вычислительные машины и мышление, "Мир", 1967, 475 + 546.
24. Hreskey H. On introduction to procedure - oriented languages, Adv. Comp., 1964, № 5, 349 + 377.

ГЛАВА 5

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ В ДИСКРЕТНЫЕ.

§ 1. Требования, предъявляемые к аналого-цифровым преобразователям.

1.1. Информация о состоянии контролируемого и управляемого физического процесса поступает от датчиков большей частью в виде электрических аналоговых напряжений или токов. Датчики дискретного типа в физическом эксперименте встречаются сравнительно редко, например, датчики, выходным параметром которых является частота.

Для ввода в цифровую вычислительную машину аналоговая величина должна быть преобразована в цифровую форму.

В свою очередь команды управления физическим процессом поступают от электронной вычислительной машины в виде числового кода, который необходимо преобразовать в аналоговую форму сигнала управления исполнительными органами.

Как аналого-цифровое, так и обратное цифро-аналоговое преобразование осуществляется соответствующими преобразователями, методам построения которых посвящается настоящая глава.

Так как преобразователь, кроме тех случаев, когда он работает в качестве независимого измерительного прибора, например, цифрового вольтметра, является согласующим звеном в системе между машиной и датчиками или исполнительными органами, требования предъявляемые к преобразователям определяются как теми, так другими.

1.2. Рассмотрим требования, предъявляемые к аналого-цифровым преобразователям:

Со стороны датчика требуется:

1. Достаточно высокая разрешающая способность - наименьшее приращение переменной величины, которое может быть однозначно отсчитано. Точность преобразования зависит от числа фиксированных уровней преобразователя. Анализ погрешностей кодирования см. в /1, 2/.

2. Высокая чувствительность, характеризующаяся минимальным уровнем сигнала, на который реагирует измерительный прибор. В условиях работы с высокоомными датчиками, напр., с фотоэлектронными умножителями, решающей является чувствительность по току. В случае работы с низкоомными датчиками, напр., термомпарами, более важной является чувствительность по напряжению.

3. Высокое входное сопротивление, необходимое для обеспечения требуемой чувствительности по току.

4. Соответствующая частота, с которой прибор может производить непрерывные независимые измерения и предоставить их результаты для считывания электронной вычислительной машиной, т.е. скорость измерений или число преобразований в секунду. Скорость измерения должна быть строго согласована с быстродействием арифметического блока машины, а, в случае применения буквопечатающего аппарата или перфоратора, со скоростью последних, и, что еще более важно, с частотным спектром преобразуемого сигнала.

Вопрос о выборе необходимой частоты преобразования и максимально допустимом времени квантования более подробно рассматривается в /1, 2/.

5. Возможность гальванического разделения входа и выхода преобразователя: это требование обусловлено тем, что при использовании преобразователя в многоканальной измерительной системе часто оказывается, что датчики измеряемых величин и измерительная система не имеют общей точки.

6. Фильтрация переменной составляющей частоты сети и ее гармоник, наложенных на постоянную составляющую сигнала датчика, должна производиться без применения индивидуальных пассивных сглаживающих фильтров.

7. Изменения температуры окружающей среды, старение электроэлементов и внешние помехи (например, колебания частоты сети) не должны оказывать влияния на точность преобразования.

8. Система должна быть надежной. В случае возникновения сбоев в работе преобразователя, должны быть приняты меры по предотвращению попадания ложной информации в ЭВМ.

9. В некоторых случаях преобразователь должен работать как с

положительными, так и с отрицательными входными уровнями. Обычно требуется автоматическое определение знака входного сигнала. Ю. В случае применения многоканального коммутатора, входные параметры преобразователя должны быть согласованы с параметрами коммутатора, а работа преобразователя синхронизована с коммутатором.

1.3. Со стороны электронной вычислительной машины предъявляются следующие требования.

1. Выходной код преобразователя по возможности должен совпадать с кодом машины. Если же машина работает в двоичном коде, а преобразователь в двоично-десятичном коде, все преобразователи, работающие в данной системе, должны работать в одном и том же двоично-десятичном коде. В данном случае придется иметь только одну подпрограмму для ввода двоично-десятичного кода в ЭВМ. Если преобразователь предусмотрен для работы только с машиной, в этом случае предпочтителен двоичный код, как наиболее простой для конструкций преобразователя ввода в машину. Если же предусматривается работа преобразователя также в качестве независимого цифрового измерительного прибора с отчетом на цифровых индикаторах, приходится пользоваться двоично-десятичным кодом, удобным для дешифрации в десятичный код.

2. Результат измерения, включая знак, должен быть представлен в положительной или отрицательной логике в зависимости от требований ЭВМ. При положительной логике "1" в данном разряде соответствует более высокий уровень на соответствующем выходе, "0" соответствует более низкий уровень. Знак "+" изображается в виде "1" в разряде знака. В отрицательной логике "1" соответствует низкий уровень "0" - более высокий уровень.

3. Уровень на выходах преобразователя и допустимые токи нагрузки должны быть достаточными для однозначного считывания кода машины.

4. С целью устранения ложных отсчетов, считывание должно быть заблокировано запрещающим уровнем в одном из разрядов на время преобразования. Разрешение на считывание должно вырабатываться преобразователем только по окончании цикла кодирования.

5. В том случае, когда информация от преобразователя не вводится непосредственно в ЭВМ, а записывается на перфоленте, цифропечатающим устройством или другим медленнодействующим устройством, то, с целью сохранения максимальной скорости работы преобра-

зователя, целесообразно иметь специальный буферный регистр памяти, куда засылается очередной результат измерения.

6. Диапазоны измерений должны переключаться автоматически, автономно или от ЭВМ. В первом случае сигнал о включении того или иного диапазона должен появляться в виде признака в соответствующем разряде регистра памяти.

7. Часто возникает потребность переключения каналов преобразователя с помощью вычислительной машины.

1.4. Из обширного класса аналого-цифровых преобразователей, нами рассматриваются только преобразователи напряжения. Методы преобразования, рассмотренные нами, являются, по мнению авторов, наиболее распространенными или перспективными для кибернетизации физического эксперимента. К таким относятся широко известные в настоящее время методы с промежуточным преобразованием во временной интервал и потенциометрический метод (метод поразрядного кодирования). Из перспективных методов рассматриваются интегрирующий и интегрирующий-потенциометрический методы.

Весьма исчерпывающую обзорную информацию по этим методам можно получить также из /6/.

§ 2. Метод с промежуточным преобразованием во временной интервал.

Метод с промежуточным преобразованием во временной интервал является наиболее простым и дешевым в исполнении.

В наиболее распространенном варианте пилообразное напряжение (рис. 1,2) поочередно сравнивается с потенциалом земли и измеренным входным напряжением U_x . В момент t_1 , равенства мгновенного значения пилообразного напряжения потенциалу земли первый компаратор генерирует импульс совпадения. В момент t_2 равенства мгновенного значения пилообразного напряжения измеряемому напряжению U_x , вторым компаратором вырабатывается импульс. Длина интервала времени $T = (t_2 - t_1)$ оказывается пропорциональной величине измеряемого напряжения и является промежуточным результатом измерения. Очередность прихода импульсов t_1 и t_2 опреде-

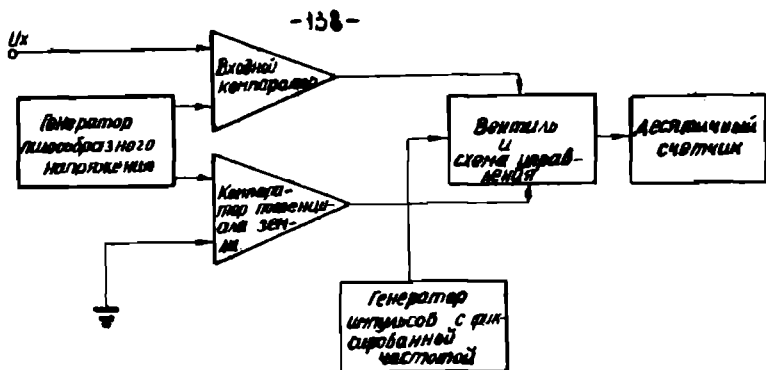


Рис. 1.

В методе с промежуточным преобразованием во временной интервал напряжение постоянного тока измеряется путем счета числа импульсов, прошедших через вентиль за интервал времени $T = t_2 - t_1$, в течение которого пилообразное напряжение возрастает от потенциала земли до уровня U_x или наоборот.

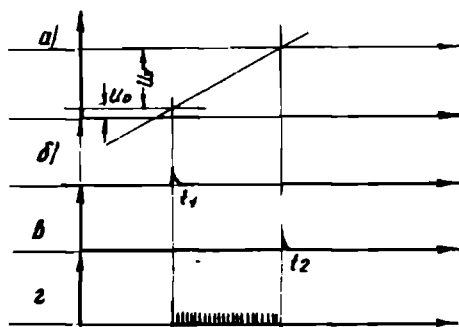


Рис. 2.

Временные диаграммы вольтметра, время - импульсного преобразования:

- а) сравнение опорного и положительного измеряемого напряжения
- б) импульс от компаратора потенциала земли
- в) импульс от входного компаратора
- г) серия импульсов на входе счетчика.

дает знак входного напряжения. Так, при положительном входном напряжении первым срабатывает компаратор потенциала земли, вслед за ним компаратор U_x . Первый импульс любого из компараторов открывает клапан, пропускающий на десятичный счетчик импульсы постоянной частоты. Клапан закрывается вторым импульсом. Число импульсов, прошедших за время строба T , также пропорционально величине напряжения U_x . При соответствующем подборе крутизны пилообразного напряжения и частоты следования импульсов, показания индикаторов счетчика будут давать величину U_x непосредственно в вольтах.

Типичный пример реализации метода можно найти в /4/.

Точность метода не превышает 0,05% при быстродействии в лучших образцах до 100 преобразований в секунду. При более высоком быстродействии, например, 1000 преобразований в секунду достигаемая точность соответственно понижается до 0,2% /2/. Основными узлами прибора, влияющими на его точность, являются генератор пилообразного напряжения (нестабильность крутизны и нелинейность пилы), схема сравнения (неточность определения момента равенства пилообразного и входного напряжений, и пилообразного и опорного напряжений) и генератор образцовой частоты. Входное сопротивление полупроводниковых компараторов также бывает не высоким $\ll 1$ мегаом. Порог чувствительности составляет десятки милливольт. Если измеряемый сигнал содержит значительную компоненту шума, результат измерения может сильно отличаться от действительного значения измеряемой постоянной составляющей (рис. 3).

Как уже отмечалось, метод отличается сравнительной простотой схемы и надежностью. Он может найти применение в тех случаях, когда нет высоких требований к точности преобразования, например, для кодирования выходного напряжения аналоговых электронных измерительных приборов, а также при использовании многоканальной измерительной аппаратуры параллельного типа.

В последнем случае преобразователь содержит индивидуальный компаратор в каждом канале и общий генератор пилообразного напряжения. Каждый из компараторов сравнивает уровень собственного канала с пилообразным опорным напряжением. В течение одного такта измерения производится опрос всех каналов. Порядок выдачи ответных сигналов от компараторов зависит от величины уровня в соот-

ответствующем канале. Вначале получается код, соответствующий самому малому напряжению, затем следующему по величине и в конце цикла преобразования соответствующий самому большому напряжению. Для того, чтобы определить к какому каналу относится считанный код, используется сигнал компаратора канала, подаваемый в вычислительную машину.

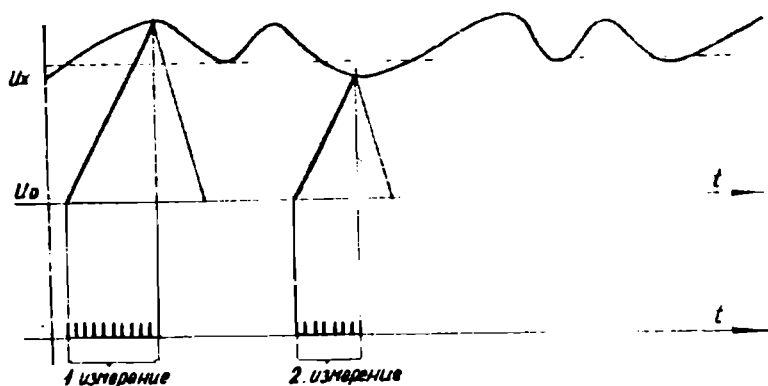


Рис. 3.

В случае измерения зашумленного сигнала методом с промежуточным преобразованием во временной интервал, результат зависит от момента запуска генератора пилообразного напряжения.

§ 3. Потенциометрический метод.

Аналого-цифровой преобразователь, действующий по этому принципу /1, 2, 6, 7, 8/, обычно представляет собой замкнутую систему (рис. 4). Входное напряжение U_x сравнивается с компенсирующим напряжением U_n , поступающим из цепи обратной связи. Компенсирующее напряжение U_n вырабатывается дискретным потенциометром (ДП), состоящим из прецизионного источника опорного напряжения и резистивного делителя напряжения. По сути дела, ДП является кодо-аналоговым преобразователем. Управляется ДП специальным логическим устройством. Выходное напряжение

нуль-индикатора используется в качестве входного сигнала для логического программирующего устройства, которое управляет переключением сопротивлений в дискретном потенциометре в установленной последовательности, обеспечивая ступенчатое увеличение или уменьшение выходного напряжения ДП до тех пор, пока (в пределах чувствительности нуль-индикатора) не будет скомпенсировано напряжение U_x . Окончательное положение ДП, определяющее кодовый эквивалент U_x , определяется по состоянию программирующего устройства и считывается вычислительной машиной или после дешифрации может быть выведено на визуальные цифровые индикаторы.

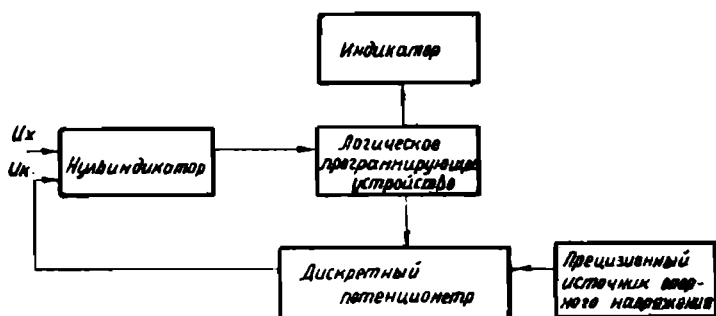


Рис. 4.

В потенциометрическом методе для управления логическим программирующим устройством используется нульиндикатор. Программирующее устройство осуществляет управление дискретным потенциометром так, чтобы скомпенсировать измеряемое напряжение U_x на входе нульиндикатора. Окончательное положение дискретного потенциометра представляется в виде определенного кода, который считывается в программирующем устройстве и используется для индикации результата кодирования.

Действие логического программного устройства поясняется на рис. 5 и 6. Предположим, на вход преобразователя поступает напряжение U_x . Преобразователь работает в двоичном коде, содержит n разрядов, квант преобразования (U_0).

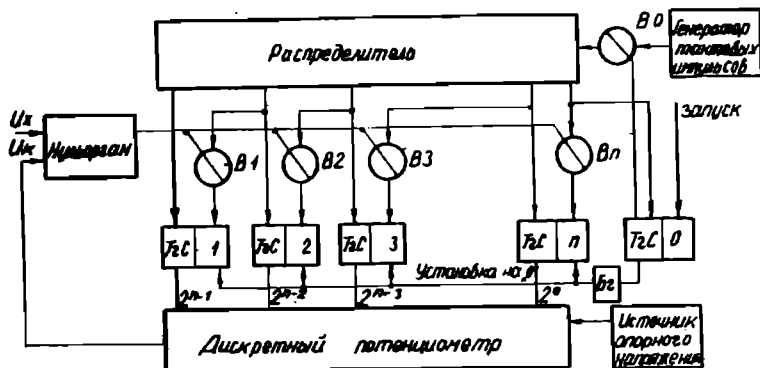


Рис. 5.

Импульсом запуска триггер T_2C0 устанавливается в состояние "I". При этом запускается блокинггенератор B_2 и все разрядные триггера $T_2C1 + T_2Cn$ устанавливаются на "0". Соответствующее компенсирующее напряжение равно 0. Через открытый вентиль $B0$ тактовые импульсы запускают распределитель. Первый импульс распределителя устанавливает триггер T_2C1 в состояние "I". При этом дискретный потенциометр вырабатывает компенсационное напряжение $U_{к1} = 2^{n-1} U_0$, которое сравнивается с U_x . Как видно из рис. 5 $U_{к1} > U_x$ и отличается от последнего на величину больше одного кванта, что является признаком перекомпенсации, поэтому только что включенная ступень дискретного потенциометра должна быть погашена. Нульиндикатор реагирует на перекомпенсацию, отрабатывая на выходной линии потенциал открывающий вентили. Второй импульс распределителя ставит T_2C2 в состояние "I" и через открытый вентиль $B1$ гасит "I" в T_2C1 .

Теперь дискретный потенциометр вырабатывает компенсационное напряжение $U_{к2} = 2^{n-2} U_0$, которое снова сравнивается с U_x . Как видно на рис. 6 на этот раз $U_{к2} < U_x$, что соответствует недокомпенсации, следовательно 2 ступень дискретного потенциометра, должна оставаться включенной. Поэтому нульиндикатор вырабатывает на выходе напряжение запирающее вентили $B1 + Bn$.

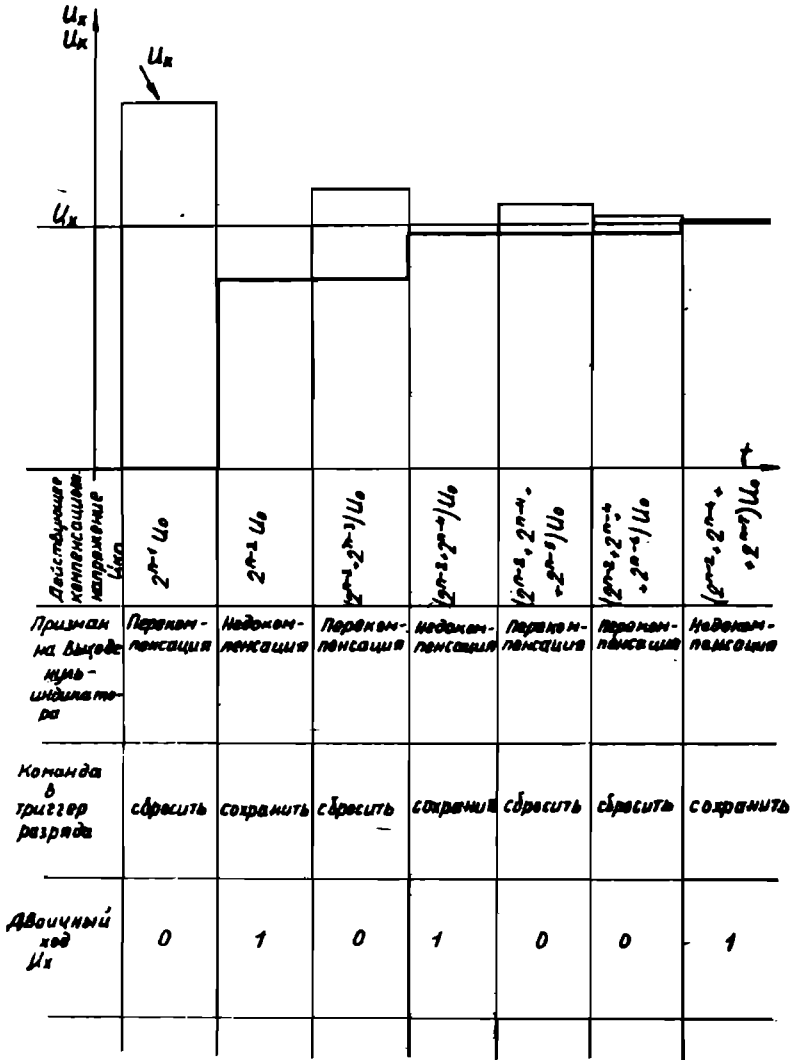


Рис. 6.

Третий импульс распределителя включает T_2C3 , но, так как В2 заперт, T_2C2 остается включенным. Коенсирующее напряжение $U_{кз} = (2^{n-2} + 2^{n-3}) U_0$, выработанное ДП, на этот раз снова приводит к перекомпенсации — реакция нульиндикатора будет аналогична первому случаю. Четвертый импульс включает T_2C4 и гасит T_2C3 и т.д. до последнего импульса распределителя, который проверяет пригодность последней ступени дискретного потенциометра, вырабатывающей $U_{кп} = U_0$, и ставит T_2C0 на "0". ВО запирается — кодирование окончено. Код измеряемого напряжения для ввода в вычислительную машину можно снять с разрядных триггеров T_2C1-T_2Cn . Состояние "0" в T_2C0 может служить разрешающим признаком для ввода кода в машину. Описанный метод известен также под названием метода поразрядного кодирования.

При необходимости визуальной индикации результата применяют двоично-десятичный код. Каждый триггер тетрады имеет свой определенный вес — количество включаемых им квантов U_0 .

Иными словами каждой цифре кода присвоено некоторое определенное значение. Такой код называется взвешенным /24/. В двоично-десятичном коде количество разрядных триггеров и чеек распределителя увеличивается до 4 на каждый десятичный разряд. Для ввода в машину требуется специальная программа, преобразующая двоично-десятичный код в двоичный. Ввиду того, что одно плечо ДП управляется цифровым кодом N , а второе — его инвертным значением \bar{N} , в десятичных тетрадах триггеров потенциометрического метода могут найти применение только дополнительные коды, т.е. коды, в которых дополнение до 9 рассматриваемой десятичной цифры может быть получено простой заменой 0 на 1, и наоборот, в кодовом представлении этой десятичной цифры. Напр., в коде 2421 два дополнительных десятичных числа 6 и 3 представлены, соответственно, комбинациями 1100 и 0011. Количество дополнительных кодов довольно большое, напр., 2421, 4221, 5211, 3321 и т.д. Однако с точки зрения помехоустойчивости наиболее подходящими являются коды 2421 и 5121. Вопрос выбора кода потенциометрического преобразователя подробно рассмотрен в /9,10/.

Основным узлом АЦП потенциометрического типа является нульиндикатор /1, 2, 18/. В качестве нульиндикатора обычно приме —

няются усилители ПТ с модуляцией, усилители ПТ с автоматической коррекцией дрейфа, а также импульсные усилители. К нему предъявляются весьма жесткие требования:

- 1) высокая чувствительность, т.к. последняя определяет минимальный диапазон измерения из условия обеспечения заданной точности. Чувствительность нуляиндикатора непосредственно связана с дискретностью преобразования. Так как нуляиндикатор имеет релейную характеристику, при подаче на вход напряжения равного одному кванту, нуляиндикатор должен отработать полное выходное напряжение;
- 2) высокое входное сопротивление, обеспечивающее минимальное шунтирование измерительной цепи;
- 3) способность к большим перегрузкам;
- 4) высокая стабильность;
- 5) малая статическая и динамическая погрешности;
- 6) достаточно высокое быстродействие. Это требование трудносовместимо со вторым требованием, т.к. высокое входное сопротивление совместно с паразитной входной емкостью нуляиндикатора образует входную цепь с большой постоянной времени, определяющую верхний предел частоты кодирования.

Примером оптимального решения нуляиндикатора, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям может служить нуляиндикатор цифрового вольтметра **DM2020** английской фирмы **Digital Measurements**, принцип работы которого показан на рис. 7. Работа подобной схемы описана также в /36/.

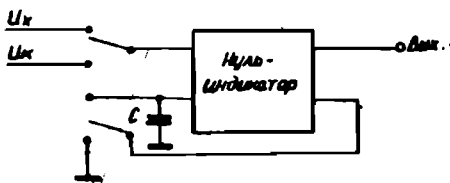


Рис. 7.

Нуляиндикатор имеет дифференциальный вход. Измерения в данном случае состоят из 2 тактов: накопления и кодирования. Выброспреобразователь показан в положении накопление. Входное напряжение U_x приложено к одному из входов нуляиндикатора, конденсатор C заряжается до напряжения $U_{\text{вн}}$ пропорционального сумме напря-

жения на входе и дрейфа. В следующем такте к первому входу приложено компенсирующее напряжение от низкоомного ДП, поэтому процесс компенсации протекает с ничтожными постоянными времени; второй вход остается подключенным к емкости C , заряженной до того же $U_{вых}$. Производится компенсации напряжения на конденсаторе. Основное преимущество схемы заключается в сильном ослаблении напряжения дрейфа. Кроме того, в случае высокоомного источника U_x схема отличается большим быстродействием.

Дальнейшее ускорение потенциометрического метода может быть достигнуто использованием неравномерного кодирования во времени, предложенного в /19/.

Чувствительность и быстродействие нуля-индикатора во многом зависит от качества вибропреобразователя, который практически является единственным ключевым элементом, применимым в высокоомных нуляиндикаторах. Чувствительность определяется шумами вибропреобразователя и наводками вносимыми катушкой намагничивания.

Не менее важным узлом АЦП является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) цепи обратной связи (применяют также термин преобразователь код-напряжение). В практике управления физическим экспериментом этот узел находит самостоятельное применение для преобразования закодированной информации в пропорциональное по величине напряжение.

В литературе, например, /3, 42/, описано большое количество таких преобразователей. ЦАП, суммирующие напряжения, содержат определенное число независимых генераторов напряжения, включенных последовательно. Управление генераторами осуществляется с помощью ключей. Включением соответствующего набора генераторов на выходе получают напряжение, пропорциональное заданному коду. Недостатками этого типа преобразователей являются:

- необходимость наличия n - разрядных генераторов, точность и стабильность которых определяет достижимую точность преобразователя;
- коммутирующие ключи соединены последовательно, что значительно повышает предъявляемые к ним требования, т.к. погрешности ключей суммируются. Это обстоятельство также затрудняет применение бесконтактных ключей.

К ЦАП этого типа можно отнести и генераторы ступенчатого напряжения. Некоторые из них, например, ЦАП выполненный на туннельных диодах [747], отличаются высоким быстродействием.

Вторым большим классом ЦАП являются делители напряжения. Их преимуществом является необходимость только одного источника питания. В зависимости от применяемых элементов различают резистивные и индуктивные делители напряжения.

В простейшем случае резистивный делитель напряжения представляет собой реостат с определенным числом фиксированных положений. Количество этих фиксированных положений определяет разрешающую способность делителя. Многозарядные делители напряжения можно построить с последовательным или параллельным соединением зарядов. В первом случае действие делителя основано на суммировании сопротивлений, во втором — на суммировании проводимостей. Применение делителей последовательного типа рис. 8 невыгодно, так как они требуют почти в два раза больше резисторов и ключей, чем делители параллельного типа. Кроме того, для них характерны все недостатки, присущие уже рассмотренным ЦАП на генераторах напряжения.

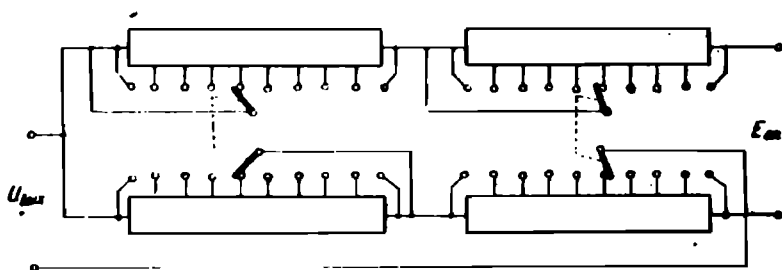


Рис. 8.

Параллельные делители (они же - звездообразные потенциометры) лишены почти всех недостатков предыдущих типов. На рис. 9 показаны основные схемы звездообразных потенциометров. На рис. 9а показан делитель, обладающий так называемой структурной погрешностью.

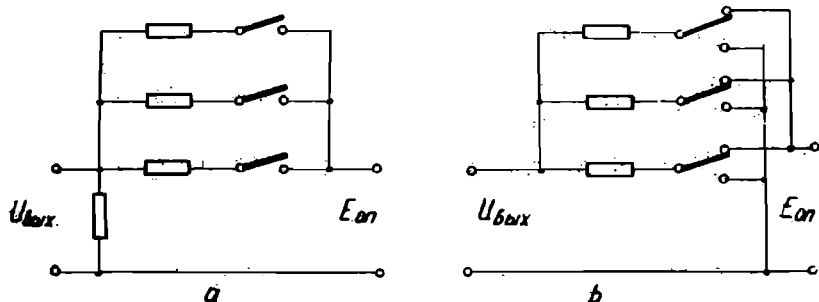


Рис. 9.

Последняя выражается в том, что подключая l -ую проводимость, приращение напряжения на выходе зависит не только от R_l , но также и от положения других ключей. (см. лит./3, 42).

Построение точных делителей возможно только с применением переключающих ключей, см. рис. 9 и 10. В таком делителе разрядная проводимость подключается либо к источнику опорного напряжения, либо к земле. Математический анализ схемы доказывает принципиальную возможность построения точных делителей напряжения. Параллельные делители отличаются меньшим числом требуемых точных резисторов, облегченными требованиями к ключам, простотой управления, что привело к тому, что в настоящее время почти все ЦАП на резисторах строятся в виде звездообразного делителя. Изменение диапазона выходных напряжений в N раз достигается шунтированием выходов делителя резистором

$$r_{ш} = \frac{R_{вых}}{N-1}$$

где $R_{вых}$ - выходное сопротивление делителя. Недостатком звездообразного делителя является зависимость входного сопротивления

от положения ключей, что приводит к более жестким требованиям к источнику опорного напряжения, особенно в случае низкоомного делителя.

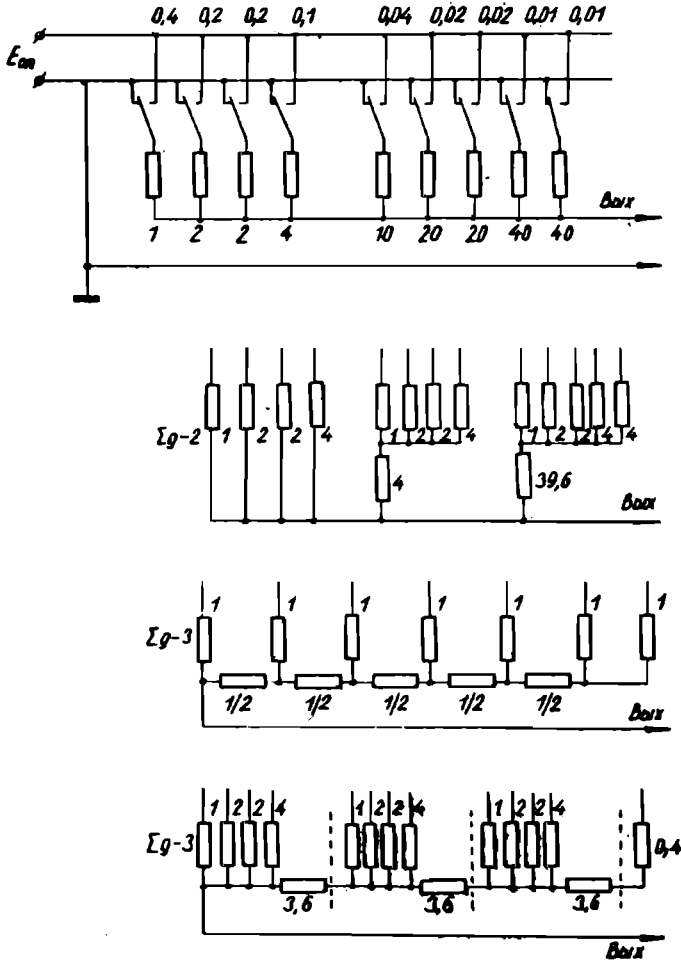


Рис. 10.

В качестве переключателей могут быть использованы как контактные, так и бесконтактные элементы. Обычные контактные элементы обладают недостаточным быстродействием, надежностью и сроком службы. Эти недостатки в значительной степени устранены в магнитно-управляемых контактах (МУК). Наиболее широкое применение в ЦАП находят транзисторные ключи, обладающие высоким быстродействием, надежностью и хорошими ключевыми характеристиками. На рис. II показана блок-схема трехдекадного звездообразного потенциометра с транзисторными ключами, на рис. I2 принципиальная схема одного переключающего ключа с триггером управления.

Транзисторный ключ может управляться триггером через усилитель - инвертор. В этом случае уменьшается нагрузка триггера, однако увеличивается число элементов. Естественно, что транзисторные ключи вносят дополнительные погрешности, которые определяются непостоянством остаточного сопротивления r_0 открытого транзистора и остаточным напряжением U_0 этого же транзистора. В целях уменьшения r_0 и U_0 как правило используют схему включения транзистора с общим коллектором. Лучшими отечественными ключевыми транзисторами являются П29, П30, П38А и П42Б.

Транзисторными ключами можно коммутировать как положительные, так и отрицательные напряжения, а также синусоидальное напряжение. Во всех случаях важно, чтобы цепи управления ключом обеспечивали глубокое насыщение транзистора в открытом состоянии и его полное запираение в закрытом состоянии.

Точность ЦАП зависит от стабильности источника опорного напряжения. Последний должен обладать также достаточно широкой частотной характеристикой и, как уже упоминалось выше, в случае применения параллельного делителя, низким выходным сопротивлением. В менее точных приборах допустимо применение ртутных элементов типа ОР-3К, ОР-4 и РО-4. Эти источники при токе разряда менее 50 мкА не могут обеспечить длительную стабильность лучше 0,1%. Лучшими показателями отличаются компенсационные стабилизаторы напряжения с термокомпенсацией. Тщательной регулировкой можно добиться нестабильность выходного напряжения меньше 0,01% в диапазоне температур +15° + 40°С /43, 44, 45/.

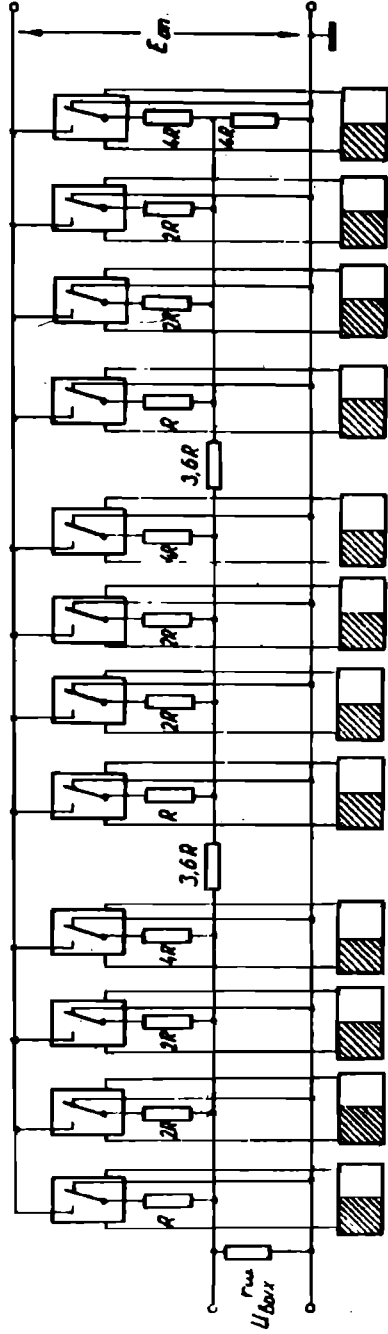


FIG. II.

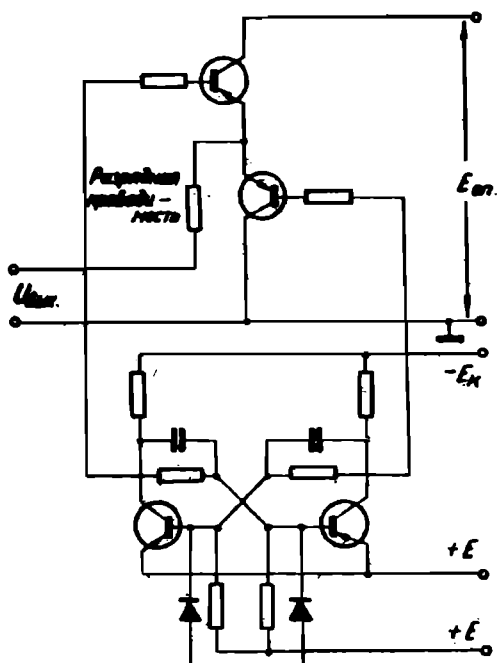


Рис. 12.

Лучшими частотными характеристиками отличается источник опорного напряжения с компенсацией дрейфа по методу Принца /16, 17/. Кроме того, эта схема позволяет получить опорное напряжение обеих клемм бесконтактной коммутацией.

В преобразователях хвостового класса точности в последнее время все более широкое применение находят индуктивные делители напряжения /46, 48, 50/. Конкретная схема такого преобразователя описана в /49/.

В качестве распределителя в потенциометрическом АЦП можно применить регистр ферритранзисторных ячеек (при условии постоянного шага квантования во времени), а также регистр из

заторможенных мультивибраторов, схему рис. 13 (схема особо удобна в случае переменного шага квантования) и др.

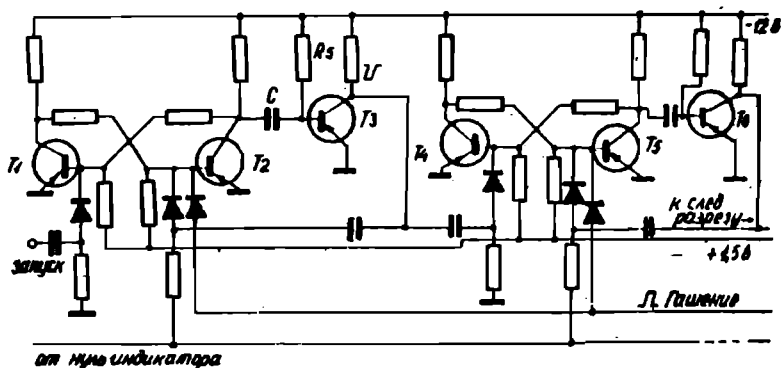


Рис. 13.

Схема сдвига по времени разрядных триггеров. Сдвигающим элементом являются инверторы T_3 , T_6 и т.д. После включения первого разрядного триггера импульсом запуска, благодаря заряду на C запирается T_3 . Время закрытого состояния T_3 зависит от постоянной времени $R_5 C$. Отпираясь, T_3 положительным фронтом запускает второй триггер и в зависимости от команды нуля индикатора выключает или не выключает первый триггер.

В одноканальных преобразователях измеряющих медленноменяющиеся напряжения, например, в преобразователях работающих с термопарами более выгодным может оказаться другой вариант **аналого-цифрового** преобразователя: метод с накопительным счетчиком /1/ или метод следящего преобразования. В отличие от поразрядного кодирования, в котором каждое новое измерение осуществляется опробованием всех кодирующих разрядов, начиная со старшего; в методе с накопительным счетчиком дискретный потенциометр подключен к реверсивному двоично-десятичному счетчику, в котором запоминается результат предыдущего измерения. Следующим запуском осуществляется только измерение и

суммирование или вычитание разности напряжений между вторым и первым измерением. Так как при этом не надо повторять заново все кодирование, сокращается время преобразования. Очень легко осуществить следящий режим преобразователя, т.е. АЦП запускается только в том случае, если входная величина изменилась больше чем на 1 квант.

Если кодирование осуществляется в двоично-десятичном коде, для нормальной работы дискретного потенциометра счетчик также должен работать в дополнительном коде.

Наконец в том случае, когда входная величина имеет различный характер изменения (рис. 14) целесообразно применение адаптивного преобразователя с переменным алгоритмом, что обеспечивает наибольшее быстродействие [23]. После включения входного напряжения или после резких скачков последнего, прибор работает в режиме поразрядного кодирования. Если же входная величина меняется плавно, режим работы выбирается следящим.

Точность измерения и стабильность потенциометрического преобразователя зависят от качества источника опорного напряжения и дискретного потенциометра. При современном уровне развития техники производства элементов могут быть созданы низкочастотные АЦП с погрешностями 0,01% при полном времени преобразования 15-30 мсек (двоичный код), что приближается к скорости работы ЦВМ. При точности порядка 0,5% скорости могут быть еще большими. Однако скорость сильно падает в случае повышения входного сопротивления. Фирма Dymaco Instruments (Англия) выпускает нестизначный цифровой вольтметр ДМ 2010 с индуктивным делителем, точностью не хуже 0,001%, входным сопротивлением в 1 вольтовой шкале 25 ом и временем преобразователя 440 мсек.

Подобно методу с промежуточным преобразованием во временной интервал, потенциометрический метод малоприменим для измерения быстроизменяющихся и зашумленных сигналов. В последнем случае приходится прибегать к фильтрации входного напряжения. Обычно применение входного фильтра нежелательно, поскольку вносимая им инерционность уменьшает максимальную скорость измерения. В приборах с высокой разрешающей способностью

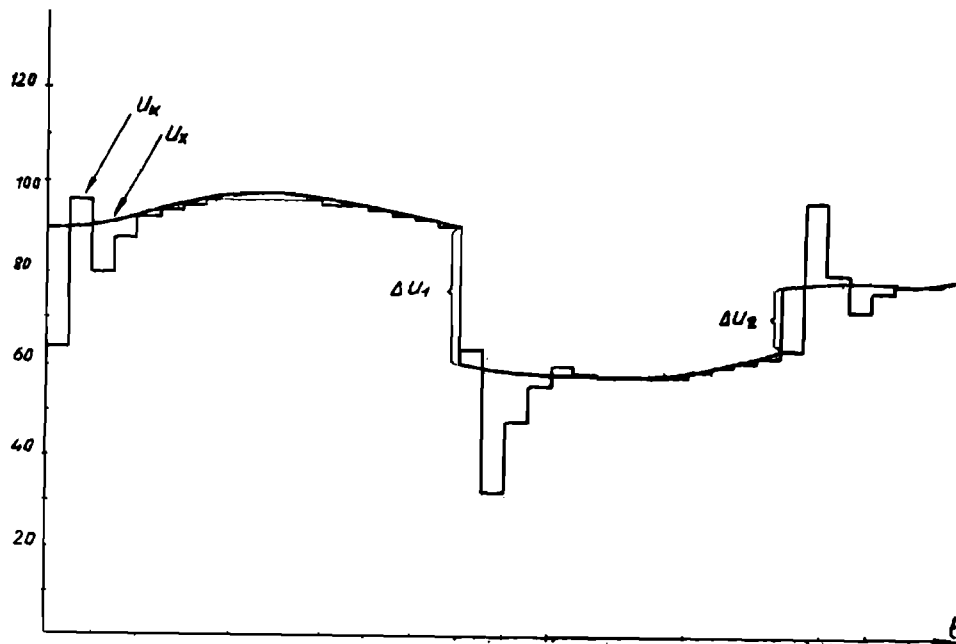


Рис. 14. Адаптивный измерительный прибор меняет способ уравнивания (с поразрядного на следящий и наоборот) в зависимости от характера изменения входного сигнала.

конденсаторы фильтра могут быть источниками напряжения с высоким внутренним сопротивлением. Вследствие поляризации диэлектрика они будут создавать напряжения на входе прибора после снятия измеряемого входного напряжения и снижать точность измерения, т.к. к следующему измеряемому входному сигналу добавится небольшая составляющая напряжения постоянного тока.

§ 4. Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи.

Замечательным свойством интегрирующих АЦП является способность ослаблять наложенные на входной сигнал периодические помехи без применения входных фильтров. Интегрирующий АЦП измеряет среднее значение входного напряжения на определенном интервале времени $/6, 26, 21/$. Работа одного из вариантов интегрирующего АЦП показана на рис. 15.

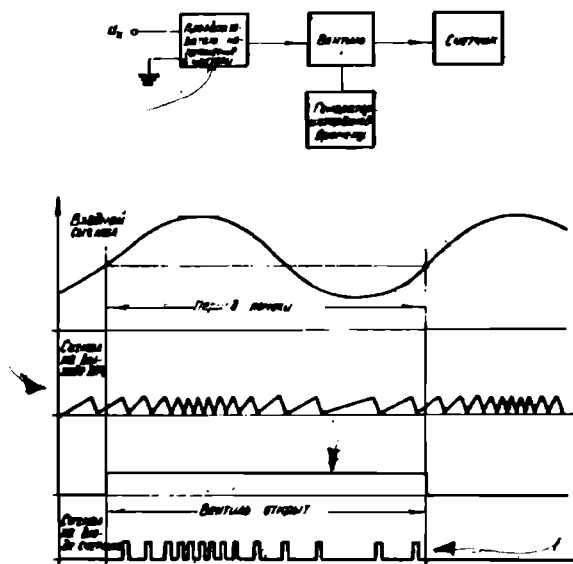


Рис. 15.

В интегрирующем АЦП неизвестное входное напряжение преобразуется в пропорциональную частоту повторения импульсов, которые затем считываются на фиксированном интервале времени.

Входное напряжение преобразуется в пропорциональную частоту, которая проходит на счетчик импульсов в течение калиброванного отрезка времени. Количество сосчитанных импульсов представляет собой числовой эквивалент измеряемой величины. Схема преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ) показана на рис. 16.

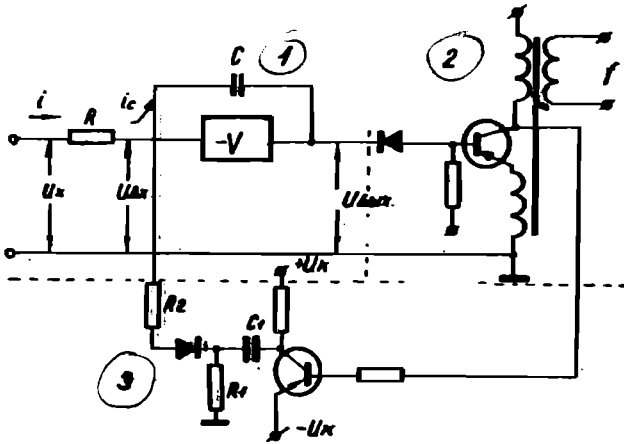


Рис. 16.

В преобразователе напряжения в частоту входной сигнал поступает в интегрирующий усилитель 1, за выходным уровнем которого следит амплитудный дискриминатор 2. При достижении уровня срабатывания дискриминатора формирователь компенсирующих импульсов 3 в цепи обратной связи обрабатывает импульс с постоянным зарядом, который компенсирует заряд интегрирующей емкости интегратора.

Схема работает по принципу компенсации заряда интегрирующей емкости. Она состоит из интегрирующего усилителя 1, амплитудного дискриминатора 2 и формирователя компенсирующих импульсов 3. Усилитель работает по принципу интегратора Миллера с интегрирующей емкостью в цепи обратной связи.

Как показано в /26/, выходное напряжение $U_{вых}$ такого усилителя

$$U_{вых} = -\kappa U_x [1 - e^{-\frac{t}{(1+\kappa)RC}}] + U_0 e^{-\frac{t}{(1+\kappa)RC}},$$

где U_x - входное напряжение, κ - коэффициент усиления, U_0 - выходное напряжение интегратора в начальный момент времени.

Выходное напряжение представляет собой экспоненциальную функцию с постоянной времени $RC(1+\kappa)$. После несложных преобразований и введения некоторых допущений получим

$$U_{вых} - U_0 = -\frac{\kappa}{1+\kappa} \cdot \frac{U_x - U_0 \kappa}{RC} \cdot t,$$

т.е. линейность интегратора тем выше, чем выше κ . При $\kappa \rightarrow \infty$

$$U_{вых} - U_0 = \frac{U_x}{RC} t,$$

заряд на интегрирующем конденсаторе

$$q = \int_0^t \frac{U_x}{R} dt = (U_{вых} - U_0) C$$

Время t , в течение которого значение выходного напряжения $U_{вых}$ достигает порогового значения $U_{ср}$,

$$t = \frac{U_{ср} - U_0}{U_x} \cdot RC$$

Если выходное напряжение интегратора достигает амплитуды, равной порогу срабатывания дискриминатора 2, последний выдает импульс, запускающий формирователь компенсирующих импульсов 3. Последний обрабатывает импульс с постоянным зарядом. Заряд q_k на дифференцирующем конденсаторе

$$q_k = U_k C_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_k C_1 S_1,$$

где U_k - компенсирующее напряжение, S - коэффициент передачи делителя.

Заряд q_k подается на вход интегрирующего усилителя, в результате чего заряд интегрирующей емкости C уменьшается. Если процесс установившийся, то оба заряда одинаковы по абсолютной величине, но различны по знаку.

$$q = q_n = \frac{U_n}{R} \cdot t = U_n C_1 S ; \quad t = \frac{U_n C_1 S R}{U_n}$$

и частота следования выходных импульсов

$$f = \frac{U_n}{U_n C_1 S R} = \frac{U_n}{q_n R}$$

Из последнего видно, что в выражение для частоты не входят значения емкости интегрирующего конденсатора и уровня срабатывания дискриминатора. Это является достоинством метода, т.к. медленные изменения обеих величин не приводят к возникновению погрешностей. Мгновенные же изменения их мало вероятны и могут вызвать только колебания фазы импульсов. Из последнего выражения также видно, что жесткие требования должны быть предъявлены к стабильности сопротивления R и заряда q_n , т.е. напряжения U_n .

Интегрирование входного сигнала и усреднение шумов понятно из рис. 17.

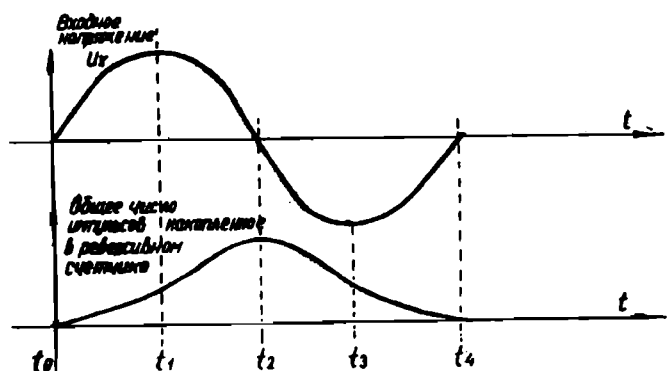


Рис. 17.

Интегрирующий АЦП отличается хорошей помехоустойчивостью, если время интегрирования четко периоду вышней гармоники помехи, т.к. входной сигнал переменного тока усредняется реверсивным счетчиком. В течение одного полупериода помехи счетчик суммирует импульсы ПНЧ, а в течение другого полупериода вычитает. В результате окончательное показание счетчика равно нулю.

Выбор начального момента времени t_0 по отношению к сигналу U_x несуществен. Частота выходного сигнала, генерируемого ПНЧ, пропорционально мгновенному значению U_x . Число N , накопленное в счетчике к моменту времени t_2 , является средним значением сигнала $U_x(t)$ за первый полупериод, т.е. сигнал $U_x(t)$ проинтегрирован на интервале времени от t_0 до t_2 . Если прибор сконструирован так, что может реагировать на изменение полярности сигнала в момент времени t_2 (для этого схему рис. 16 необходимо дополнить) и имеет реверсивный счетчик, процесс интегрирования может быть продолжен на интервале времени от t_2 до t_4 . Тогда в момент времени t_4 , $N=0$.

Характеристика зависимости коэффициента ослабления помех от частоты приведена на рис. 18. Для тех частот, которые кратны интервалу интегрирования $1/T$, имеет место бесконечное ослабление помех. Поскольку обычно наиболее сильной составляющей помех на входе АЦП бывает помеха с частотой сети, величину времени измерения T выбирает равной $\frac{n}{50}$ сек, где n — целое число. Такой прибор полностью ослабляет составляющие входного сигнала с частотой сети и ее высшими гармониками.

Из рис. 18 вытекает еще важное применение интегрирующего метода. Так как с увеличением интервала времени T низкие частоты ослабляются в большей степени, эффективная полоса шумов АЦП при этом сужается. Поэтому в области низких частот вплоть до нулевой частоты помехи и шумы заметно ослабляются, что позволяет повысить чувствительность прибора.

Напр., вольтметр имеет длительность интервала измерения $T = 20$ мсек и собственные шумы усилителя в результирующей эффективной шумовой полосе около 10 мкв. Если увеличить T до 200 мсек, можно ожидать, что уровень шумов усилителя в более узкой эффективной шумовой полосе снизится до 4 мкв. Это дает возможность осуществить измерение слабых сигналов за счет снижения скорости измерения.

Скорость измерения интегрирующим методом ограничивается не только нижней составляющей спектра шумов, но также предельными возможностями ПНЧ. Последние обычно дают на выходе частоту не выше 500 кгц. В пятизначном АЦП, например, максимальное показание соответствует накопленному в счетчике числу импульсов $N=10^5$. Видимо необходимое время накопления в данной слу-

чае составит не менее $\frac{10^5}{5 \cdot 10^3} = 20$ сек. Таким образом, если не считаться с дополнительными затратами времени, требуемого, напр., для переключения диапазона, каналов и т.д., максимальная скорость измерения в данном случае не превышает 5 измерений в секунду.

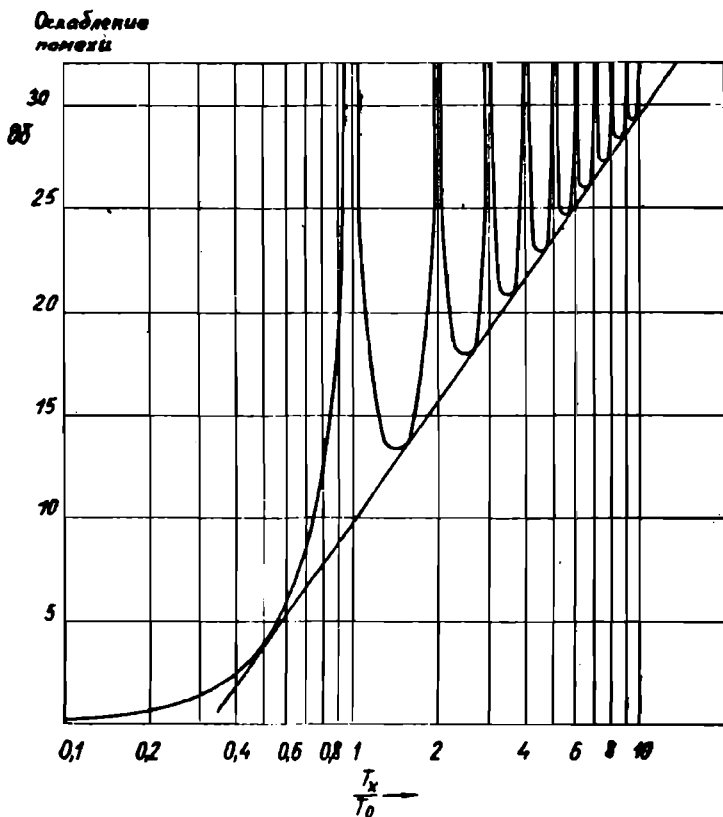


Рис. 18.

Точность интегрирующего АЦП зависит от точности формирования сигнала измерения T , и линейности передаточной кривой ПЧ. Длительность интервала измерения T может задаваться

с очень высокой точностью при использовании кварцевого времени. Обеспечение линейности преобразования напряжения в частоту затрудняется с ростом частоты и с увеличением максимальной выходной частоты ПНЧ. Реально точность достигаемая только что приведенным методом не превышает 0,05% /26/.

Описанный вариант не является единственным интегрирующим методом преобразования. В литературе описано большое число интегрирующих преобразователей с промежуточным преобразованием в длительность импульса /27, 32/. Хорошие результаты дает метод двойного интегрирования, описанный в /28, 29/, /33/. В последнем случае возможно применение ПНЧ на базе ферромагнитного элемента с прямоугольной петлей гистерезиса /34, 35/. Такой ПНЧ отличается простотой исполнения и высокой надежностью.

Большие перспективы для развития АЦП представляет применение твердых схем. Применение последних позволяет повысить надежность, сократить вес, размеры и стоимость аппаратуры. Для твердосхемного исполнения наиболее подходящим является интегрирующий метод /25, 28, 29/.

Кроме того, метод предложенный в /25/ может оказаться очень ценным для преобразования тока, например, от фотоэлектронного умножителя, см. рис. 19. Схема работает следующим образом: импульс запуска через триггер интегратора и входной триггер включает Π_2 на заряд емкости C током ФЭУ. В тот же момент открывается вентиль, и счетчик начинает счет импульсов f_0 .

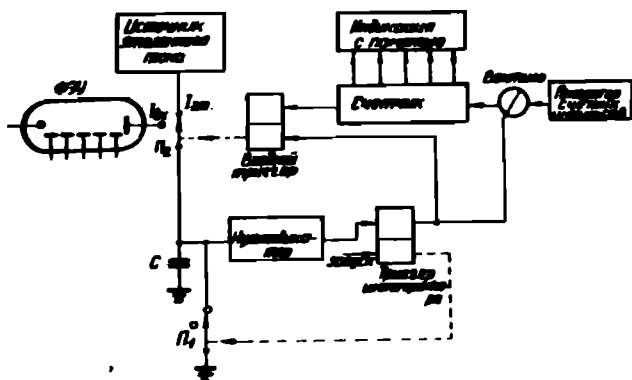


Рис. 19.

Заряд C происходит в течение интервала времени пока не наступает переполнение счетчика. Импульс переводящий счетчик из состояния 1999 в состояние 0000, переключает P_2 с заряда током ФЭУ на разряд его эталонным током. Разряд емкости C протекает до тех пор пока не достигается уровень, при котором срабатывает нульиндикатор. В этот момент выключается триггер интегратора и запирается вентиль. Число накопленное в счетчике, является цифровым кодом измеряемого тока. Оно запоминается и выводится на ЭВМ или оптический индикатор. Не трудно понять, что если измерения производятся непрерывно, т.е. за полупериодом компенсации снова сразу же следует новый полупериод накопления, то дрейф нульиндикатора не влияет на точность преобразования. Также не влияют на точность измерения медленные изменения частоты генератора счетных импульсов, поэтому схема получается очень простой и недорогой. В непрерывном режиме отпадает необходимость также в ключе P_1 .

§ 5. Прецизионные методы преобразования напряжения.

Потенциометрически-интегрирующий метод включает в себя процесс интегрирования и процесс последовательных приближений $1/6, 35/4$ и благодаря этому обеспечивает возможность построения быстродействующего прибора с высокой точностью, стабильностью и способного ослаблять наложенные на полезный сигнал помехи. Упрощенная блок-схема прибора приведена на рис. 20.

Каждое измерение состоит из двух приближений или выборок неизвестного напряжения и двух интервалов переноса. В начале первой выборки декадный реверсивный счетчик находится в нулевом состоянии и выходное напряжение прецизионного дискретного потенциометра равно нулю. Неизвестное напряжение U_x поступает непосредственно на вход ПНЧ. Первый период начинается с момента открытия вентиля 5. С этого момента выходной сигнал ПНЧ, частота которого пропорциональна величине U_x , поступает на четвертую тетраду счетчика. Импульсы пропускаются на счетчик до тех пор, пока не закончится фиксированный интервал первого периода T .

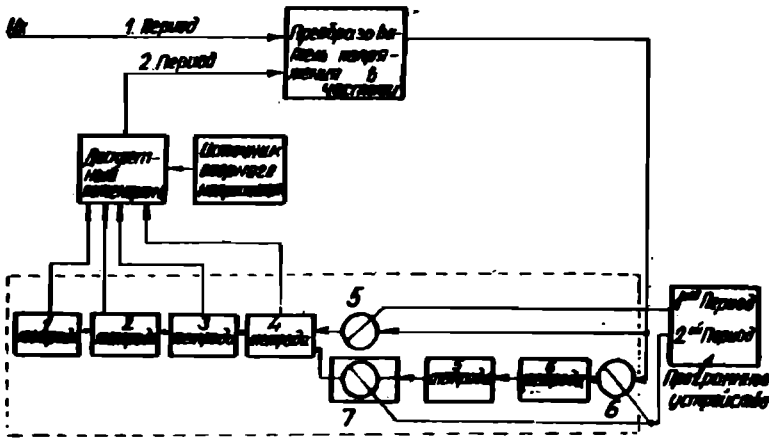


Рис. 20.

Число, накопленное в четырех старших декадах счетчика к концу интервала первой выборки, представляет собой результат измерения неизвестного напряжения с погрешностью приблизительно 0,3%, что соответствует погрешности в 3 единицы в четвертом разряде. Число, накопленное в четырех тетрадах счетчика, сохраняется в течение остальной части цикла измерения, но не индицируется до окончания интервала второй выборки, во время которого оно корректируется.

В течение интервала переноса, следующего сразу же после первого приближения, число, накопленное в счетчике, используется для управления прецизионным дискретным потенциометром. Выходное напряжение последнего уравнивает U_x с точностью первого приближения.

В начале интервала второй выборки ко входу ПНЧ приложено напряжение, равное разности напряжений измеряемого и компенсирующего. Сигнал на выходе ПНЧ имеет частоту пропорциональную этой разности. Интервал второй выборки начинается открытием вентиля 6, пропускающего сигнал с выхода ПНЧ в шестую тетраду

счетчика. Для того, чтобы скорректировать погрешность первой выборки, обеспечивается передача импульсов переполнения из пятой декады в четвертую. Поскольку погрешность первой выборки может быть как положительный, так и отрицательный, логическая схема управляет реверсом счетчика.

Во втором интервале переноса окончательный результат, накопленный в счетчике, переносится на лампы цифрового индикатора или вырабатывается команда выдачи на печать.

Описанную систему можно сравнить с такой схемой измерения, в которой используется неточный вольтметр и идеальный программируемый источник опорного напряжения. При этом вольтметр с погрешностью измерения 1% при двух выборках даст величину напряжения с погрешностью 0,01%. Таким образом, в данном приборе не требуется выдержать очень высокую точность ПНЧ и генератора эталонных импульсов. Точность данного прибора определяется в основном источником опорного напряжения и дискретным потенциометром, который может иметь погрешность преобразования около 0,0015%.

Снижаются требования и к быстродействию ПНЧ. Так, согласно /6/, для обеспечения скорости измерения порядка 15 отсчетов в секунду от преобразователя, требуется, чтобы при длительности строба измерения $\frac{1}{60}$ сек он имел линейную характеристику лишь на частотах до 72 кГц. Это значительно снижает стоимость ПНЧ.

И все же в отношении подавления входных помех существуют определенные ограничения. Во время интервала второй выборки на вход преобразователя подается разность неизвестного U_x и компенсирующего напряжения, а также неослабленная аддитивная помеха. Если уровень помехи значительно превышает вторую постоянную составляющую, ⁷⁹требуемая для передачи помехи выходная частота превышает максимальную рабочую частоту ПНЧ, и последний начинает работать в нелинейном участке характеристики.

Описанный выше метод применен фирмой Hewlett Packard в шестизначном цифровом вольтметре 3460 А. Прибор имеет ошибку не более $\pm 0,002\%$ (± 2 кванта), входное сопротивление 10 Мом. Допустимый уровень аддитивных помех составляет 6% от значения всей шкалы прибора. Прибор может измерять напряжения до 1 в с разрешающей способностью около $1 \cdot 10^{-6}$ и с чувствительностью около 1 мкв.

Высокой точностью измерения отличается метод, описанный в /30/ рис. 21.

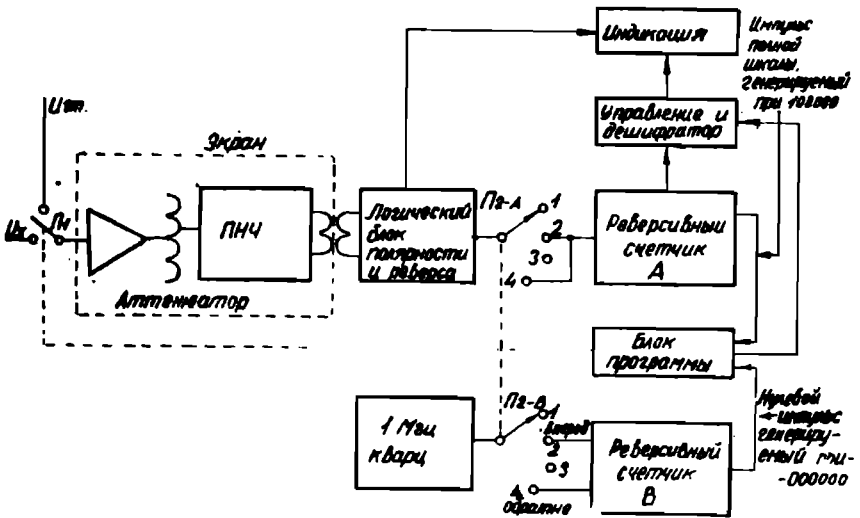


Рис. 21.

Блоксхема прибора состоит из трех основных блоков: ПНЧ и двух реверсивных счетчиков. В принципе, схема измеряет отношение двух напряжений: измеряемого U_x и эталонного $U_{эТ}$. Если $U_{эТ} = 1v$, получаем отсчет непосредственно в вольтах.

Работа схемы состоит из 2 тактов. В исходном состоянии оба счетчика погашены. Переключатель Π_1 в положении $U_{эТ}$, Π_2 в положении 1.

В момент запуска Π_2 переводится в положение 2. Счетчик А начинает считать импульсы выходной частоты, соответствующей точному эталонному напряжению на входе ПНЧ. Счетчик в это время считает импульсы кварцевого генератора. После накопления в счетчике А 100000 единиц, переключатель Π_2 переводится в положение 3, счет в обоих счетчиках прекращается. Счетчик А гасится, и блок программы переводит переключатель Π_1 в положение U_x . В счетчике В остается накопленным числовой эквивалент эталонного напряжения.

Через небольшой интервал времени переключатель P_2 переводится в состояние 4 (счетчик В при этом реверсируется). На вход счетчика А снова поступают импульсы выходной частоты, соответствующей измеряемому напряжению на входе ПНЧ. Счетчик ведет обратный счет импульсов кварцевого генератора. Когда счетчик В достигает 000000, вырабатывается нулевой импульс, переводящий P_2 в положение 1. Блок программы включает дешифратор оптического индикатора на индикацию числа, накопленного в счетчике А. Последний представляет собой числовой эквивалент отношения $\frac{U_x}{U_{этр}}$. Так как в обоих измерениях применяются один и тот же ПНЧ и тот же кварцевый генератор, любые изменения параметров схемы от температуры или времени практически исключаются. Если прибором пользоваться в качестве вольтметра, его точность в основном определяется точностью стандартного элемента.

В конце вкратце укажем на еще одну возможность применения аналого-цифровых преобразователей.

Обычно физик-экспериментатор получает информацию о физических величинах в виде их электрических аналогов, чаще всего в виде напряжения. При этом взаимосвязь между физической величиной и ее электрическим аналогом редко бывает линейной. Поэтому почти всегда требуется внесение поправок на смещение нуля датчика и его нелинейность. В случае непосредственной связи с ЭВМ, поправки можно вводить автоматически, однако на это приходится тратить дополнительное машинное время. Аналоговые методы линеаризации трудоемки и не точны.

АЦП достаточно гибко и легко согласуется с любым датчиком. Кроме того, в принципе, любую необходимую линеаризацию можно выполнить с заданной точностью. Линеаризация в цифровом устройстве выполняется путем кусочно-линейной аппроксимации нелинейной характеристики датчика:

$$y_{AB} = a_1 + b_1 x; \quad y_{BC} = a_2 + b_2 x; \quad y_{CD} = a_3 + b_3 x; \quad \text{и т.д.}$$

Если в качестве цифрового преобразователя использован интегрирующий АЦП, линеаризацию можно осуществить так:

Прибор работает в два такта: в первом такте определяется отрезок аппроксимации. Для этого измерится частота на выходе ПНЧ, т.е. в течение определенного интервала времени ведется счет импульсов с выхода ПНЧ. Второй такт — измерение: исходя

не только что определенного отрезка аппроксимации, в счетчик засматривается начальный сдвиг - число α , а в схему, управляющую длительностью строба - число β , определяющее время интегрирования.

Фирмой " Hewlett Packard " построено /31/ цифровое устройство с непрерывным преобразованием входных сигналов в физические единицы, аппроксимирующее любую характеристику IO отрезками. При этом погрешности при измерении температуры термпарой в диапазоне 100 мВ не превышала 0,04% (средне-квадратичное значение) от предела шкалы, и 0,1% в диапазоне 10 мВ.

§ 6. Быстродействующие преобразователи.

Современный уровень развития измерительной техники позволяет построить аналого-цифровые преобразователи, способные обрабатывать видеосигналы со спектром до нескольких десятков мегагерц. Максимальная скорость преобразования не может быть достигнута одним лишь применением наиболее быстродействующих конструктивных элементов, например, туннельных диодов, высокочастотных дрейфовых транзисторов и интегральных схем, - необходимо еще выбрать наиболее быстрый способ кодирования. Как правило, повышение быстродействия преобразователя влечет за собой ухудшение его других характеристик, напр., точности и входного сопротивления. Однако сочетание крайних значений этих параметров обычно и не является обязательным.

В быстродействующих схемах преобразователей основным элементом служит амплитудный дискриминатор - нульиндикатор. Практически всегда этот узел выполняется на туннельных диодах/38/. Подробную информацию о проектировании и применении схем на туннельных диодах можно найти в /38/.

Способы скоростного кодирования рассмотрены в /39, 40/. Быстродействующие преобразователи можно построить по последовательному, параллельно-последовательному и параллельному методу.

В последовательном методе прежде всего выясняется является ли аналоговая величина, подлежащая кодированию, больше по-

ловины шкалы прибора или же меньше. Результат этого сравнения дает значение первого разряда кода. При втором измерении процедура повторяется относительно половины, в которой находится измеряемая величина, затем границы сужаются до $1/8, 1/16, 1/32$ и т.д. Примером последовательного метода является классический потенциометрический метод. Его недостатком является то, что одновременно ведется сравнение только с одним эталонным напряжением. Это связано с тем, что нельзя начинать следующее сравнение прежде, чем не определен результат предыдущего.

Однако можно сделать так, чтобы последующие дискриминаторы амплитуды вели обработку результата одновременно с первым, это и составляет основную идею параллельно-последовательного преобразования.

Наивысшую возможную скорость преобразования, по крайней мере в принципе, дает АЦД параллельного типа. Он требует проведения только одной операции, однако скорость достигается большими затратами - для каждой ступени сравнения требуется отдельный амплитудный дискриминатор.

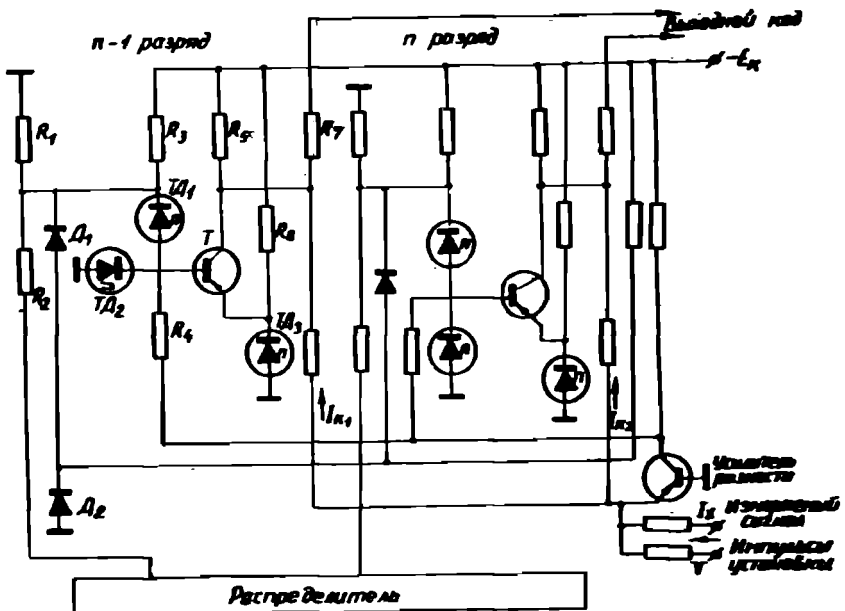


Рис. 22.

Пример АЦП последовательного типа приведен на рис.22. В нем используются дискриминаторы на двух туннельных диодах ($ТД_1$ и $ТД_2$) в каждом разряде с предварительным усилителем разности сравниваемых токов. Дiodы $Д_1$, $Д_2$ образуют схему фиксации уровня, позволяющую одновременно находиться в состоянии высокого напряжения только одному $ТД$ дискриминатора. Перед началом кодирования $ТД_2$ во всех разрядах преобразователя находится в состоянии высокого напряжения. При этом ключевые транзисторы открыты, неинвентирующий усилитель разности заперт. Импульс с первого выхода распределителя переключает $ТД_2$ в первом дискриминаторе в состояние низкого напряжения. Запирается $Г$ первого разряда, и на вход усилителя разности поступает эталонный ток $I_{к1}$, соответствующий весу старшего разряда. В зависимости от соотношения между I_1 и $I_{к1}$ усилитель разности устанавливает один из диодов нульиндикатора в состоянии высокого напряжения.

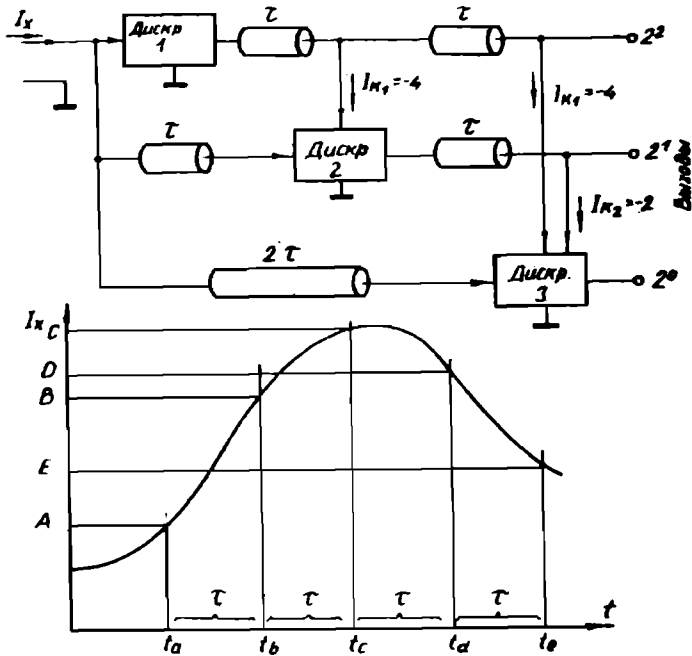
Второй импульс распределителя аналогично начинает кодирование по второму разряду.

Схема отличается простотой, кроме того за исключением взвешивающих сопротивлений R_0 , точный подбор деталей не требуется.

По данным /40/ схема, содержащая 6 разрядов имела частоту преобразования 5 мГц. Порог срабатывания дискриминатора - 100 мкв.

Пример параллельно-последовательной схемы приведен на рис. 23. Схема содержит n дискриминаторов, где n - разрядность преобразователя, τ - линии задержки. Принцип работы иллюстрируется таблицей. В момент времени t_0 на вход подана аналоговая величина A . Первый дискриминатор устанавливает: величина A больше или меньше 4 (число ступеней кодирования в примере 8, $n=3$). Если $I_{кA} > 4$, вырабатывается $I_{к1} = -4$, если $I_{кA} < 4$, $I_{к1}$ не вырабатывается, т.е. $I_{к1} = 0$. Результат сравнения задерживается на время τ и поступает на вход второго дискриминатора, в то время как на другой его вход с такой же задержкой поступает входная величина A . Второй дискриминатор сравнивает $(I_{кA} - I_{к1})$ с 2, одновременно ко входу первого дискриминатора уже приложена величина B и т.д. Преобразователь выдает параллельный код сигнала на дискретных выходах с задержкой 2τ (если не считать задержку на обработку

сигнала в дискриминаторах). Несмотря на относительную задержку выдачи кода, преобразователь отличается высоким быстродействием, т.к. обработка поступающей информации ведется одновременно всеми дискриминаторами.



Момент времени	t_a	t_b	t_c	t_d	t_e
Аналого-вый код	Величина А	Величина В	Величина С	Величина D	Величина Е
Дискриминаторы	1	Обработка А на 4	Обработка В на 4	Обработка D на 4	Обработка Е на 4
	2		Обработка А на 2	Обработка С на 2	Обработка D на 2
	3		Обработка А на 1	Обработка В на 1	Обработка С на 1
Выход			Выдача кода А	Выдача кода В	Выдача кода С

Рис. 25.

По данным /40/ 6 разрядный АЦП параллельно-последовательного типа обрабатывает видеосигналы со спектром до 25 мГц. В литературе /41/ описан точный АЦП параллельно-последовательного типа с коррекцией погрешностей, осуществляющий преобразование 15 разрядов за время 5 мксек.

На рис.24 показано кодирующее устройство параллельного типа, рассчитанное на 16 ступеней. Оно состоит из двух рядов дискриминаторов на ТД. Числа рядом с диодами показывают уровни, на которые настроены дискриминаторы. Настройка дискриминаторов осуществляется, например, подбором токов смещения рабочей точки. Цепи смещения диодов в схеме не показаны.

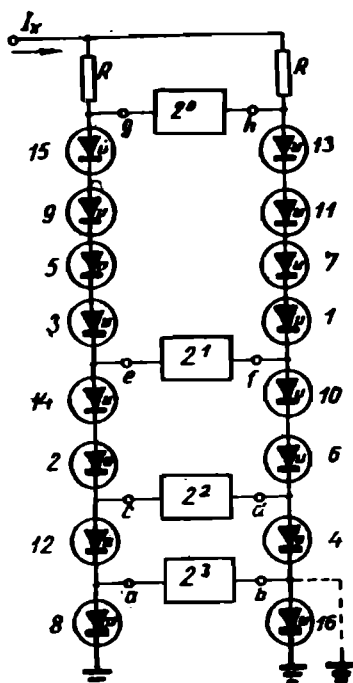
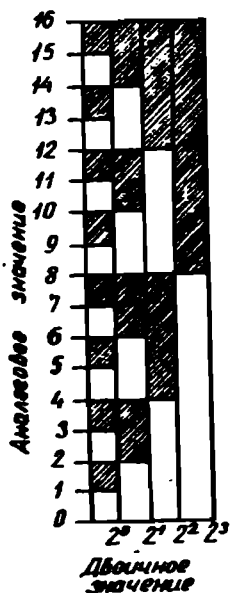


Рис. 24.

Элементы $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ являются пороговыми логическими схемами, осуществляющими считывание кода I_k с диодной цепочки. Через обе цепи проходят одинаковые токи, пропорциональные измеряемой величине.

Принцип действия такого преобразователя легко раскрывается, если рассмотреть закон образования чисел при двоичном коде. Начнем с кодирующего элемента 2^3 . Если через диоды протекает ток меньше 8 единиц, оба диода 8 и 16 находятся в состоянии низкого напряжения, между **а** и **б** падение напряжения равно нулю, и элемент 2^3 находится в состоянии "0". Если же аналоговая величина превысит 8, диод 8 переключается в состояние высокого напряжения, и между **а** и **б** появляется напряжение, переводящее элемент 2^3 в состояние 1. При токе равном 16, диод 16 также переключится в состояние высокого напряжения, и обе точки **а** и **б** будут находиться под одним потенциалом. Элемент 2^3 при этом снова выключается.

Как видно из таблицы, следующий элемент кода 2^2 должен включиться при токе равном 4 и выключиться при токе равном 8, затем снова включиться при токе 12 и выключиться при 16. Включение элемента при токе, равном 4 осуществляется дискриминатором 4 в правом диодном ряду, выключение при токе равном 8, с помощью дискриминатора 8. Последующее включение при токе равном 12, осуществляется дискриминатором 12 левого ряда, а отключение при токе равном 16 – при помощи дискриминатора 16.

Элементы кода 2^1 и 2^0 работают аналогично. Таким образом, 16 ступеней кодирования требуют наличия 15 дискриминаторов.

Основным недостатком АЦП параллельного типа являются повышенные требования к однородности и стабильности вольтамперных характеристик туннельных диодов.

Вследствие этого трудно построить АЦП параллельного типа с большим числом разрядов.

Во всех случаях, когда требуемое быстродействие может быть получено последовательным методом, ему следует отдавать предпочтение, т.к. он не требует больших аппаратных затрат.

Быстродействующие АЦП поразрядного кодирования отличаются высокой надежностью, простотой схемы и экономичностью. Лишь в тех случаях, когда требования быстродействия не удастся удовлетворить последовательным методом, имеет смысл применение более

дорогостоящих и сложных параллельно-последовательных или параллельных методов.

§ 7. Общие вопросы построения преобразователей.

Если аналого-цифровой преобразователь должен работать в виде автономного цифрового измерительного прибора, как уже отмечалось в § I, его логика должна быть построена в двоично-десятичном коде, как наиболее удобным для преобразования в десятичный код и индикации на визуальном индикаторе. Из множества цифровых индикаторов /II, I2/, наибольшее распространение в цифровых измерительных приборах получили декартоны, газоразрядные цифровые лампы типа ИИ-1, ИИ-2, люминесцентные приборы, проекционные индикаторы и индикаторы с подсвечиванием с торца. Несмотря на некоторые неудобства (напряжение питания около 200 в, довольно узкий угол видимости), наиболее перспективными являются газоразрядные цифровые лампы. Эти лампы требуют дешифрации двоично-десятичного кода в десятичный. Весьма экономичный с точки зрения числа элементов дешифратор рассмотрен в /I3/. Из схем включения следует предпочитать схемы, в которых одновременно включенным является один из десяти транзисторов. Это значительно снижает мощность, потребляемую блоком индикации.

Другим довольно сложным вопросом является согласование транзисторов с газоразрядными лампами, требующих высокое напряжение питания. Это препятствие может быть устранено либо путем импульсного питания катодов ламп индивидуальными блокинггенераторами через повышающие трансформаторы, либо применением более дорогостоящих высоковольтных транзисторов или же применением весьма перспективного режима лавинного пробоя обычных низковольтных транзисторов /I4, I5/.

Выход на вычислительную машину нежелательно осуществлять непосредственно с коллекторов разрядных триггеров. Это связано с дополнительной нагрузкой на эти триггера со стороны дискретных входов ЭВМ и возникающей необходимостью согласования выходных сопротивлений и уровней. Поэтому наиболее целесообразно включение дискретных входов ЭВМ через специальные одно-

каскадные инвенторы. Такие же инвенторы применяются для ввода в ЭВМ знака, номера включенного канала в многоканальных приборах, номера диапазона, признака разрешающего считывание и т.д.

Большие удобства в эксплуатации создает расширение диапазонов измерения. Так, в трехразрядном цифровом приборе полная шкала может быть представлена как 999 квантов. Напряжение 1,000 вольт в этой шкале может быть представлено всего лишь 100 квантами, т.е. для измерения напряжений несколько превышающих шкалу прибора, приходится включать следующий менее чувствительный диапазон, в который данное напряжение составляет всего лишь 0,1 всей шкалы. Это приводит к понижению относительной точности измерения. Во избежание этого вводят, так называемые, разряды переполнения шкалы, т.е. добавляют еще один или два триггера старших разрядов, расширяющие шкалу прибора, например, до 1199.

В тех случаях, когда совершенно недопустимо появление ложных отчетов, применяются различные системы контроля /1/. Применяется контроль нуля прибора и калибровка его при помощи эталонных источников напряжения через определенные интервалы времени или по команде от ЭВМ. Такая система контроля обнаруживает появление отказов прибора в виде недопустимой величины дрейфа нуля, или изменения крутизны преобразования. Система контроля нечувствительна к единичным сбоям, напр., в разрядных триггерах, приводящим к отдельным неверным результатам кодирования. Для обнаружения сбоев в преобразователях поразрядного кодирования можно применить способ, предложенный в /20/.

К цепям запуска аналого-цифровых преобразователей, предъявляются следующие требования:

- а) возможность запуска от руки,
- б) возможность запуска от ЭВМ,
- в) возможность периодического запуска от встроенного таймера,
- г) запуск АЦП от входного сигнала при возрастании последнего,
- д) запуск АЦП от входного сигнала при убывании последнего,
- е) запуск АЦП от входного сигнала, при любом изменении входного сигнала, превышающем 1, 2 и т.д.

Если запуск осуществляется ЭВМ периодически, весьма вероятно считывание большого объема лишней информации; напр., машина продолжает считывание результатов в период времени, когда входная величина не меняется. Системы устранения лишней информации рассмотрены в /37/.

В заключение отметим, что аналого-цифровым преобразователям часто целесообразно поручать не только функции преобразования входной величины и запоминания для последующей индикации на визуальных индикаторах, вывода на печать, или на перфоменту, но также предварительную обработку поступающей информации. В последнем случае значительно разгружаются выходные устройства (перфоратор или цифропечатающая машинка), упрощается программа и уменьшается машинное время ЭВМ.

Л и т е р а т у р а .

1. Хлистунов В.Н., Основы цифровой электроизмерительной техники, Изд-во "Энергия", 1966.
2. Кондюкова Е.И., Редькин Б.Е., Аналого-цифровые преобразователи систем автоматического контроля. Изд-во "Энергия", 1967.
3. Под ред. Смолова В.Б., Смирнова Н.А. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжения. Изд-во "Энергия", 1967.
4. Козлов В.А., Уткин В.И., Транзисторный аналого-цифровой преобразователь напряжения АЦПН-1. Приборы и средства автоматизации, 1964, № 6, 48.
5. Гитис Э.И., Методы построения многоканальных преобразователей напряжения в код. Сборник "Вычислительная техника в управлении", Изд-во "Наука", 1964.
6. Kay V.G., Selecting the right digital voltmeter. Electronics, 1966, № 5, 84-90.
7. Гитис Э.И., Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. Госэнергоиздат, 1961.
8. Рейнберг М.Г., Некоторые методы преобразования напряжения в двоичный код. Сборник "Цифровая техника и вычислительные устройства", 1962, № 2.

9. Волгин Л.Л., О выборе оптимальной системы кодирования чисел в цифровых вольтметрах с кодоимпульсным преобразованием. Сборник "Цифровая электроизмерительная техника". Вып. IX, Оптиприбор 1964, 77-93.
10. Ефименко Я.А., О выборе двоично-десятичного кода в приборах поразрядного уравнивания. "Автоматический контроль и методы электрических измерений" Труды У конференций, Том I, Изд-во "Наука", Сибирское отделение, 1965.
11. Бруфман С.С., Цифровые индикаторы. Изд-во "Энергия", 1964.
12. Каминский Ю.Д., Коленда Э.И., Индикаторные и регистрирующие устройства для систем автоматического контроля. Изд-во "Энергия", 1967.
13. Adby P.R., Binary read-out circuits using transistors and gas discharge numerical indicator tubes. *Electronic Engineering* 88, 1966, Nr. 457, 147-151.
14. Пикулик В.Г., Шац С.А. Лавинные свойства промышленных сплавных маломощных транзисторов. *Радиотехника*, 20, 1965, № 2, 52-56.
15. Хризман С.С., Применение транзисторов в режиме электрического пробоя для управления цепями повышенного напряжения. Приборы и средства автоматизации, 1965, № 14, 3-9.
16. Prinz D.G., D-C amplifiers with automatic zero adjustments. *Journal of Scientific Instruments*, 1947, N 12.
17. Якубович А.И., Операционные усилители с компенсацией дрейфа нуля по методу Принца. *Автоматика и телемеханика* 24, 1963, № 8, III7.
18. Страшун Ю.П., Сравнительная оценка электронных нульиндикаторов преобразователей информации. Сборник "Элементы и устройства управляющих машин", Оптиприбор, 1966.
19. Островерхов В.В., Вальский Б.Г., Живилов Г.Г. Об одной возможности повышения быстродействия аналого-цифровых преобразователей поразрядного уравнивания. Тезисы докладов конф. "Кибернетические пути совершенствования измерительной аппаратуры", Ленинград 1967, стр. 56-58.
20. Григорьян - Чтенц Л.Л., Дегтирев А.Д., Авторское свидетельство № 185581 кл. 42ш, 14.
21. Хлистунов В.И., Живилов Г.Г., Быстродействующий цифровой вольтметр с самоконтролем. *Измерительная техника*, 1962, № 8, 44-46.

22. Хлитунов В.Н., Чернухин В.Л., Методы цифрового преобразования знакопеременных напряжений. Приборостроение, 1962, № 2.
23. Гореликов Н.И., Касперович А.Н., Коршевер И.И., Цапенко М.П., О построении цифровых измерительных приборов с переменной структурой. Автометрия, 1965, № 4.
24. Субье-Ками А., Двоичная техника и обработка информации. Изд-во "Мир", 1964.
25. Ammann S.K., Dual slope DVM. Electronic Engineer 42, 1967, № 7, 66-67.
26. Breuning H., Kürner H. Elektronische Spannungs-Frequenz Umformer für die Digitalmesstechnik. Arch.techn. Messen, 1965, Lief.356, II3-II8.
27. Евланов Ю.Н., Харченко Р.Р., Линейные измерительные преобразователи постоянного напряжения в частоту и время. Автометрия, 1966, № 1, 17-26.
28. Horwat J., Šakić B., Analog-Digital Wandler in IC-Technik. Brown Boveri Mitt., 1967, № 4, 189-192.
Перевод Экспр.-инф., Контрольно-измерительная техника 1967, № 26, 1-9.
29. Schmied H., Digital meters far under 100. Electronics 1966, № 24, 88-94.
30. DVM with a memory. Electronic Engineer, 1967, №3, 92-93.
31. Johnson P., Digital system continuously converts transducer data into meaningful units. Electronics, 1965, № 5, 43-52.
32. Schmied H., Grindle B., Pulse-width modulator offers precision performance. Electronics, 1963, № 41, 20-23.
33. Ammann S.K., Noise-proofing a digital voltmeter with off-the-shelf microelectronics. Electronics, 1964, № 29, 43-48.
34. Kleegrewe C., Analog-Digital Umsetzer auf magnetischer Basis. AEG - Mitteilungen, 1963, 53, №. 3/4, 92-93.
35. Grave H.F., Kleegrewe C., Analog-Digital Umsetzer Z. für Instrumentenkunde, 1965, № 9/10, 236-242.

36. Цедербаум И., Балабан П., Автоматическая компенсация дрейфа нуля в усилителях постоянного тока. Пробл. современной физики, 9, 1957, № 4, 25-28.
37. Flynn G.J., Digital instrumentation. Electronics, 37, 1964, № 16, 14-31.
38. Чжоу В.Д., Принципы построения схем на туннельных диодах. Изд-во "Мир", 1966.
39. Euler K., Schaltprinzipien für Analog-Digital Umwandler hoher Bandbreite mit Tunnelioden. Frequenz 1964, 18, № 10, 325-331.
40. Странун Ю.П., Сверхбыстродействующие аналого-цифровые преобразователи на туннельных диодах, Приборы и средства автоматизации, 1966, № 4, 6-15.
41. Gorbatenko G.G., High performance parallelserial analog to digital converter with error correction. IEEE Internat. Convent. Rec. 1966, 14, № 8, 39-43. Перевод. Экспресс-инф. Контр.-измерит. техника, 1967, № 1, 1-6.
42. Нетребенко К.А., Цифровые автоматические компенсаторы. Изд-во Госэнергоиздат, 1961.
43. Диденко В.И., Методика наладки схемы температурной компенсации точных полупроводниковых стабилизаторов напряжения. Измерительная техника, 1962, № 2, 27-29.
44. Додик С.Д., Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока. Изд-во "Советское радио", 1962.
45. Левин М.И., Додик С.Д., К вопросу с длительной стабильности стабилизаторов с кремниевыми стабилитронами. Измерительная техника, 1962, № 10, 42-45.
46. Чеботарев А.В., Применение транзисторных ключей в измерительных цепях переменного тока. Материалы конференции по бесконтактным электронным устройствам, Сборник, I, Москва, 1968, 95-99.
47. L'Archeveque R.V., Sayers E. E.A., A tunnel diode quantizer Electronic Engineering, 37, 1965, № 451, 574-579.
48. Zapf T.L., Precise voltage-ratio measurement. Electro-Techmol., 76, 1965, № 4, 95-96, 98, 102. Перевод Экспр.-информ., Контрольно-измерит. техника 1966, № 3, 35-46.

49. Keffmann G., Analog-Digital Wandler.

Патент ФРГ № II785I4.

Перевод Экспресс-информация. Контрольно-измерительная техника, 1966, № 14, 12-17.

50. Hoer C.A., Smith W.L., A 2:1 ratio inductive voltage divider with less than 0,1 ppm error to 1 MHz. J. Res. Nat. Bur. Standards, C71, 1967, № 2, 101-109.

Перевод Экспресс-информация, Контрольно-измерит. техника, 1967, № 39, 13-35.

**"ФИЗПУЛЬТ" – МАШИНА, УПРАВЛЯЮЩАЯ НАУЧНЫМ
ЭКСПЕРИМЕНТОМ.**

**I. "ФИЗПУЛЬТ" – машина, управляющая научным
экспериментом.**

Изучение и разработка специальных управляющих и вычислительных устройств и путей их целесообразного применения являются одной из важнейших задач развития измерительных информационных систем /1/.

Еще большее значение такие технические средства приобретают в научно-исследовательских системах, в которых результаты измерений получаются путем целенаправленного комбинирования нескольких физических воздействий на объект исследования, с последующей их математической обработкой.

Для этих целей в Проблемной лаборатории физики полупроводников ЛГУ разработана универсальная УВМ "ФИЗПУЛЬТ" /2/. Машина ориентирована на управление научным экспериментом и может работать как в системе с центральной ЦВМ, так и в полностью автономном режиме.

К разработке конструкции машины были предъявлены следующие требования:

- 1) Возможность с помощью программы, а также вручную управлять разными измерительными и исполнительными устройствами одновременно, накапливая результаты измерений в памяти машины.
- 2) Учитывать, что фактическое быстродействие УВМ, работающих в реальном масштабе времени зависит от принципа организации работы с внешними устройствами.
- 3) Конструкция "ФИЗПУЛЬТа" должна быть достаточно универсальной для работы с различными комплексами внешних устройств, выполненных в виде взаимно заменяемых автономных дискретно-аналоговых, аналого-дискретных и аналого-аналоговых блоков.

- 4) Учитывать, что на машине будут исследоваться проблемы кибернетизации научного эксперимента и связи оператора с системой.

Основные узлы машины.

- Учитывая вышеизложенные требования, конструкция "ФИЗ - ПУЛЬТа" была разработана на базе следующих узлов (рис. 1):
1. Регистр кодов РКд является основным регистром в машине, через который происходит любой обмен информации с внешними устройствами и центральным вычислителем.
 2. Узел приема кодов УзПк служит для сбора информации с внешних устройств и направления ее на РКд. В основном исполнении он имеет 8 входных слов, из которых 7 состоят каждый из 16 двоичных разрядов, а восьмой - 26 разрядов, кроме того предусмотрена возможность увеличить УзПк до 60 входных слов с разрядностью, лежащей в пределах от одного до 26-ти разрядов.
 3. Узел выдачи кодов УзВк необходим для выдачи как одnorазрядных управляющих слов типа включить-выключить, так и многоразрядных слов для управления автоматов, работающих по принципу дискретно-аналогового преобразования. Узел состоит из 6-ти запоминающих регистров, имеющих разную разрядность (в сумме 48 реле) и 48-и одиночных релейных выходов. Также как для УзПк, в машине предусмотрена возможность увеличить количество выходных каналов, кроме того УзВк может служить для выдачи информации на внешние устройства, имеющие собственные элементы памяти. Для этого используются потенциальные информационные выходы (уровни напряжений) $(0) - (-12)в$ и система управляющих импульсов.
 4. Блок анализа признаков управления БАП служит для программного выбора последовательности рабочих микропрограмм П в зависимости от 60-ти сигналов внешних устройств X_j ; Если в j -том устройстве происходят переходные процессы, связанные с его работой, будем считать, что признак управления X_j принимает значение 0 и запишем это $(X_j := 0)$.

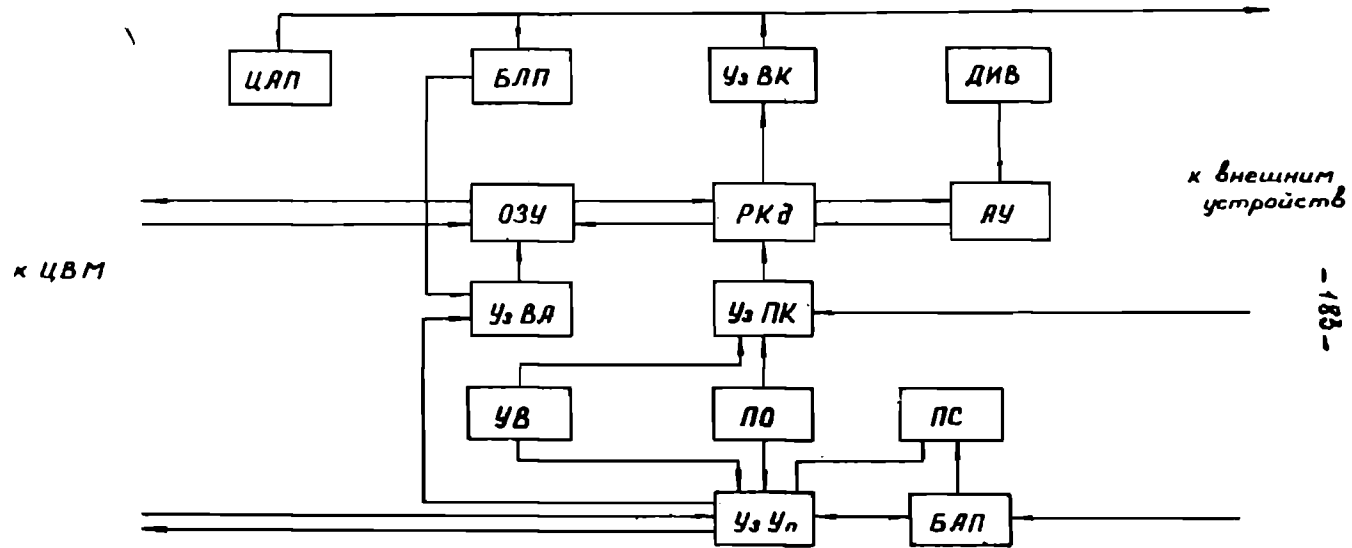


Рис. 1.

Если в приборе переходные процессы кончились, то $X_j := 1$. Предполагаемый порядок записи любого блока микропрограмм следующий - в начале каждой микропрограммы П с помощью команд опроса признаков КОП задаются условия ее работы в зависимости от сигналов внешних устройств X_j . Потом пишется сама микропрограмма П, в которой кроме исполнительных команд могут иметься и команды для условного или безусловного изменения порядка следования операций ИП. После нескольких таким образом заданных блоков микропрограмм пишется специальная команда условного перехода УПП на начало программы, осуществляется повторный пересмотр всей программы, если какой-то ее участок еще не выполнен. В зависимости от полученных результатов опроса признаков, машина может менять режим работы $A = \{a, b, c\}$.

Здесь: a - режим, в котором могут действовать как П, так и КОП.

b - режим запрета той P_j , для которой в момент выполнения КОП некоторый признак не соответствовал условиям ($X_j \neq 1$).

В этом режиме, последовательно переадресуя счетчик номера команд, машина идет место в программе, где кончатся условия (КОП) для выполнения P_j . Потом она переходит в состояние b , служащее для поиска условий работы следующей микропрограммы P_{j+1} .

Признак используется для повторного пересмотра блока программы с помощью УПП.

Меткой M , записываемой в любой КОП, программист может указать, что соответствующая P_j должна выполняться однократно ($M := 1$), или каждый раз, когда просматривается данная программа ($M := 0$). Если машина выполняя КОП, обнаруживает полное соответствие признаков X_i заданным условиям - в данной КОП записывается метка $M_i = 1$, которая в дальнейшем служит для выбора режима A .

Детальное описание функционирования блока БАП дано с помощью его алгоритмической блок-схемы (рис. 2).

Здесь, кроме перечисленных обозначений, применяются следующие:



i - адрес выполняемой команды,

i - начальный адрес, **-185-**

Γ_i - команда, записанная по адресу i ,

~~В~~ содержимое адресной части команды Γ_i

В эллипсах записываются логические условия функционирования:

$(X_i=1)$ - выполнить операцию следующую в направлении
+  $X_i=1$ - иначе - .

В прямоугольниках указываются выполняемые операции:

$[i:=V(\Gamma_i)]$ - установить адрес очередной команды i соответственно коду V который задан в адресной части Γ_i

5. Арифметическое устройство (АУ) выполняет элементарные вычислительные операции над результатами измерений, выработывает признаки управления в зависимости от полученного результата, а также служит для переадресации команд и выдержки времени между ними. АУ оформлено на базе 16-ти разрядного двоичного накапливающего сумматора параллельного действия и регистра кодов РКД. В режиме выдержки времени между двумя командами, сумматор используется в качестве счетчика импульсов поступающих с блока ДИВ.
6. Датчик импульсов времени ДИВ работает на частоте 100герц, получаемой от сети питания путем двухстороннего ограничения и дифференцирования синусоиды.
7. Оперативное запоминающее устройство ОЗУ служит для хранения программы. Кроме того оно может использоваться в качестве буфера, накапливающего результаты измерений перед выдачей информации на центральную ЦВМ или перфоленцы. В настоящем исполнении ОЗУ имеет 512 слов с 26-ти двоичными разрядами, но при необходимости оно может быть увеличено.
8. Блок ленточного перфоратора БЛП накапливает результаты измерений для дальнейшей их обработки на ЦВМ, если в данном режиме прямая связь с центральной машиной не используется. Он имеет собственный блок управления с буферным регистром памяти и работает в режиме прерывания программы "ФИЗПУЛЬТа". Процесс перфорирования организован по принципу магазина, то есть, в ОЗУ отводится небольшой массив, в который записывается выводимая информация.

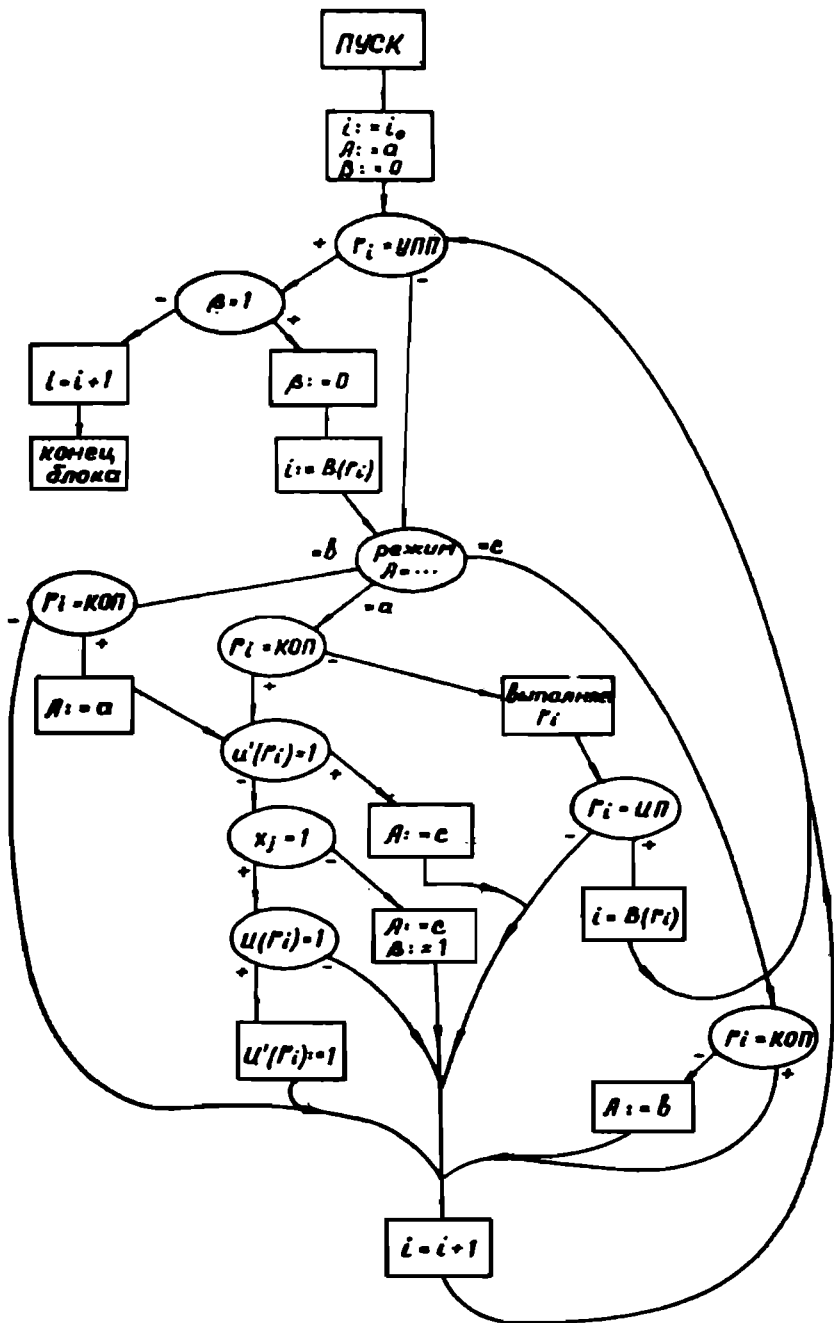


Рис. 2.

На счетчике адреса БЛП вначале задается первый адрес выводимой информации. Одновременно с записью первого слова в указанный массив, начинает работать перфоратор ПЛ-20, а само слово в ОЗУ получает специальную метку Т. БЛП принимает только слова, имеющие указанную метку и останавливается, если в массиве нет информации. Кроме того при выдаче начального адреса на БЛП имеется возможность указать, сколько разрядов из каждого слова в массиве перфорировать.

Если скорость поступления информации в ОЗУ оказывается больше скорости перфорации, а поток засылаемой информации догоняет выводимую информацию - машина останавливается и продолжается работа перфоратора до полного вывода массива. После того машина может быть снова запущена.

9. Устройство ввода информации с перфоленты УВ выполнено на базе механизма ФСУ-1 и имеет систему проверки правильности ввода, работающую по принципу контрольного суммирования.
10. Цифро-аналоговый преобразователь предусмотрен для вывода информации на ЭЛТ, или двухкоординатный самописец, которые по необходимости могут быть подключены к машине. ЦАП имеет два десятиразрядных регистра памяти и может дать выходное напряжение в диапазоне от 0 ± 10 в с точностью 0,1%.
11. Цифропечатающая машина ЦПМ-1 предусмотрена для вывода результатов измерений, если оператора интересует их точные величины. Она также, как ЭЛТ и самописец, не входит в основную блок-схему машины, но может быть подключена по мере необходимости.
12. Узел управления - УзУП вырабатывает основные управляющие сигналы для всей машины в целом. Кроме того с его помощью происходит связь с центральной машиной и контроль принятой информации. УзУП предусматривает прерывание программы эксперимента по следующим приоритетам:
 - а) изменение содержимого любой ячейки ОЗУ с пульта оператора;
 - б) выполнение с пульта любой команды управления, не предусмотренной в программе;
 - в) выдача информации с ОЗУ на БЛП.

13. Узел выдачи адресов УЗВА связан с адресной системой ОЗУ и имеет следующие входные каналы:

- а) клавиатуру пульта оператора для задания начального адреса при пуске программы или ее вводе с перфоленты в ОЗУ. Канал также используется при прерывании программы по пункту 12а;
- б) счетчик номера перфорируемого адреса в БЛП;
- в) счетчик номера команды в самом УЗВА;
- г) вход с РКД для команд арифметического характера.

14. Панель сигнализации ПС "Физпульта" представляет две системы индикации:

- а) статическую, которая используется при отладке программ и в основном связана с узлами УВМ;
- б) динамическую, которая отражает состояния внешних устройств и позволяет вести контроль также во время работы программы.

Отметим, что для усовершенствования связи оператор-система предусмотрена возможность подключения к "Физпульту" устройства "светового пера", оформленного в виде автономного блока с буферной памятью.

15.- В пульте оператора ПО объединены следующие функции:

- а) управление машиной в режиме отладки программы;
- б) связь оператора с системой путем прерывания программы по пунктам 12а, б;
- в) ручное управление внешними устройствами первого иерархического уровня как во время сбора и отладки системы, так и в режиме поискового эксперимента. В последнем случае оператор, не имея заранее известной программы, должен с пульта управлять физическими воздействиями на объект исследований и следить за изменениями его свойств. Специализированная УВМ позволяет решить все эти задачи минимальными аппаратурными затратами и значительно облегчает работу оператора. Эксплуатация машины в системе показала, что целесообразно на ПО поместить еще одну клавиатуру, которая содержит высказывания специализированного алгоритмического языка. Последний позволит задавать работу системы без специальных знаний программирования и существенно облегчит поисковый эксперимент.

Все сказанное показывает, что именно машины второго иерархического уровня являются основным звеном для связи оператора с НИС.

В них стекаются три основных информационных потока (рис.3):

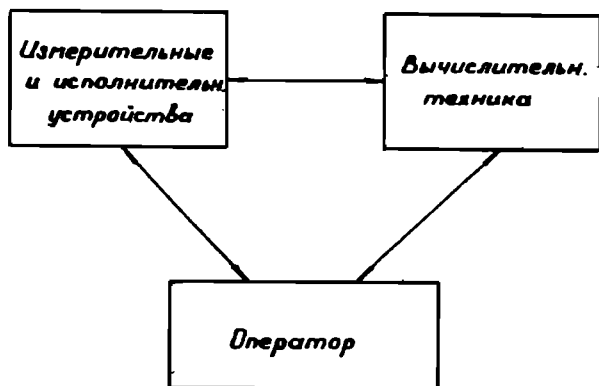


Рис. 3.

1. внешняя аппаратура - оператор;
2. оператор - машинная логика и наоборот;
3. машинная логика - внешняя аппаратура.

Если ЦВМ третьего иерархического уровня в основном работает в так называемой логической среде /3/, которую составляет система косвенной адресации и распределения памяти, система прерываний программ, механизм распределения машинного времени между пользователями и остальные математические средства обеспечения системы, то машины второго иерархического уровня работают в так называемой физической среде, которую определяют процессы в реальном масштабе времени. Обзор узлов "Физпульта" показывает, что структура машин второго иерархического

уровня, применяемых в современных НИС, образуется из стационарной и заменяемой аппаратуры. К последней можно отнести специальные устройства ("световое перо", печатающая машина, ЭЛТ и другие) используемые только в некоторых экспериментах для усиления связи оператора с системой. Если в НИС имеется несколько таких устройств, они могут полностью обслуживать все потребности.

Коротко рассмотрим факторы, играющие основную роль при разработке машины.

1. Формат данных определяется точностью и кодом внешних устройств. В "Физпульте" на него выделено 16 двоичных разрядов, что соответствует точности аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей равной 0,01%, работающих в двоично-десятичном коде.

2. Формат команд.

Анализ алгоритмов физического эксперимента показывает, что в основе управляющих программ лежат три главных высказывания:

- а) определение состояния системы, для принятия решения о дальнейших действиях;
- б) выдать код X на устройство с номером N ;
- в) принять код X с выбранного устройства N

Из них вытекает основной формат команд (рис. 4а). Как было отмечено выше, код данных X может занимать 16 младших разрядов. Код операции для управляющих команд занимает два старших разряда, что соответствует приему, выдаче и проверке информации. Слово ОЗУ имеет 26 двоичных разрядов. (формат УВМ "Днепр-1"). В результате на номер устройства "N" остается 8 разрядов, что соответствует максимальному двоичному коду-256.

Операции арифметической и логической обработки информации выполняются соответственно формату рис. 4б. Здесь δ — номер ячейки ОЗУ, над которой выполняется операция.

Для определения состояний внешних устройств предусмотрен еще один формат команд (рис. 4 в); коды $\Pi_1; \Pi_2; \Pi_3; \Pi_4$ здесь указывают номера опрашиваемых признаков. Смысл меток M будет пояснен дальше.

а)

Код опер		Номер устройства										Код x															
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		

б)

0	1	Номер устройства										Код арифмет. или логическ. операции						b							
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

в)

1	0	П ₁								П ₂								П ₃								П ₄								М
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1									

3. Адресность машины и организация пульта оператора.

Как видно из формата команд, "Физпульт" соответствует классу одноадресных машин. Такое решение не только требует минимальные аппаратные затраты, но и способствует усовершенствованию пульта оператора. Оказывается, что для совмещения режимов ручного управления внешними устройствами и отладки машинных программ оба пульта можно объединить, если система команд машины отображает операции, выполняемые измерительными и исполнительными приборами. Неудобства, вызванные в системе /4/ в связи с наличием двух пультов в данной УВМ полностью устранены введением клавиши "Пультная операция", которая позволяет выполнить любую команду основного формата, (рис. 4а), набирая ее на клавиатуре машины.

4. Организация работы машины с внешними устройствами.

Эта задача может быть решена по принципу синхронного или асинхронного управления. В первом случае УВМ в жестко определенные моменты времени выполняет указанные программой команды. Время срабатывания приборов в этом случае должно быть заранее известно, однако, практически оказывается, что в большинстве случаев для измерительных и исполнительных устройств этот параметр колеблется в широких пределах. Он обычно зависит от некоторого числа внутренних состояний, через которые должно пройти устройство, чтобы из начального состояния $a(t)$ перейти в конечное состояние $a(t + \Delta t)$. Каждый прибор имеет свое максимальное время срабатывания Δt_{max} , соответствующее полной величине шкалы. Обычно $\Delta t < \Delta t_{max}$ - откуда следует, что система, работающая по синхронному принципу управления (с шагом Δt_{max}), нерационально использует время. Асинхронный принцип управления предусматривает немедленно продолжение работы с прибором, как только кончатся его переходные процессы. Для этой цели последний должен вырабатывать признак готовности, который воспринимается управляющей машиной. Указанный принцип существенно увеличивает быстродействие системы, но и требует дополнительные аппаратные затраты.

Конструкция "Физпульт" предусматривает работу по смешанному принципу управления. Система признаков и

за БАП (рис. 1) позволяет работать с программами асинхронно-го действия. В то же время часто используются приборы, время срабатывания которых точно известно (электромагнитные реле, световые затворы, фильтры). В таких случаях удобнее обойтись без специальной аппаратуры и пользоваться синхронным принципом. Для этой цели в машине предусмотрена команда выдержки времени (код 0012XXXX), которая пишется в программе после запуска данного прибора, но перед использованием ожидаемого эффекта. Комплекс обеих принципов управления позволяет значительно повысить фактическое быстродействие системы при минимальных аппаратурных затратах. Одновременно система внешних признаков позволяет вести контроль за результатами управления, таким образом, значительно повышается надежность работы НИС.

5. Дешифрация кодов внешних устройств.

В связи с тем, что внешняя аппаратура обычно комплектуется из неунифицированных приборов, работающих с разными кодами, машина второго иерархического уровня должна быть ориентирована на их декодирование. Эту задачу можно было решить и в центральном ЦВМ, но в таком случае на УВМ нельзя будет даже в элементарном виде анализировать информацию о результатах измерений. Физпульта позволяет с помощью одной команды дешифровать в двоичную систему счисления.

Следующие двоично-десятичные коды: 1242, 2421, 8421.

6. Проблема выбора аппаратуры для анализа состояний системы.

Под последними будем понимать как состояние внешней аппаратуры $a(t)$, так и информационные состояния $b(t)$, в которых находятся ячейки ОЗУ. Как $a(t)$, так и $b(t)$ могут быть определены с помощью арифметического устройства. Однако, в одноадресной машине при арифметическом анализе заметно возрастает объем используемой памяти, кроме того уменьшаются возможности использования сумматора в качестве запоминающего устройства с многократным использованием. Учитывая сказанное, в машине применен специальный логический блок для определения состояний $a(t)$ - БАП и 16-ти разрядный двоичный накапливающий сумматор для анализа $b(t)$.

7. Иерархия памяти и быстродействие машины.

В отличие от ядерных исследований, эксперимент в области физики твердого тела характеризуется сравнительно низкими скоростями потоков результатов измерений. В то же время для их получения требуется выполнить массу управляющих и анализирующих операций, которые могут иметь высокую частоту следования. Кроме того машина второго иерархического уровня должна иметь возможность быстро обмениваться с массивами информации с центральной ЦВМ.

Среднее быстродействие "Физпульта" составляет 20000 оп/сек, что полностью удовлетворяет указанные соображения.

Его память организована в двух видах:

- 1) Быстродействующее ОЗУ для хранения рабочих программ и обмена с центральной ЦВМ;
- 2) ленточный перфоратор накапливающий результаты измерений, если "Физпульт" работает в автономном режиме.

§ 2. Описание системы команд "Физпульта"

Соответственно /5/, разделим систему команд "Физпульта" на четыре части; записывая каждую операцию в восьмиричном коде:

1. Команды, определяющие порядок выполнения программ.

1. Команда опроса признаков внешних устройств (КОП):

2 P₁ P₂ P₃ P₄ M

Здесь буквами P_j указаны двухзначные номера опрашиваемых признаков. Меткой M указывается, что в цикле программы микропрограмма, следящая за выбранной КОП, должна выполняться однократно (M=1) или повториться в каждом цикле (M=0). Если программист в выбранной КОП записал M=1 и при опросе получен результат наличия всех четырех признаков, машина в конце операции запишет в ОЗУ в данной КОП единицу в 25-ом разряде (рис. 9в). При повторном вызове этой команды машина перейдет в режим "С", который подробно рассмотрен в описании БАП. Номера признаков записываются в восьмиричном коде, начиная с 00 + 77. Опрос признака 00 выполняется всегда. К системе БАП подключены также признаки результатов арифмети-

ческих операций: $\zeta = 76$; $\omega = 74$ Метка М занимает первый разряд машинного слова, поэтому номер П₄ всегда должен быть четным числом.

2. Команда условного перехода на адрес „aaa“ по признаку β
00200aaa

Эта команда позволяет зациклить любой блок программы до выполнения всей ее микропрограмм, вначале которых заданы условия работы в виде команд КОП. Признак β гасится каждый раз после выполнения указанной команды перехода.

3. Команды условного перехода по признакам арифметического устройства на адрес „aaa“:

а) по признаку φ
002400aaa

б) по признаку ω
002600aaa

4. Команды условного перехода по пультовым ключам или на адрес „aaa“:

а) для ключа К₁ :
003000aaa

б) для ключа К₂
003200aaa

5. Команда безусловного перехода на адрес „aaa“:
003600aaa

6. Дать выдержку времени $\zeta \cdot 10^{-2}$ сек между командами, среди которых записана данная операция
0012

ζ может быть четырехзначным числом, которое задается в десятичном коде.

После операции на сумматоре остается константа "0". Признаки $\varphi = \omega = 0$.

7. Останов машины: 000600000

И Команды для управления объектом информации между внешними устройствами и памятью.

8. Выдать код Х на устройство Н
Код может занимать 16 двоичных разрядов.

ОН

9. Принять код с устройства H_j на 26-ти разрядный регистр кодов РКд

$I H_1 00000$

Условный индекс J в команде не указывается, но с его помощью будем делить все номера устройств на три группы:

H_0 - номера устройств работающих в двоично-десятичном коде 842I;

H_1 - устройства работающие в коде 242I;

H_2 - устройства работающие в коде I242.

Выполняя указанную команду, машина преобразует принятую информацию в двоично-десятичный код 842I. При подключении устройства к машине предусмотрено в дешифраторе устройств выполнение специальной перекоммутации, с помощью которой указывается, в каком коде работает данное устройство. Ниже приведена таблица кодов и их десятичных эквивалентов.

Десятичный эквивалент	842I	242I	I242
1	000I	000I	000I
2	00I0	00I0	00I0
3	00II	00II	00II
4	0I00	0I00	I0I0
5	0I0I	0I0I	I0II
6	0IIO	0IIO	0IIO
7	0III	0III	0III
8	I000	II00	IIIO
9	I00I	IIII	IIII
0	0000	0000	0000

10. Выдать содержимое регистра кодов РКд на устройство H
 $0H 00000$

11. Выдать содержимое РКд на ячейку „aaa“ оперативного запоминающего устройства ОЗУ:

$000200aaz$

12. Принять содержимое ячейки „aaa” с ОЗУ на регистр кодов:
а) с одновременным приемом на сумматор
I00200aaa
б) без изменения содержимого сумматора
I00240aaa
13. Включить реле с номером Н
0N0000I
14. Выключить реле с номером Н
0N00002
15. Выдать код X на цифро-аналоговый преобразователь для управления самописцем:
а) координата X :
0I06xxxx
б) координата y
0I10xxxx
16. Выдать содержимое РКд на статический регистр индикации
0I0200000
17. Выдать код X на статический регистр индикации
0004xxxx
18. Установить начальный адрес „aaa” для перфорации 26-ти разрядных слов с массива ОЗУ
00I000aaa
19. Установить начальный адрес „aaa” массива для перфорации частей кадров
00I00Iaaa
20. Установить начальный адрес „aaa”, чтобы в конце массива перфорировать кадр останова
00I002aaa
21. Записать содержимое РКд в ячейку „aaa” перфорируемого массива одновременно запуская перфоратор
I0I600aaa
22. выдать массив ОЗУ с ячейки $b_n + b_n$ "Физпульта" на центральную ЦВМ.
Операция выполняется с помощью последовательности команд:
000400 $b_n b_n b_n$
I002II $b_n b_n b_n$
003400 0 0 0

После обмена программа выходит на адрес 777.

23. Принять массив с центральной машины, записывая его в ОЗУ "физикульта" с ячейки b_0 до b_n . Операция осуществляется с помощью трех команд:

000400 $b_n b_n b_n$

100205 $b_0 b_0 b_0$

003400 0 0 0

После обмена программа выходит на адрес 777.

Ш. Команды формирования содержимого программы.

24. Формирование возврата с подпрограммы

103600000

Если данная команда записана в адрес "а", то ее результат будет иметь следующий формат:

003600 (а+2)

и запишется по адресу 776 одновременно изменяя содержимое сумматора.

После команды 1036 обычно пишется команда безусловного перехода на подпрограмму, а выход с последней должен быть направлен на адрес 776, откуда она возвратится на адрес (а+2)

25. Восстановление команд КОП, в которых была метка М, происходит со следующей последовательностью операций:

000400 а.а.а.

002200 а.а.а.

а.а.а. — первая ячейка восстанавливаемого массива,

а.а.а. — последняя ячейка массива.

При восстановлении вызываются все КОП массива и записываются обратно в ОЗУ с нулем в 25-ом разряде. Указанный нуль является сигналом для машины, что соответствующая КОП еще не опрашивалась.

После восстановления программа выходит на адрес 777.

ГУ Команды для переработки информации.

26. Сложить содержимое сумматора с ячейкой ааа

а) результат записать в ячейку "ааа", оставить на Рд и на сумматоре

102600ааа

б)результат записать ячейку aaa оставить на РКд, сумматор гасится

I00220aaa

в)результат оставить Рдд и на сумматоре

I00261aaa

г)результат оставить РКд(сумматор гасится)

I00221aaa

При выполнении операции старшие 10 разрядов ячейки „aaa” ни в одной модификации не меняются. Действия выполняются только с младшими 16 разрядами. Это относится также к следующим трем командам (пункты 27, 28, 29). Если результат операции больше 16-ти разрядного числа, происходит переполнение сумматора и вырабатывается признак φ

27. Вычесть содержимое ячейки aaa из содержимого сумматора.

Соответствующие модификации записываются в следующем виде:

а) I00261aaa

б) I00222aaa

в) I00263aaa

г) I00223aaa

Если результат получен меньше нуля - вырабатывается признак $\varphi=1$ Если результат равен нулю - $\varphi=0, \omega=1$.

28. Логическое умножение содержимого сумматора с младшими 16 разрядами ячейки „aaa”, соответствующие модификации:

а) I00264aaa

б) I00224aaa

в) I00265aaa

г) I00225aaa

Признаки: $\varphi = \omega = 0$

29. Перевод содержимого младших 16 разрядов ячейки „aaa“ с двоично-десятичного кода 842I в двоичный код:
а) результат записать в ячейку „aaa“ оставить на сумматоре и РКд:

100230aaa

- б) результат оставить на сумматоре и РКд

100231aaa

Всегда $\varphi = \omega = 0$.

30. Сдвинуть содержимое регистра кодов на один разряд:
а) вправо:

004000000

При этом в 26-ом разряде записывается "0"

- б) влево:

001400000

В данном случае "0" записывается в первом разряде регистра кодов. В обоих случаях результат операции получается на РКд. Если 16-тый разряд его в конце операции содержит единицу, вырабатывается признак $\omega=1$. Признак φ в этой операции не меняется.

Отметим, что содержимое сумматора и величины признаков φ , ω , β меняются только в тех командах, где это было отмечено. Кроме того младшие 16 разрядов некоторых команд в операциях не участвуют и следовательно могут использоваться рабочим полем программы. Это относится к командам, рассмотренным в пунктах: 7; 9; 10; 16; 24; 30.

Л и т е р а т у р а.

1. Караидеев К.Б., Цаленко М.П., Измерительные информационные системы. Сб. статей "Информация и кибернетика" М. Изд-во "Советское радио", 1967.
2. Бергунс А.А., Кузьмин Ю.Я., Специализированная машина, управляющая научным экспериментом. Реферат на конференции "Вычислительные системы" Новосибирск, 5 + II июнь, 1967.

3. Лэмпсон, Лихтенберг, Иизэр, Пиртли, Система с автоматическим распределением машинного времени между независимыми пользователями. Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (русский перевод), том 54, 1966, № 12.
4. Эдвардс Д. В., Боуден К. Ф., Применение малой ЦВМ для сбора текущей информации. Экспресс информация "Вычислительная техника", 1966, № 32.
5. Голубев - Новожилов Ю. С., Многомашинные комплексы вычислительных средств". М., Изд-во "Советское радио", 1967.

С о д е р ж а н и е

	стр.
- Предисловие.....	3
<u>ГЛАВА 1. Необходимость и возможность кибернетизации научного эксперимента.</u>	
^ Введение	7
§ 1. Основные принципы кибернетизации научных исследований	9
§ 2. Научно-исследовательская кибернетическая система	20
§ 3. Комплексный эксперимент	30
§ 4. Основные типы схем эксперимента	37
Литература	47
<u>ГЛАВА 2. Научно-исследовательская система НИКС.</u>	
§ 1. Обзор организации вычислительно-управляющих средств в научно-исследовательских системах.	53
§ 2. Системы экспериментирования Проблемной лабо- ратории физики полупроводников ЛГУ им.П.Сту- чки	64
Литература	73
<u>ГЛАВА 3. Обработка измерительной информации.</u>	
- Введение	77
§ 1. Методы сглаживания	78
§ 2. Оценка методов сглаживания	90
§ 3. Анализ одной кривой	94
§ 4. Разложение системы кривых на независимые компоненты.....	103
§ 5. Пример обработки измерительной информации	107
Литература.....	III

