

ЛАТВИЙСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. СТРУЧКИ

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА



РИГА

2

1971

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

(выпуск 2)

Ученые записки, том 144

РИГА 1971

В настоящем выпуске рассматриваются вопросы технического оснащения современного эксперимента по физике твердого тела, вопросы системного подхода при организации лабораторного эксперимента, возможность работы УЭМ "Днепр-1" на два эксперимента. В сборнике приведены результаты исследования погрешностей линейных методов сглаживания.

Сборник предназначен для научных работников, инженеров и студентов, интересующихся применением новейшей методики и техники в научном эксперименте.

Первый выпуск вышел в свет в 1968 году.



v 999-10-71
200022632

ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ "МИНИ-ЭКСПЕРИМЕНТА"

Наряду с глобальными экспериментами в области ядерных и космических исследований, для которых необходимость автоматизации на базе применения ЦВМ не вызывает сомнений, в науке существует масса небольших по масштабу экспериментов⁺), практически не охваченных автоматизацией. Типичными представителями последних являются эксперименты с области физики твердого тела.

Следует сразу же отметить, что, несмотря на малость информационных потоков в "мини-эксперименте", в целом объем информации, получаемой в области физики твердого тела, исключительно велик. Так, если поставить задачу исследования хотя бы основных параметров всех новых материалов, то ежегодно пришлось бы проводить до 10^{30} измерений. Оценивая количество операций, которые могут проделать вручную исследователи за год, числом 10^{10} , найдем, что имеющиеся людские возможности примерно в 10^{20} раз слабее, чем это требуется при такой постановке задачи.

В настоящее время подобное несоответствие разрешается ограничением числа объектов, подлежащих исследованию; ограничением числа исследуемых параметров, воздействующих факторов и областей их изменения; использованием специальных методов исследований; ускорением операций эксперимента; увеличением количества исследований и техническим оснащением исследователей.

Автоматизация также является одним из способов интенсификации исследований. Однако, поскольку применение автоматизации обычно не позволяет ускорить сами операции эксперимента более чем в $10^2 + 10^6$ раз, то основным

⁺) такие эксперименты в дальнейшем будем называть "мини-экспериментами", их основные черты рассмотрены ниже.

направлением развития автоматизации должна быть разработка новейших средств и методов исследований на основе динамической переработки измерительной и управляющей информации с целью определения наиболее информативных параметров веществ и факторов воздействий.

Динамику развития технических средств обеспечения эксперимента подлежащих автоматизации можно представить следующей последовательностью

приборы → установки → системы →
→ измерительные комплексы по научным проблемам →
→ единая сеть получения информации в рамках
отраслей науки.

В настоящее время технические средства обеспечения физики твердого тела находятся на стадии создания научно-исследовательских систем. Последовательность узловых моментов этой стадии отображена на рис. I.

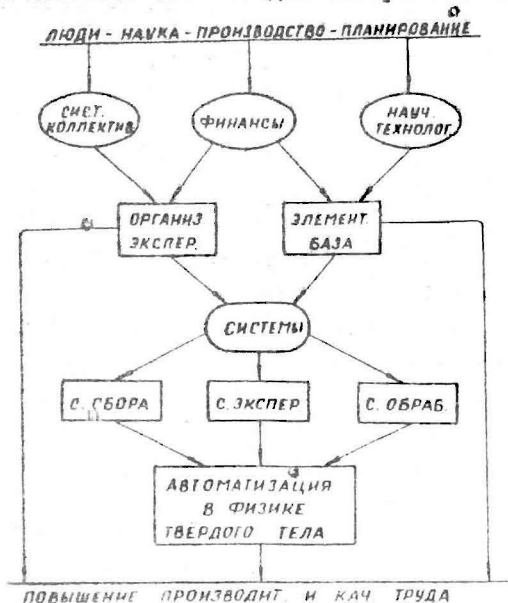


Рис. I

На рисунке показано, что исход зависит от уровня финансирования, степени разработанности научной технологии, позволяющей создавать элементную (приборную) базу и от наличия системных коллективов⁺) по отдельным направлениям автоматизации эксперимента. Успешное решение этих вопросов позволит начать разработку элементной базы и системных принципов организации эксперимента, это, в свою очередь, делает возможным создание научно-исследовательских систем (сбора, экспериментирования и обработки), которые позволят человеку справиться с большими и быстрыми потоками информации.

§ I. ОСОБЕННОСТИ "МИНИ-ЭКСПЕРИМЕНТА"

Исследования по физике твердого тела редко связаны с аппаратурой стоимостью свыше нескольких десятков тысяч рублей (исключение составляют эксперименты с твердым телом на реакторах). Поскольку физики здесь не объединены мощным и дорогим оборудованием, вопросы эффективного использования экспериментальной базы и эффективности самих исследований практически не ставятся.

Объем вычислительных работ при постановке "мини-эксперимента" невелик и сводится в основном к применению корректирующих таблиц и несложных арифметических преобразований (например, смена системы координат на графиках).

Измерительное оборудование современного "мини-эксперимента" часто довольно сложное и допускает регулировку до нескольких десятков параметров. Вопрос оптимальной регулировки актуален.

Высокая чувствительность, воспроизводимость и точность, — одни из основных требований физика, иногда к

⁺) Соображения по составу системного коллектива высказаны в § 7.

ним добавляется требование быстродействия, особенно при кинетических измерениях.

Исследования в физике твердого тела редко бывают массовыми. Чаще всего используются поисковые эксперименты, по уточняющемуся в процессе исследования заданию. Это затрудняет алгоритмизацию исследований.

Как известно, основной способ получения информации в физике твердого тела - эксперимент, т.е. наблюдение за объектом в искусственно варьируемых условиях, поэтому перспективность автоматизации только за счет построения систем сбора информации по примеру ядерщиков и биологов становится невысокой.

Для физики твердого тела характерно большое разнообразие измеряемых параметров (ток, интенсивность и длина волны света, температура, интенсивность поля и т.п.), вопрос преобразования в цифровой код которых либо не решен, либо решен только для грубых измерений.

Основной способ обработки данных в поисковых экспериментах обычно не замкнут на измерительную информацию, а предполагает использование априорных сведений, личного опыта, журнальной информации и т.п. Обработка ведется часто на уровне качественного анализа.

Структуры научно-исследовательских систем (НИС) меняются довольно часто, причем эти изменения в основном геометрического характера.

В таблице I приведены другие характеристики типичного "мини-эксперимента" на примере анализа оптических исследований.

Таблица I

№	Характеристика	Значения
1.	Стоимость аппаратуры измерительного места	1,0 + 100,0 тыс.руб.
2.	Количество обслуживающего персонала	1 + 10 человек
3.	Объем измерит. информации	$10^4 + 10^9$ бит

№	Характеристика	Значения
4.	Измерительные каналы	10 + 100 бит
5.	Каналы управления	10 + 100 бит
6.	Каналы контроля	10 + 50 бит
7.	Быстродействие измерит. и управляющих каналов	10 + 10 ³ герц
8.	Критическое время, задержка на которое может вызвать аварию	0,1 + 10,0 сек.
9.	Сложность эксперимента	различная: от 10 до 10 ⁴ операций на 1 измерение
10.	Продолжительность эксперимента	30 + 300 мин.

Таким образом, первая оценка характера физических методов не позволяет сделать заключение о бесспорной целесообразности применения ЦВМ при автоматизации исследований твердого тела.

§ 2. НАПРАВЛЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ ЦВМ В "МИНИ-ЭКСПЕРИМЕНТ"

Однако, несмотря на целый ряд отрицательных факторов, в физике твердого тела уже сейчас имеются задачи, в которых ЦВМ целесообразна. Наряду с большим процентом поисковых исследований, существуют стандартные, проведенные опытом и проникшие далеко за пределы физики методы.

1. Спектральные исследования:

спектры люминесценции (возбуждения, излучения, гашения); спектры поглощения, отражения, рассеяния; термостимулированные спектры (люминесценции, поглощения, проводимости и др.); спектры фотопроводимости; инфракрасная спектроскопия; эмиссионная спектроскопия и др.

2. Электрические измерения:

вольтамперные характеристики, фото- и термопроводимость; термоэдс, эффект Холла и др.

такие информативные методы,

Наконец, как электронный парамагнитный и ядерный резонанс, рентгеноскопия, масспектроскопия.

Во всех этих исследованиях требуется обработка измерительной информации, управление и контроль аппаратуры. Информационные потоки здесь могут быть значительными, до 10^8 бит на эксперимент и выше.

Следует отметить, что по некоторым методам имеется опыт автоматизации.

3. В физике твердого тела существует ряд задач, которые требуют весьма сложного управления воздействиями на объект, причем это управление может зависеть от результатов обработки текущей измерительной информации. Типичным примером такой задачи является метод фракционного высвечивания (см. ниже). В основном же регулирование в эксперименте осуществляется по далеко не всегда оптимальным режимам линейных изменений.

4. Имеются кинетические задачи, требующие одновременно большого быстродействия и точности регистрации (порядка $10^2 + 10^6$ изм./сек и $0,1\% + 2,0\%$). Прежде всего, это исследования рекомбинационных процессов.

5. Существуют вопросы на комплексные многопараметрические измерения, когда одновременно изучается более двух параметров при изменении нескольких воздействий. Например, часто требуются одновременные измерения оптических и электрических характеристик твердых тел.

6. Наконец, существуют физико-технические исследования по твердому телу, при которых ставится задача замера стандартных характеристик многих десятков и даже тысяч веществ. Часто из-за емкости информационных процессов задача "вручную" не решается. Вообще следует отметить, что внедрение ЦВМ в эксперимент может быть проведено в двух главных направлениях :

- алгоритмизация старых традиционных методов, разработанных с учетом возможностей ручного управления, контроля и сбора информации. От автоматизации этого направления следует ожидать ускорения хода эксперимента, разгрузку от механической работы исследователя;
- разработка принципиально новых методов исследований, возможных именно благодаря ЦВМ. Это наиболее перспективный путь, требующий, однако, коренного пересмотра многих методических и теоретических положений физики твердого тела.

Можно сказать, что физики пока что не привыкли смотреть на объекты своих исследований как на потенциальные источники колоссальных потоков измерительной информации, а потому еще не умеют разрабатывать соответствующие методы исследований. В этом смысле возможности ЦВМ пока что опережают потребности физиков.

§ 4. ТРЕБОВАНИЯ "МИНИ-ЭКСПЕРИМЕНТА" К ЦВМ

Существует много точек зрения на требования к ЦВМ, применяемым при автоматизации эксперимента. На наш взгляд наиболее существенными из них являются требования к структуре команд, объему памяти, быстродействию, возможности реализации режима разделения времени, а также к типу машины.

I. Структура команд

Анализ ряда алгоритмов спектральных исследований показал следующее распределение операций в программах:

Таблица 2

Т и п о е р а ц и и	% относительно к длине прогр.
Обмены с ОЗУ	35
Безусловн. переходы	21
+, -, \wedge , \oplus , сдвиг	13
Усл. переходы	7
Управление приборами	6
Спрос приборов и контроль	7
"Пауза"	5,5
Остальные	5,5

Из таблицы 2 видно, что спектральные исследования требуют около 20% специфичных для управляющих машин операций.

Опыт показал, что спектральные исследования довольно хорошо программируются одноадресными командами. Длина слова управляющей и измерительной информации составляет $10 + 16$ разрядов. Объем соответствующих программ на машине разработанной в ЛГУ им. П. Стучки составляет $300 + 500$ слов; на "Днепр-1" такие программы занимают $1 + 2$ тысячи слов.

Оказалось, что, поскольку программы обработки спектров весьма продолжительны, имеет смысл распараллелить спектральный эксперимент на этап непосредственного экспериментирования и этап обработки. (Приведенная выше таблица относится к этапу экспериментирования).

Выяснилось также, что на этапе экспериментирования наиболее сильной мерой контроля является графическая

индикация измерительной информации на экране двухкоординатного осциллоскопа либо на диаграмме ХУ-самописца.

2. Объем требуемой оперативной памяти ЦВМ

Он определяется длиной программ спектральных исследований и объемом измерительной информации. Последний может быть значительно сокращен в следующих случаях:

1. Если усреднение данных производится во время эксперимента.

2. Если требуется только графическое изображение спектра. Тогда информация выводится на ХУ-самописец.

3. Если имеется подходящий цифровой накопитель, например, НМЛ, барабан, либо скоростной перфоратор.

4. Если есть возможность транслировать данные в память большого процессора.

Во всех остальных случаях при спектральных исследованиях необходимо иметь память объемом в несколько тысяч, а иногда десятков тысяч слов. Например, при люминесцентных спектральных исследованиях для достижения максимальных точностей регистрации одного спектра в районе видимого света и ближнего ультрафиолета требуется память порядка 10^4 бит. Если требуется исследовать изменения спектра под воздействием посторонних факторов, предположим, температуры, то необходимый объем памяти возрастает до 10^6 бит.

3. Требуемое быстродействие ЦВМ в режиме "in line "

Оптимальное быстродействие зависит от соотношения времени исследуемых процессов - с одной стороны и времени исполнения всех машинных операций, затрачиваемых на эксперимент - с другой.

Продолжительность операций эксперимента складывается из нескольких компонент:

а) времени срабатывания механических элементов (затворы, фильтры и т.п.) $40 + 200 \text{ мс}$;

б) время срабатывания измерительной и воздействующей электроники (АЦП, коммутаторов сигналов, ЦАП с исполнителями и т.п.) $20 + 100 \text{ мс}$;

в) время установления температурных процессов $0,1 + 100 \text{ с}$;

Например, продолжительность получения одной точки спектра люминесценции составляет от 30 мс до 1 сек . На эту процедуру тратится от 100 до 200 операций. По этим данным среднее быстродействие УВМ для данного эксперимента составит $3 + 6 \text{ тыс. опер. в сек.}$

4. Разделение времени

Для спектральных исследований характерна цикличность во времени.

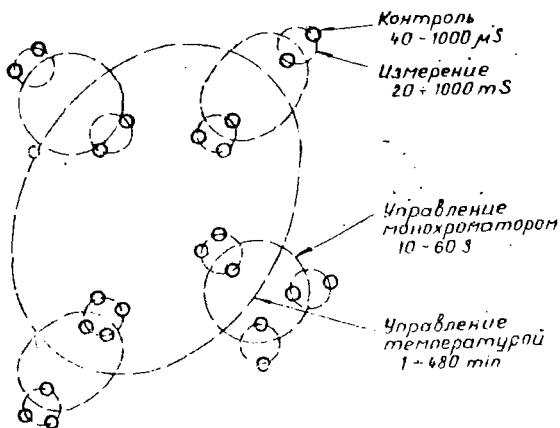


Рис. 2.

Циклический характер эксперимента, относительно большая продолжительность процессов и наличие быстродействующих ЦВМ позволяют поставить вопрос о применении режима разделения времени в таких системах. Однако режим разделения времени должен учитывать основную особенность исследований твердого тела - широкое применение эксперимента, т.е. сбора измерительной информации в регулируемой и контролируемой среде. При этом на ЦВМ возлагается не только задача пассивного сбора и контроля, но и своевременного управления воздействиями на объект. Неправильные решения могут привести к аварийным ситуациям. **А в а р и й н а я с и т у а ц и я** - особенность практически любого эксперимента. Существует два способа борьбы с ней: аппаратный и программный. Первый предполагает различные автоблокировки, самоконтроль и другие меры, второй означает ограничения на времена ожидания и обслуживания системы. Для спектральных исследований необходимо сделать время ожидания на обслуживание систем не больше $20 + 100 \text{ мс}$.

Система с разделением времени целесообразна еще и потому, что позволяет легко перераспределять вычислительные мощности между различными экспериментами.

Режим разделения времени позволяет также повысить эффективность использования ЦВМ за счет возможности решения "фоновых" задач, параллельно с проведением экспериментов. В качестве таких задач может идти обработка результатов предыдущих исследований, инженерные и другие расчеты.

5. Тип ЦВМ

Для обслуживания нескольких "мини-экспериментов" наиболее целесообразно применять иерархическую структуру, состоящую из трех уровней:

- I - уровень организации работы каждого отдельного измерительного и управляющего блока. На этом уровне эффективны надежные и простые специализированные автоматы с жесткими программами.
- II - уровень организации взаимодействия этих блоков, на котором функционируют программы непосредственного получения измерительной информации. Здесь можно применять либо специализированные машины, если идет речь об автоматизации устоявшихся методик исследования, либо малые универсальные машины, если методики подвержены частым изменениям, либо, наконец, "виртуальные" машины, запрограммированные в центральном процессоре третьего уровня и имеющие регистры обмена информацией с устройствами первого уровня.
- III - уровень работы с потоками измерительной и управляющей информации. Здесь целесообразно использовать большие ЦВМ со значительным объемом памяти и со способностью работать в режиме разделения времени. На этом уровне происходит накопление измерительной информации; полная обработка измерительной информации с целью выдачи результатов исследователю; частичная обработка с целью формирования обратной связи эксперимента; вычисление сложных режимов физических воздействий; подготовка программ для устройств второго уровня в режиме автоматизации программирования и другие виды вычислений.

В ЛГУ им. П. Стучки практически освоено три способа организации эксперимента:

1. Задачи первого и второго уровней для одной системы полностью решаются УВМ "Днепр-1". На ней же ведется последующая обработка данных.
2. Задачи первого уровня решаются автоматами, задачи второго уровня - удаленной на 40 м от эксперимента

"Днепр-1".

3. Реализована трехуровневая система на базе автоматов, специализированной управляющей машины и машины

"Днепр-1", накапливающей и обрабатывающей информацию.

Следует отметить, что выбор "Днепр-1" в качестве машины для автоматизации исследований был обусловлен главным образом лишь простотой ее приобретения. Опыт показал, что несложные эксперименты вполне реализуются на "Днепр-1", несмотря на целый ряд недостатков, присущих этой машине.

В настоящее время ведутся работы по созданию трехуровневой системы на базе ЦВМ "Днепр-21", обслуживающей четыре эксперимента одновременно.

Вообще промышленные управляющие машины без дополнения их специальными каналами ввода-вывода информации, на наш взгляд, вряд ли могут быть непосредственно применены в эксперименте, поскольку АЦП и ЦАПы этих машин не имеют требуемой чувствительности и точности для обслуживания датчиков эксперимента, кроме того, в управляющих машинах нет необходимых для эксперимента исполнительных элементов.

§ 5. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛГУ им. П. СТУЧКИ

В ЛГУ с 1966 по 1968 г.г. последовательно вступили в строй три системы автоматизации спектральных исследований твердых тел. Во всех трех системах УВМ работает в режиме реального времени.

Структура систем оформлена по обычной схеме систем экспериментирования.

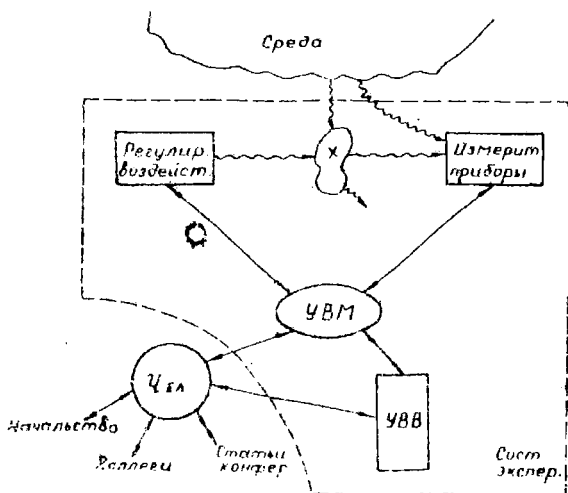


Рис. 3.

Функции системы следующие:

- непосредственное цифровое управление источниками физических воздействий (свет, рентген, температура) и вычисление параметров воздействия;
- непосредственное цифровое измерение ответов объекта (свет, температура). На каждом канале стоят АЦП, изготовленные в ИГУ, либо типа "Солартрон";
- контроль за аппаратурой;
- 1-я обработка информации (коррекция, усреднение) и вычисление некоторых физических параметров;
- графическое и табличное представление информации физики и накопление данных на перфоленте или в ОЗУ.

Элементная база, разработанная в ЛГУ
или "Конструктор физика"^{†)}

Подобно тому, как и в промышленности, источники эффективности применения ЦВМ в исследованиях можно разбить на две группы: явные, т.е. обусловленные непосредственно использованием ЦВМ, и неявные.

К явным относится прежде всего увеличение темпов измерений, ускорение обработки информации, возможность постановки качественно новых экспериментов и т.п.

К неявным следует причислить расширение горизонта исследователей, усвоение неизвестных ранее прогрессивных методик, выработка более строгого подхода к эксперименту и т.п.

Промышленность оценивает соотношение этих источников как 1:1. Считается также, что общая эффективность внедрения ЦВМ составляет не более 5 + 7%.

Известно, что для решения многих задач автоматизации большое значение имеет стандартизация и полнота набора элементов, на основе которых предполагается собирать автоматические системы.

В ЛГУ им.П.Стучки на базе этих требований был разработан универсальный набор элементов, получивший название "конструктор физика", позволяющий осуществить большое количество экспериментов по оптическим исследованиям. Чтобы элементы могли быть подключены в ЦВМ, к ним было предъявлено еще одно требование - возможность цифрового управления и контроля.

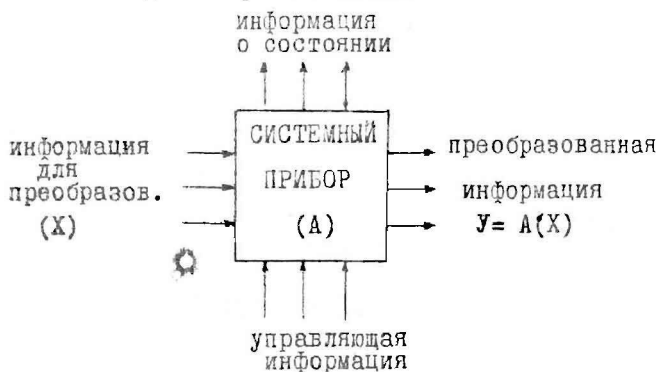
Таким образом по принятой идеологии построения "конструктора" каждый из универсальных элементов разра-

^{†)} Разработка существующей элементной базы и систем - заслуга физиков и конструкторов лаборатории: И.Тале, И.Витол, Я.Страумен, О.Аболиньш, Э.Тарденак, Г.Лимеж и др.

999.10-41



бывает в виде четырехполюсника.



На один из его входов поступает сигнал, подлежащий преобразованию (например, ток от ФЭУ), другой вход служит для управления ("пуск-стоп" прибора, диапазон измерения прибора, режим измерения и т.п.). Соответственно, на одном из выходов появляется преобразованный прибором сигнал (код тока ФЭУ, код температуры, свет заданной длины волны и т.п.), а на другом - контрольные сигналы от прибора (готовность к следующему запуску, сигнал переполнения шкалы и т.п.).

"Конструктор" включает следующие элементы:

- набор АЦП для непосредственного цифрового измерения интенсивности света и температуры. Кванты преобразования соответственно: $2 \cdot 10^{-12} \text{ а}$ и 4 мвк за 20 мс;
- набор преобразователей "код-вал" для поворота призмы и щелей монохроматоров;
- набор кристаллических головок для исследования спектров поглощения, люминесценции, фракционного высвечивания. Область температур от -200°C до $+400^{\circ}\text{C}$, быстроедействие до 15 град/сек;
- блоки кодовой регуляции температурой в указанной выше области;

- коробки с источниками света (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного);
- коробки с фотоумножителями разных марок. Ряд коробок позволяет охлаждать ФЭУ жидким азотом и стабилизировать температуру охлаждения;
- коробки с 6 оптическими, либо ослабляющими фильтрами.
- оптические затворы и модуляторы света;
- держатели линз, одиночных фильтров, переходные кольца и другие специальные элементы.

У всех элементов стандартизирован диаметр световых отверстий (38 мм), имеется возможность закрепления либо на рельсах, либо с помощью специальных зажимов. Предусмотрена возможность юстировки.

"Конструктор физика" позволяет легко собирать разнообразные схемы эксперимента.

Сборка обычно производится на универсальных стендах, выполненных в виде амортизированных "столов" с кристаллом в центре и пазами, предназначенными для крепления на рельсах аппаратуры программируемого эксперимента.

"Стол" представляет собой, по существу, еще один универсальный элемент "конструктора".

Ясно, что заложенные в основу "конструктора физика" принципы: стандартность, универсальность, полнота набора, возможность управления и контроля ЦВИ делают его ценным не только при автоматизации, но и в обычных условиях работы.

Нам кажется, что этот подход неизбежен и для автоматизации и в других областях науки. Так постепенно сможет сформироваться "общий конструктор физика" - единая система элементного обеспечения самых разнообразных исследований, система, подобная ГСП в промышленности.

Система программированных исследований спектров поглощения

Система экспериментирования состоит из криостата с программно перемещаемым объектом исследования, трактов рентгеновского, температурного и светового воздействий. Измерительный тракт представляет собой оптические затворы, два коммутируемых фотоэлемента и АЦП, работающий в режиме измерения слабых токов.

В контуре системы находится "Днепр-1". Эта же система при другом геометрическом расположении элементов позволяет исследовать спектры люминесценции (рис.4).

По программе в ОЗУ "Днепр-1" (рис.5) производится вычисление угла поворота призмы, соответствующего энергии (E) анализируемой точки спектра

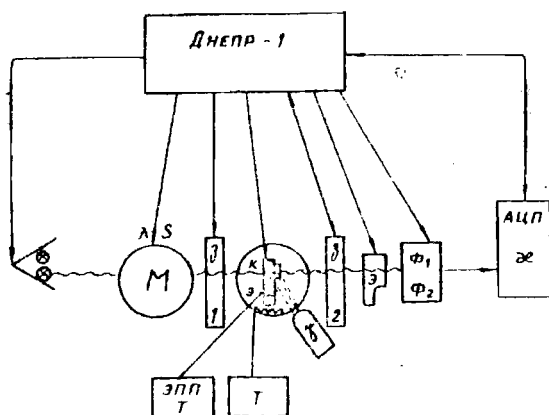


Рис. 4

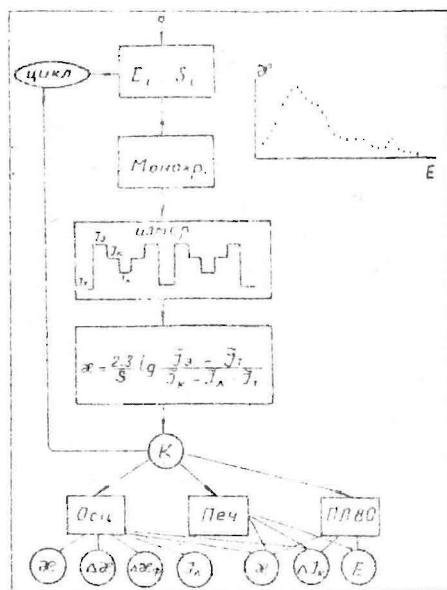


Рис. 5.

После задания угла поворота, машина производит замер темнового тока фотоэлемента J_T , при этом затвор 32 закрыт. Затем "Днепр-1" включает соответствующий источник света Л1 или Л2, устанавливает в криостате на оптическом пути отверстие "Э" открывает 31 и 32 и подгоняет щель S монохроматора так, чтобы АЦП показывал почти макс. значение (предел шкалы 9,999 в).

Замеренное значение света J_2 запоминается, после чего "Днепр-1" выполняет команду введения объекта в измерительный канал, (позиция "К" в криостате) и производит замер света J_K . Для исключения возможной люминесценции, производится замер света J_A в позиции "К" при закрытом источнике света. Такая серия повторяется несколько раз, для получения статистических оценок. На основе полученной информации, вычисляется коэффициент

поглощения X и соответствующая ошибка. Программа занимает около 2 тыс. слов.

В ходе эксперимента машина выводит информацию на экран КУ-осциллографа, цифрпечать и ПЛ-80 для последующей обработки. Новое, что дала такая система для физики заключается в высокой точности измерений, воспроизводимости условий эксперимента, 5-кратном ускорении эксперимента и доступности последующей обработки на ЦВМ.

Обработка информации производится на той же ЦВМ по традиционной схеме:

- измерения подвергаются сглаживанию, затем корректируются (чаще всего в процессе эксперимента);
- улучшенная таким образом информация подвергается разложению на гауссовы, либо другие кривые заданной формы по разработанной у нас методике. Программа занимает около 3 тыс. слов, работает 5 + 15 минут;
- строится модель, анализ которой дает идеи для следующего эксперимента. Анализ идет часто вручную, но имеется и машинная модель зонной схемы. На этой модели, в частности, проверялась методика фракционного высвечивания и ряд других методик.

Следует однако отметить, что разложение на гауссовы компоненты для люминесценции, абсорбции и инфракрасной спектроскопии, как показал опыт, в основном не пригодно, т.к. реальные процессы чаще всего не соответствуют такой простой модели. Кроме того представляет известную трудность коррекция исходных данных на аппаратную функцию приборов.

Система изучения температурной зависимости спектров свечения

Система предназначена для получения указанной выше зависимости, а также позволяет исследовать спектры тушения, интегральной люминесценции, рентгенолюминесценции.

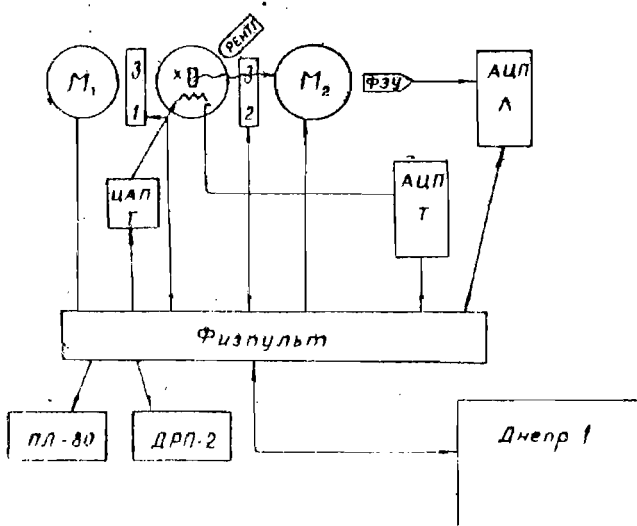


Рис. 6.

Организует работу системы малая управляющая машина "Физпулт", разработанная в ЛГУ на базе элементов "Днепр-1". Машина содержит набор операций универсальной машины, кроме умножения и деления, реализуемых программно. Машина имеет: собственное ОЗУ и систему прерывания, позволяющую ей работать в системе разделения времени с другой ЦВМ. Ввод информации в машину: пультовый, с перфоленты, через систему контрольных признаков от АЦП и от другой ЦВМ. Вывод информации: пультовый, на перфоленту, исполнительные механизмы, графопостроитель и линию связи с ЦВМ. Двухлетний опыт эксплуатации машины показал перспективность ее использования в "мини-экспериментах" рассматриваемого типа.

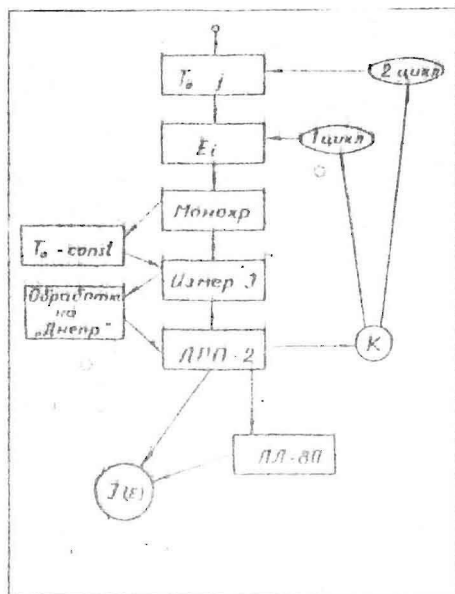


Рис. 7.

На рисунке 7 изображена одна из программ совместной работы "Физпульта" и ЭВМ "Днепр-1". Физпульт здесь, выступает в роли "физика-экспериментатора", занятого самим экспериментом, а "Днепр-1" - в роли "теоретика", принимающего и обрабатывающего информацию. Несложная обработка возможна и в "Физпulte".

"Физпульт" изменяет температуру либо в режиме последовательного нагрева, либо в режиме стабилизации по отдельным уровням. Он же следит за показаниями АЦП-Т и считывает с АЦП-Л значения интенсивности свечения, предварительно настроив шаговый двигатель монохроматора на

нужную точку спектра. Продолжительность одного спектра 15 + 30 сек. Полученные данные "Физпульта" передает на "Днепр-1", там они в уплотненном виде запоминаются. Всего измеряется от 10 до 40 спектров при разных температурах. После окончания эксперимента, исследователь либо выводит данные на перфоленду, либо просматривает по одному спектру на осциллокопе и при необходимости пользуется программой анализа спектров.

Продолжительность такого эксперимента зависит от сложности объекта, величины запасенной светосуммы и диапазона температур исследования. Общий объем измерительной информации колеблется от 10^4 до 10^5 бит, на это требуется $10^5 + 10^6$ бит управляющей информации и $10^3 + 10^5$ бит контрольной информации.

Система изучения спектров фракционного высвечивания[†])

Эта система имеет ряд существенных отличий от предыдущих. Во-первых, она находится на удалении 40 метров от "Днепр-1". При эксплуатации этой системы впервые было осознано, что такое аварийная ситуация.

Во-вторых, эта система позволила реализовать эксперимент, ручная постановка которого практически невозможна.

В-третьих, это была первая в физике твердого тела система, в которой реализована динамическая обратная связь на основе обработки текущих измерений.

В-четвертых, на ней была показана возможность нового подхода к акту измерения интенсивности света. Как известно, при амплитудных измерениях малых доз света сказывается явление "усталости" ФЭУ, т.е. временной дрейф параметров ФЭУ. Применение дискретной техники позволило реализовать методику скоростного эталонирования путем измерения эталонного света, наряду со светом от объекта исследования. Скоростное эталонирование вместе с проведением темновых измерений позволило повысить

†) Метод предложен Гобрехтом (США), разработан и применен И.Тале, совместно с А.Гайлитисом, - сотрудниками Латвийского госуниверситета.

абсолютную точность регистрации почти на два порядка.

Центральная идея самого метода заключается в том, что если при исследовании спектров термического высвечивания обычно возбуждался целый набор уровней в кристалле, то в данном случае, путем подбора специального режима термического нагрева удается избежать характерного эффекта наложения физических процессов. Методика позволяет оценивать концентрации электронов на разных дефектах кристалла, а также энергетическую глубину залегания дефектов. Вся сложность эксперимента заключается в подборе оптимального режима термического нагрева и в последующей обработке информации. Длительность эксперимента составляет один рабочий день, за это время получается около миллиона бит информации. Длина программ управления и обработки составляет несколько тыс. слов.

§ 6. ОСОБЕННОСТИ ДИСКРЕТНОЙ ТЕХНИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях обычно принято различать две методики: поисковую и стандартную. Для первой, как известно, характерна постоянная смена программ исследований, поэтому поисковые исследования в машинном варианте пока что практически невыполнимы. Для них требуется разработать специальные языки, с помощью которых исследователь смог бы наиболее просто обратиться к системе. Это не могут быть ни "Фортран", ни "Алгол-60", т.к. на них, во-первых, не наложено никаких временных ограничений, следовательно, они не способны к работе в реальном масштабе времени, а во-вторых, они не учитывают специфику физического экспериментирования. Ручное управление системой дискретных приборов с помощью специальных пультов - возможно лишь при контроле, отладке и др. вспомогательных

процедурах, но не в сложном эксперименте. Ибо, даже процедура работы с дискретным монохроматором, например, требует 200 + 1000 - кратного ручного набора 4-х значных кодов.

Следующая особенность дискретных систем состоит в том, что длина программ существенно зависит от степени автономизации приборов и выбора кодов на входе и выходе. Например, десятичный код, как правило, требует специальной программы; отсутствие контрольных точек в приборе также вызывает усложнение программ.

Длину программ можно уменьшить и за счет агрегатирования приборов, если в экспериментах постоянно возникают стереотипные взаимодействия приборов. В этом случае вполне оправдывают себя специализированные автоматы, реализующие стереотипные комбинации.

Другая особенность машинной техники заключается в опасности возможной ее системной "несовместимости" с условиями реального физического эксперимента. В частности это касается импульсной техники, расположенной непосредственно с источниками мощных воздействий.

Наконец, важной особенностью является дискретность актов измерения и управления воздействиями. Для выделения сигнала из шумов приходится реализовать программное накопление информации, что связано с большими временными потерями ЦВМ на повторяющиеся процедуры. Одним из перспективных способов решения этой задачи следует считать применение интегрирующих цифровых измерителей, которые самостоятельно устраняют фоны в измерительных цепях и производят накопление сигнала. Программы обслуживания таких приборов максимально просты.

Что касается дискретного управления воздействиями, то здесь основная трудность состоит в правильном выборе шага квантования параметров воздействия. При малом шаге квантования образуются избыточные потоки измерительной

информации, появляется потребность в накопителях большой емкости, требуется значительное время на проведение всего эксперимента, что не всегда допустимо, особенно, если исследуемый процесс ограничен определенными временными интервалами. Наоборот, при большом шаге квантования всегда имеется опасность выпустить некоторые важные детали процесса, например, не заметить какой-нибудь максимум в соответствующем спектре. Одним из способов выбора оптимального шага является применение специальных адаптивных либо следящих программ.

§ 7. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Наиболее перспективными для развития методики и техники исследований нам представляется не столько автоматизация (буквально: "исключение человека" из циклов) исследований, сколько улучшение условий работы исследователя, за счет применения методов и средств кибернетики и математики в научном эксперименте. В связи с этим нам кажется, что термин *кибернетизация* исследований более отвечает смыслу происходящего. Действительно, одной из задач кибернетики является организация систем с активным участием человека.

Поскольку работы по созданию научно-исследовательских систем потребуют больших материальных и временных затрат, то основное внимание следует уделить созданию специальных исследовательских центров по отраслевой автоматизации.

Перед такими центрами нужно выдвинуть проблему повышения производительности измерений и обработки измерительной информации в рамках нескольких наиболее массовых и перспективных научных задач (например, по стандартным электрическим, оптическим и другим измерениям)⁶.

Прототипами подобных центров могут быть ядерные измерительные центры. Организация нескольких отраслевых измерительных центров позволит решить ряд важных проб-

лем: централизовать разработки в немногих местах; накопить опыт и сделать его максимально доступным для других организаций; подготовить комплексные коллективы, способные решать системные задачи; решить задачу стандартизации аппаратуры; создать математическое обеспечение.

Как известно, кибернетическая техника не уменьшает штат исследователей, а добавляет к нему значаще совершенно посторонний элемент, ибо для автоматизации сложного эксперимента необходим системный коллектив, в который входят:

1. Исследователи, знающие, что автоматизировать.
2. Инженеры, способные строить системы.
3. Математики, имеющие опыт программирования таких систем.

Любой иной коллектив будет решать задачу однобоко.

Учитывая это, было бы неразумно думать о широкой автоматизации при очевидной нехватке таких специалистов.

Создание измерительного центра связано прежде всего с образованием функционально полной универсальной элементной базы, из которой можно собирать отдельные узлы измерительного центра. Это исключительно сложная работа, тем более, что в нее входит не только разработка электронных приборов, но и разнообразных оптико-механических, вакуумных и других устройств. Задача усложняется необходимостью правильного выбора распределения нагрузки на средства технического и математического обеспечения, периферийного и центрального оборудования, устройства измерительного и вычислительного обеспечения и др.

На рис.8 показан функциональный проект измерительного центра в области физики твердого тела, разрабатываемый в настоящее время в ДГУ им.Л.Стучки. Подобный измерительный центр будет основным генератором экспериментальной информации в масштабах отдельного института.

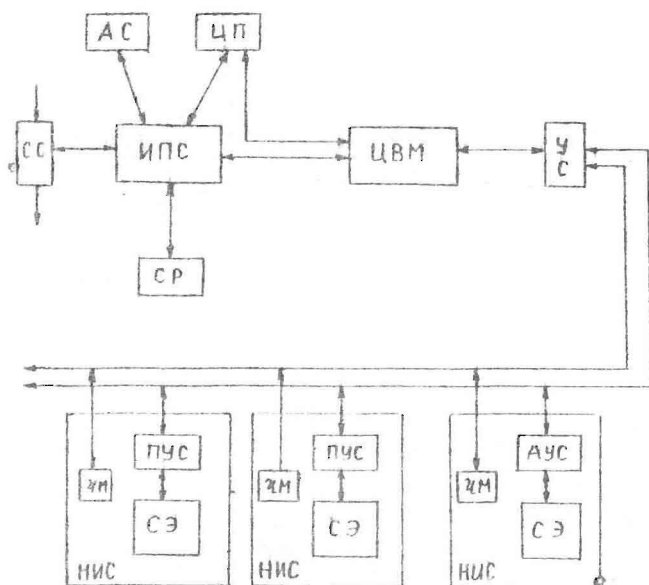


Рис.8.

Использование НИС центра возможно либо непосредственно научными сотрудниками, владеющими техникой программирования исследований, либо специальными группами обслуживания, располагающими набором стандартных методов исследований.

В будущем, по мере развития алгоритмических языков для проведения экспериментов, НИС станут доступны более широким кругам исследователей.

Функциональная структура изображенного на блок-схеме измерительного центра следующая.

Научно-исследовательская система обменивается информацией с головной ЦВМ по кабельной линии связи; при этом обмен измерительной части НИС с ЦВМ происходит с помощью пассивных, либо активных устройств связи (ИВС, АИС), находящихся

ся в НИС, и с помощью устройства связи (УС), имеющего прямой доступ к памяти ЦВМ. Выбор между пассивными, либо активными устройствами связи определяется прежде всего скоростью эксперимента. При больших скоростях система ЦВМ-линий связи- НИС, НИС₂,, НИС_n— не позволяет оперировать первичными потоками измерительной, управляющей и контрольной информации, особенно в системе разделения времени. В этом случае работа с первичными потоками должна быть проделана активными устройствами связи в измерительных местах.

Предусмотренная в НИС система связи "человек-машина" (ЧМ), представляет собой устройства алфавитно-цифровой и графической связи (телетайп, пульт, ХУ-осциллограф, ХУ-самопищик), имеющие прямой канал в память ЦВМ.

В качестве ЦВМ используется вычислительный комплекс "Днепр-2Г".

Измерительная информация, получив соответствующие признаки от информационно-поисковой системы (ИПС), размещается на хранение в архивной системе (АС). Архивная система позволяет длительно сохранять всю ценную информацию и, по мере необходимости, быстро выдавать различные ее области. Если раньше использовалась лишь незначительная часть информации, полученной во время эксперимента, то архивная система допускает многократное использование разнообразных частей измерительной информации, не запланированное частичными экспериментами.

Функция поиска запрашиваемой информации возложена на информационно-поисковую систему. ИПС взаимодействует с ЦВМ прямо или через центральную память (ЦП).

Обработка информации может быть реализована либо как "фоновая" задача на ЦВМ, либо собственными вычислительными средствами информационно-поисковой системы.

Функция редактирования информации — графическое табличное, текстовое оформление, а также ввод дополни-

тельной информации возложена на систему редактирования (СР).

При наличии родственных измерительных центров, между ними может быть установлена цифровая связь (функция системы связи - СС). СС может быть использована также для связи с вычислительными центрами, обслуживающими измерительный центр и с другими учреждениями.

В заключении следует отметить, что измерительные центры, являясь одной из форм существенного повышения производительности научного труда, имеют исключительное промышленное значение. Например, измерительные центры могут давать информацию о параметрах полупроводниковых веществ и приборов, твердых схем и других сложных элементов. Институты, располагающие такими центрами, становятся подобными своеобразным фабрикам, производящим измерительную продукцию соответственно запросам промышленности.

О СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ И ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В последнее время все более начинает осознаваться необходимость системного подхода в вопросах автоматизации научных исследований и организации эксперимента.

С точки зрения системного подхода совокупность элементов (люди, ЦВМ, УВМ, приборы и т.п.) может быть организована в систему, если соблюдены некоторые условия. Исследуем этот вопрос несколько подробнее [1-2].

Рассмотрим набор элементов $\{E_i\}$, вектора выходов которых y связаны с векторами входов x некоторым отношением трансформации $T: y = Tx$.

При образовании СИСТЕМЫ из элементов, необходимо задать отношения СВЯЗИ с между векторами выходов одних элементов и векторами входов других.

Связь двух произвольных элементов $(E_1, E_2) \in \{E_i\}$ можно также представить матрицей связи

$$C_{12} = \|\alpha_{i\kappa}\| \quad (1)$$

где $\alpha_{i\kappa} = 1$, если κ -вход E_2 связан с i -выходом E_1 , иначе $\alpha_{i\kappa} = 0$.

Структура всей системы, состоящей из N элементов, изобразиться теперь в виде следующей матрицы

$$S = \|C_{jl}\|, \quad C_{jl} = 0 \Big|_{j=l} \quad (2)$$

где будем считать $C_{jl} = 0$, если j -элемент не связан ни одним выходом с l -элементом.

Уже по внешнему виду матрицы структуры можно делать некоторые заключения о свойствах системы.

- если существует κ -элемент, для которого выполняется условие

$$\sum_i C_{i\kappa} = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

то выходы этого элемента не связаны ни с одним входом других элементов системы.

- аналогично, входы ℓ -элемента свободны, если выполняется

$$\sum_j C_{j\ell} = 0, \quad j = \overline{1, n} \quad (4)$$

Совокупность элементов, удовлетворяющих условиям (3, 4), образуют ПОВЕРХНОСТЬ системы.

- элемент для которого выполняется $\sum_i C_{i\kappa} = \sum_j C_{i\kappa} = 0$ является изолированным в системе.

- Система, структурная матрица которой может быть приведена к форме верхней или нижней треугольной матрицы с нулевой диагональю, лишена обратных связей. Невозможность приведения к указанной форме свидетельствует о наличии в системе контуров обратной связи.

Существуют формальные методы установления присутствия обратных связей в системах. В частности, для C_{ij} принимающих значения 0, либо 1 и удовлетворяющим условиям

$$\sum_i C_{ij} \geq 1, \quad \sum_j C_{ij} \geq 1, \quad (i, j) = \overline{1, n}$$

имеет место обратная связь до нескольких циклов.

- при $\sum_i C_{\kappa j} \geq 2, j = \overline{1, n}$ κ -элемент имеет разветвленный вход.

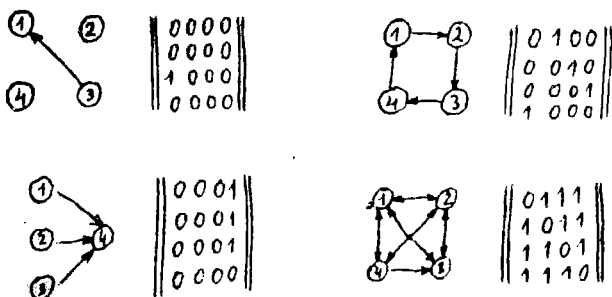


Рис.1. Некоторые системы и соответствующие им структурные матрицы.

КОМПОЗИЦИЯ СИСТЕМ

Пусть задана система S' , т.е. дан набор N -элементов $\{E_i\}$, структурная матрица S'_i и матрица трансформации \mathcal{T}' . Пусть также задана система $S''(\{E_i\}, S''_i, \mathcal{T}'')$.

Композицией систем S' и S'' назовем систему, образованную элементарным множеством $E_{\Sigma} = E'UE''$, матрицей трансформаций \mathcal{T}_{Σ} и клеточной матрицей структуры S_{Σ} .

$$\mathcal{T}_{\Sigma} = \left\| \begin{array}{c|c} \mathcal{T}' & 0 \\ \hline 0 & \mathcal{T}'' \end{array} \right\|, \quad S_{\Sigma} = \left\| \begin{array}{c|c} S'_1 & S'_2 \\ \hline S''_1 & S''_2 \end{array} \right\| \quad (5)$$

В клеточной матрице S_{Σ} член S'_i имеет смысл матрицы связей выходов системы S' со входами системы S'' , а член S''_i - связи системы S'' с S' .

Аналогично можно определить композицию более высокого порядка, т.е. нескольких систем. Классическим примером композиции является объединение нескольких машин в единую вычислительную систему.

С помощью матрицы структуры и трансформации можно выразить алгоритм функционирования системы. Действительно, пусть X, Y - множество всех входов и выходов элементов системы. Тогда обобщенным входом самой системы будет

$$X = \mathcal{T} S(X), \quad X = \{x_i\} \quad (6)$$

а обобщенным выходом системы

$$Y = S \mathcal{T}(Y), \quad Y = \{y_i\} \quad (7)$$

здесь матрица \mathcal{T} есть диагональная, типа

$$\mathcal{T} = \left\| \begin{array}{cccc} \mathcal{T}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathcal{T}_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathcal{T}_n \end{array} \right\| \quad (8)$$

где \mathcal{T}_i - трансформация элементов системы.

Таким образом, поведение системы определяется поведением отдельных элементов и структурой всей системы. Однако поведение системы может не изменяться, если существует такое представление матриц S и \mathcal{J} , что

$$S(t) = S_0 A_i(t) \quad , \quad \mathcal{J}(t) = A_i^{-1}(t) \mathcal{J}_0 \quad (9)$$

где S_0 и \mathcal{J}_0 постоянные матрицы, а A_i может принимать значения элементов множества матриц \mathcal{A} , имеющих соответственно, обратные элементы $\{A_i^{-1}\}$.

Рассмотренный здесь подход может быть применен к вопросам организации научно-исследовательских систем.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СИСТЕМЫ

Элементный набор, структура и поведение научно-исследовательских систем (НИС) должны отражать обобщенный процесс исследования:

1. выбор объекта исследования - X ,
2. получение информации об объекте,
3. накопление, переработка и последующая выдача информации.

С этой точки зрения любая НИС должна представлять систему, состоящую, по крайней мере, из четырех элементов

При построении таких систем весьма существенным является наделение их свойствами "живучести". Одним из важных способов проявления "живучести" считается возможность системы адаптироваться к изменяющимся объектам исследования и поставленным целям исследования.

Как видно из предыдущего рассмотрения, возможны три разновидности такой адаптации:

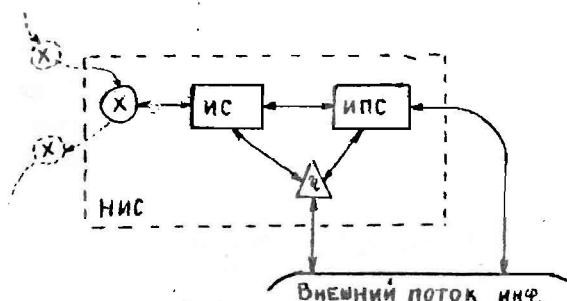


Рис. 2. Разомкнутая НИС.

ИС - измерительная система типа сбора или экспериментирования. ИПС - информационно - поисковая система, архив исследований.

Ч - человек либо организующее звено.

- а) параметрическая адаптация, т.е. за счет изменения матрицы трансформаций элементов системы - \mathcal{T} ;
- б) структурная - за счет изменения структуры всей системы - S ;
- в) и адаптация поведения - за счет совместного изменения - $S\mathcal{T}$.

Адаптация в системах сильно зависит от их типа. Рассмотрим разновидности адаптации в двух важнейших типах НИС.

I. СИСТЕМА СБОРА информации. Это пассивные исследовательские системы, способные констатировать изменения в объекте, но не вызывать их в процессе исследования.

Элемент ИИС в такой системе выполняет роль наблюдателя.

Существует несколько видов адаптации в таких системах:

- адаптация по параметрам сигнала объекта исследования. Результатом этой адаптации является сжатие информации;
- адаптация по параметрам модели. При этом ИИС должна организовать работу так, чтобы потери информации связанные с отклонениями от принятой модели объекта были минимальными;
- адаптация по комплексу критериев связанных, например, с целью исследования, недопустимостью некоторых состояний ИИС, минимизацией энергетических потерь и т.д.

2. СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЯ. Они отличаются от предыдущих систем возможностью проведения активных исследований, т.е. способностью вызывать в объекте исследования определенные изменения, позволяющие, во-первых, исследовать процессы, не наблюдаемые в обычных для объекта условиях и, во-вторых, значительно ускорить темп исследования.

Если для систем наблюдения важен вопрос наблюдаемости объекта, то для систем экспериментирования дополнительно встает проблема управляемости объекта исследования.

Понятиям наблюдения и экспериментирования можно придать более точный смысл [3], чем это обычно делается. Это должно позволить проводить оценки информационной эффективности ИИС относительно различных классов объектов исследований.

Пусть дан объект исследования внутренние параметры которого подчинены некоторому уравнению поведения $\dot{\varphi} = P\varphi$, где $P(t)$ - непрерывная матрица. О параметрах объекта можно судить по косвенным измерениям вектора $\psi = G(t)\varphi$.

Объект будет ВПОЛНЕ НАБЛЮДАЕМЫМ с помощью ИИС, если

на отрезке $[t_1, t_2]$ найдется точка τ , в которой матрицы P и G имеют непрерывные производные до $(n-1)$ -порядка и в этой точке ранг матрицы

$$K(\tau) = \{L_i = \dot{G}(\tau), L_j = \dot{P}L_{j-1}(\tau) + \frac{dL_{j-1}}{d\tau}\}, j = \overline{2, n} \quad (10)$$

равен n .

При постановке эксперимента дополнительно должно выполняться условие управляемости объекта исследований /3/.

Объект исследования назовем **ВПОЛНЕ УПРАВЛЯЕМЫМ** с помощью НИС на отрезке $[t_1, t_2]$, если НИС может за время $t_2 - t_1$ перевести объект из любого произвольного состояния Z_1 в любое другое состояние Z_2 , соответствующим выбором воздействий.

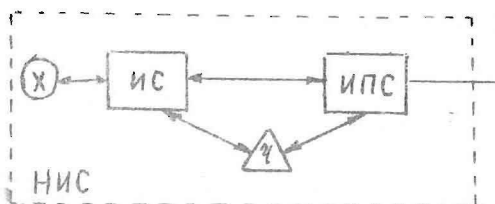
Представляет интерес изучение затронутых вопросов для некоторых классов НИС и объектов исследования. В общем очевидно, что при потере свойства управляемости объектом система экспериментирования превращается в систему наблюдения, а при утере свойства наблюдаемости любая НИС вообще перестает давать достоверную информацию. Наделение НИС способностью самостоятельно контролировать и регулировать эти свойства позволило бы сделать их более самостоятельными и эффективными.

ЗАМКНУТЫЕ И РАЗОМКНУТЫЕ НИС

При построении изменяющихся, в частности адаптивных, НИС необходимо считаться со степенью замкнутости конкретного процесса исследования.

Процесс исследования является **замкнутым**, если он реализуется по схеме Рис.3.

В этом случае можно надеяться на построение системы, параметры, структура и алгоритм которой определяются информацией, получаемой в процессе исследования. Подоб-



Замкнутая НИС

Рис.3.

ная система, не выходя за рамки своих целей, способна к продолжительной генерации информации.

Однако в большинстве случаев исследователь имеет дело с разомкнутыми системами, управление которыми требует дополнительных сведений, иногда далеко выходящих за его способности и возможности НИС. Такими сведениями являются результаты, получаемые другими исследователями либо данные других наук. Оперативность использования такой информации в настоящее время необычайно затруднена из-за частой неполноты информации.

ПОИСКОВЫЕ И СТАНДАРТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как указывалось выше, возможна организация неизменяющихся НИС и НИС с изменяющейся элементной базой, структурой и поведением.

Исследования, в которых со временем меняется $\{E_i\}$ S , либо T , называются ПОИСКОВЫМИ. В противном случае исследования являются СТАНДАРТНЫМИ.

В поисковых исследованиях возможны изменения, уточнения цели исследования и даже формирование новых целей на основе анализа процесса исследования.

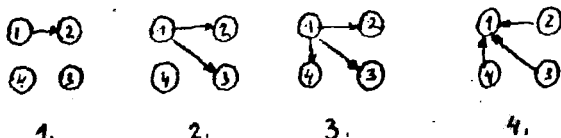
Однако чаще всего исследователь имеет заранее установленную цель, стандартную структуру и алгоритм исследований и ищет наиболее оптимальные, с его точки зрения, параметры элементов системы. Например, часто ставится вопрос о поиске района максимальной информативности воздействий на объект.

Более сложным является поиск оптимальных алгоритмов съема информации или режимов возбуждения объекта. Эта задача означает необходимость наличия хорошего контакта исследователя с системой; в частности, требуется гибкий язык связи "человек-система" и наглядные средства отображения процесса исследований.

Еще более сложным является поиск оптимальной структуры исследования. Изменяющуюся во времени структуру системы можно описать с помощью матрицы

$$S = \|\beta_{ik}\|, \quad \beta_{ik} = 0 \Big|_{i=k}, \quad (i, k) = \overline{1, N} \quad (II)$$

где $\beta_{ik} = B(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ - булевский функции от $m = \lg_2 N$, если $\lg_2 N$ - целое и $m = \text{entier}(\lg_2 N) + 1$, если $\lg_2 N$ не целое, переменные $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ - служат входами, с помощью которых можно изменять структуру системы.



$$S(t) = \left\| \begin{array}{cccc} 0 & (\bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_2 \vee \bar{\gamma}_1 \gamma_2 \vee \gamma_1 \bar{\gamma}_2) & (\bar{\gamma}_1 \gamma_2 \vee \gamma_1 \bar{\gamma}_2) & (\gamma_1 \bar{\gamma}_2) \\ \delta_1 \delta_2 & 0 & 0 & 0 \\ \delta_1 \bar{\gamma}_2 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_1 \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|$$

Рис. 4.
Система с управляемой структурой.

Основная трудность управления структурой заключается в необходимости реализации геометрических изменений в НИС, возможности быстрого введения или устранения отдельных измерительных, воздействующих, исполнительных, регистрирующих и вычислительных блоков. Такие операции сейчас особенно трудны из-за отсутствия полного набора универсальных стандартных блоков, а также из-за громоздкости и неприспособленности к изменениям современных систем.



В заключение отметим некоторые требования, которым должна, на наш взгляд, удовлетворять любая правильно организованная НИС.

1. СПОСОБНОСТЬ К РАЗВИТИЮ. По-видимому, дело не в том, чтобы продумать систему в мелочах для обеспечения ей нескольких лет жизни, а в том, чтобы заложить в ней возможность достаточно легкого динамического "омоложения". Одним из необходимых условий этого является прежде всего разработка универсальных элементов систем и развитие программируемых структур.

2. ОПЕРАТИВНОСТЬ в управлении, поиске и выдаче информации. Необходимым условием является развитие языков и устройств связи исследователя с НИС.

3. АККУМУЛЯТИВНОСТЬ, т.е. способность к накоплению и длительному хранению информации. Для этого НИС должна содержать информационно-поисковую систему. В противном случае измерительная информация со временем станет необозримой, начнутся большие потери, исключится возможность цельного подхода к такой информации.

4. Система должна обеспечивать относительную ПОЛНОТУ информации как об объекте, так и о дополнительных параметрах исследования. Известно, что отсутствие незначительных, на первый взгляд, данных часто исключает однозначность последующей интерпретации результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ланге О. Целое и развитие в свете кибернетики, "Прогресс", М., 1969.
2. Сб., Кибернетизация научного эксперимента, ЛГУ им.П.Стучки, Рига, 1968.
3. Красовский Н.Н., Теория управления движением, "Наука", М., 1968.

Ю. Кузьмин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ
(НИС)

§ I. В в е д е н и е

При постановке современного эксперимента приходится решать целый ряд разнообразных вопросов:

1) разработка общей методики проведения эксперимента включая методику непосредственного экспериментирования, методику сбора, обработки, хранения и представления результатов;

2) выбор соответствующей технической базы эксперимента и разработка недостающих элементов;

3) определение уровня автоматизации отдельных этапов эксперимента и всего эксперимента в целом;

4) определение средств автоматизации (управляющая либо вычислительная машина, универсальная либо специализированная машина, большая либо малая машина, одна ЦВМ либо многоуровневая вычислительная система и т.п.);

5) разработка системы связи человека с НИС во время эксперимента.

Естественно желание разработчиков построить в каждом конкретном случае оптимальную, в определенных отношениях либо близкую к оптимальной НИС.

Однако возможности построения оптимальных НИС сильно ограничиваются традиционными методами научного приборостроения, поскольку вместо отдельных, хороших самих по себе приборов, требуется построить систему из сопрягаемых друг с другом и с ЦВМ приборов, отвечающих всем требованиям эксперимента.

В последнее время именно для этой цели - создание систем подобного типа (по крайней мере, в техническом отношении) - был разработан целый набор специальных методов проектирования (1 + 5). Ниже мы вкратце изложим основные идеи системного проектирования на примере разработки НИС для изучения термической прочности объектов.

§ 2. Понятие о научно-исследовательских системах

Научно-исследовательские системы - средство проведения современных сложных научно-технических экспериментов. Необходимость разработки систем определяется сложностью объектов исследований, большими объемами измерительной информации, потребностью обработки информации во время эксперимента, сложностью управления физическими воздействиями, сложностью исследовательской методики, большим количеством контролируемых и измеряемых параметров и другими факторами.

Научно-исследовательские системы являются результатом обобщения опыта разработок научного приборостроения.

Под НИС обычно понимают упорядоченное множество элементов, взаимосвязанных и действующих в процессе выполнения задач исследования как целое.

Различают следующие элементы систем:

- измерительные - получающие информацию об объекте исследования и параметрах окружающей среды, которые могут влиять либо на объект, либо на систему в целом;
- воздействующие - позволяющие активно влиять на объект исследования и среду;
- вычислительные - производящие обработку измерительной информации, вычисляющие режимы воздействий, проверяющие выполнение логических условий протекающего процесса;

7. Способна к дальнейшему развитию (дополнению, видоизменению), как программно, так структурно и параметрически.

Последнее свойство НИС исключительно ценно, поскольку позволяет постоянно совершенствовать методику исследований (изменением программы или элементов НИС), что обычно невозможно для специализированных установок. Это, а также способность НИС обрабатывать информацию и представлять ее в самом удобном виде исследователю делает НИС незаменимым средством современных исследований.

К числу недостатков НИС следует отнести необходимость высококвалифицированного персонала для обслуживания и высокую стоимость (которая, однако, вполне окупается преимуществами НИС).

§ 3. Основные этапы проектирования систем

Цель проектирования систем состоит в разработке при определенных ограничениях, обусловленных способом решения, системы, оптимально выполняющей поставленную задачу при некоторых ограничениях на само решение /2/.

Проектирование сложной системы принято условно делить на четыре основных этапа:

- 1) формирование основной задачи проектирования;
- 2) синтез системы;
- 3) инженерный анализ;
- 4) принятие решения.

Идеология системного проектирования базируется на понятии системы. Основные тезисы здесь следующие.

- Любой сложный объект можно расчленить на более простые элементы.
- Если элементы оказываются связанными друг с другом

информационными потоками, то сложный объект представляет собой систему, а простые элементы - подсистемы.

- Каждая подсистема входит в систему, а каждая система представляет собой подсистему еще более сложной системы.

Построение системы означает:

- 1) определение элементов, из которых будет построена система;
- 2) нахождение структуры, объединяющей элементы в систему;
- 3) разработку алгоритма поведения системы при её рабочем функционировании.

Основная идея системного проектирования основывается на том, что не существует абсолютно оптимальных систем. Можно разрабатывать оптимальные системы лишь применительно к конкретным условиям. При этом, чем более полно учтены эти условия, тем больше вероятность построения действительно оптимальной системы. Поэтому системщики уделяют большое внимание фиксации условий функционирования разрабатываемой системы.

Другая мысль состоит в том, что оптимальная система отнюдь не означает набор "самых лучших" элементов, поскольку система есть не только элементы, но и структура, а также заданный способ поведения. При выборе элементов системы следует исходить из оптимизации основного критерия качества системы и руководствоваться "принципом равномерного огрубления" (стр. 60.).

Далее, в качестве иллюстрации, рассмотрим проектирование некоторой системы (НИС-Т) функционального нагрева дисков (непрозрачные, полупрозрачные, прозрачные; диаметр до 0,6 м, толщина до 2 см).

§ 4. Этап формирования задачи

На этом этапе, исходя из задания, определяется основная задача, которая должна быть решена. Далее эта задача разделяется на ряд подзадач, решение которых обеспечивает выполнение основной задачи /4/.

Операции первого этапа следующие: /5/

- 1) определение требований к назначению системы;
- 2) профилирование задания;
- 3) деление целостного задания на сегменты;
- 4) определение и описание функций системы;
- 5) установление критериев выполнения функций системой;
- 6) распределение функций между оператором и автоматами системы.

Фаза I. Определение требований к назначению системы

Смысл операции состоит в том, что общее требование заказчика детализируется на конкретные требования к элементам системы, чтобы последняя смогла выполнить свое задание. В последующем первоначальные требования могут изменяться по разным причинам, например, если они не могут быть осуществлены по техническим или другим соображениям.

Здесь обычно составляется таблица требований к системе, например, для НИС-Т:

Таблица I

Свойства, которыми должна обладать НИС	Влияющие факторы
1. Достижение T 1500°C	расходуемая мощность, нагревательные элементы, изоляция.
2. Быстродействие до 30 ⁰ сек.	инерция тепловой системы, принципы регулирования T .
3. Функциональный нагрев	принцип расчета T - воздействия, ЦВМ, принципы управления.

4.	Регистрация Т и Р до 1500 ⁰ С.	датчики, измерители, система сбора и накопления.
5.	Высокий темп эксперимента, многопараметрическая информация, универсальность режимов управления, простота управления, наглядность отображения информации.	уровень автоматизации, ЦВМ, каналы в ЦВМ, алгоритмы, устройства отображения.
	<u>ограничения:</u>	
1.	Надежность НИС-Т	непрерывная бесшумная работа НИС не менее 1 часа.
2.	Безопасность работы	абсолютная.
3.	Пиковое значение подводимой энергии	порядка 50 квт
4.	Стоимость	порядка 240 тыс. руб. (вместе с ЦВМ).
5.	Срок разработки и изготовления	декабрь 1971 г.

Предполагаемые функции НИС:

1. Испытания прочности объектов до 1500⁰С.
2. Исследование предельных режимов.
3. Исследование других физических свойств объектов.

Фаза 2. Отработка профиля назначения НИС

Профиль НИС - графическое изображение последовательности необходимых основных действий НИС в ходе выполнения работы.

Основным параметром профиля является время, к нему привязываются все остальные параметры (факторы среды, ограничения и условия, необходимые для действия НИС).

Ниже дается профиль работы НИС-Т (табл.2).

Таблица 2

ПРОФИЛЬ НИС - Т

Сегменты задания	Работа НИС	Действия оператора	Время
1	2	3	4
1. Подготовка НИС к эксперименту	1. Тесты ЦВМ 2. Тесты измерительных каналов НИС. 3. Контрольный эксперимент	1. Расчет режима управления. 2. Общая проверка НИС (подвод энергии, охлаждение,....). 3. Работа с ЦВМ 4. Работа с ЦВМ + НИС. 5. Закладка джока. 6. Ввод программы 7. Ввод исходных параметров 8. Включение системы нагрева 9. Работа с НИС.	не критично
2. Эксперимент (возможна аварийная ситуация, тогда перейти на аварийный режим)	1-й нагрев изделия. Сбор данных, регистрация, контроль аварийности. 1-е охлаждение " " 2-й нагрев " " 2-е охлаждение " " "Стоп"	1. Наблюдение за ходом эксперимента. 2. Контроль аварийности. 3. Запись комментария эксперимента. 4. При аварии уход на аварийную программу, либо отключение НИС.	критично
3. Окончание эксперимента	1. Вывод экспериментальных результатов на печать или графопостроитель.	1. Управление очередностью вывода результатов. 2. Задание параметров программы вывода. 3. Контроль вывода. 4. Комментарий к информации. 5. Запись всего паспорта эксперимента. 6. Выключение НИС.	

Фаза 3. Деление задания на сегменты

Деление на сегменты происходит параллельно с отработкой профиля НИС. Основная идея заключается в выделении однородных операций, имеющих различные начальные и конечные моменты исполнения.

Сегменты, будучи более конкретными и детальными элементами "поведения" НИС, упрощают анализ, позволяют перейти к распределению функций между узлами НИС, облегчают последующий процесс алгоритмизации эксперимента.

Фаза 4. Определение и описание функций НИС

На этой фазе определяется содержание и цели операций внутри каждого сегмента и критерии, которые укажут, что цель операции достигнута.

Результатом анализа является таблица временного отображения функционирования основных узлов НИС (независимо от их реализации).

Существуют различные методы составления таблицы. Ниже приводится таблица (таблица 3), составленная по методу "шаблона" /5/ для НИС-Т.

В таблице указана временная последовательность выполнения функций главными подсистемами НИС.

Фаза 5. Установление функциональных критериев деятельности

Эта фаза позволяет осуществить в дальнейшем распределение функций между оператором и НИС, а также позволяет предъявить требования к разрабатываемым в последующем элементам НИС.

Требования к выполнению функций НИС-Т приведены в таблице 4.

Нагреватель Ц	Регулятор давления	Измерители Р и Т	Ц В М	Ус-ва вывода	Оперитор	Критичные факторы
1	2	3	4	5	6	7
	откачка	измерение давления Р	1. Контролирует Р, если в норме, то идет на пункт 2, иначе сигнализирует оператору.		1. Наблюдает за индикатором критических Р и критических	
1-й нагрев	(выдача \mathcal{K} расчет)		2. Вычислит мощность (\mathcal{K}) на участке нагрева и задает нагревателю.		2. При аварийных ситуациях уходит на режим аварии.	
		измерение температуры Т	3. Определяет Т и сравнивает ее с заданной по таблице Т ₀ . Минимизирует $\varepsilon = (T - T_{01})$, если за $t < t_0$ это не удастся, то сообщает оператору.		3. В ситуациях близких к аварийной принимает решение (изменить параметры эксперимента, продолжить либо остановить эксперимент).	1. Давление в норме.
			4. Определяет t , если $t < t_0$, то идет дальше, иначе уходит на пункт 6.	Во всех стадиях осцилло-скоп показывает Р (t), Т (t), ε (t)		2. Отклонения ε в норме
	откачка	измерение Р	5. Цикл на 1 пункт. Во время цикла: накопление Р (t), Т (t), ε (t).		4. Наблюдает за осциллограммами Р (t), Т (t), ε (t)	
1-го охлаждения		измер. Т	6. как пункты 1, 2, 3, 4, 5, но вместо t_{01} будет t_{02} , участок таблицы Т ₀₂ - режим охлаждения, вместо ухода на пункт 6 - уход на пункт 11.		5. Комментирует фазы эксперимента в журнале.	
	откачка	измер. Р	7. как пункты 1, 2, 3, 4, 5, но вместо t_{01} будет t_{03} , участок таблицы Т ₀₃ - режим 2-го нагрева, вместо ухода на пункт 16.			
2-й нагрев		измер. Т	8. как пункты 1, 2, 3, 4, 5, но в пункте 16 - приняв впуск газа и вместо t_{01} будет t_{04} , участок таблицы Т ₀₄ - режим 2-го охлаждения, вместо ухода на пункт 6 - уход на пункт 21.			
2-го охлаждения	впуск газа	измер. Р	9. "Останов" ЦВМ			
		измер. Т				
охлаждение до комнатной Т						

Примечания к таблице 3.

1. ЦВМ ведет непрерывный контроль за правильностью работы аппаратуры (проверяет наличие срабатываний, факт исполнения команд, переполнение шкал и т.п.) при неполадках сообщает оператору специальным сигналом.

Таблица 4

Требуемый выход		Требуемый вход		
Экспериментальная величина		Допуск	Порог чувствительности	Максимальное время запазд.сек.
	1	2	3	4
<u>А.</u>	Управление температурой			
1.	Скорость нагрева $\leq 20^{\circ}/\text{сек}$	$\pm 5^{\circ}/\text{сек}$	5% от значения температуры	1,0 сек.
2.	Максимальная температура нагрева поверхности диска 1500°C	$\pm 75,0^{\circ}$	"-	неопредел.
3.	Отклонение эксперимент. кривой T от расчетной $T_0 \pm 30^{\circ}$.	в пределах точности измер.	"-	"-
<u>Б.</u>	Регистрация давления.			
1.	Скорость изменения $\leq 0,05 \text{ ат}/\text{сек}$	$\pm 0,05 \text{ ат}/\text{сек}$	5% от значения	1,0 сек.
2.	Максимальное давление 5 ат.	$\pm 0,05 \text{ ат}$	"-	"-
3.	Минимальное давление 0,1 ат	$\pm 0,05 \text{ ат}$	"-	"-
<u>В.</u>	Регистрация температуры		5% от значения температуры	0,5 сек.

Фаза 6. Распределение функций между человеком и машиной

При распределении функций между элементами НИС, естественно исходить из тезиса: НИС — для исследователя. Это значит, что НИС не только должна выполнять функции воздействия на объект исследования, измерения, контроля, накопления и обработки, но и функции общения с исследователем.

Однако далеко не все функции следует стараться возложить на ЦВМ. "Человека и машину можно сравнивать друг с другом для выяснения трех вопросов: в чем они схожи, в чем они различаются; и как, зная сходство и различие, найти такой способ одновременного использования людей и машины, который бы позволял получить наилучшие результаты". /8/.

В конечном итоге распределение функций между человеком и машиной зависит от соотношения:

- 1) Степени удобства взаимодействия НИС для исследователя (язык управления НИС, наглядность индикации, оперативность изменений).
- 2) Эксплуатационных качеств работы системы (точность, надежность, производительность, воспроизводимость, объективность,).
- 3) Графика работ (своевременность выполнения функций).
- 4) Стоимости выполнения функции (денежная, потери времени, количество персонала, требуемая квалификация персонала).

С этих точек зрения для НИС-Т, по-видимому, рационально следующее распределение функций.

Оператор:

- проверка состояния НИС;
- принятие решений в аварийных и предаварийных ситуациях;

- паспортизация эксперимента;
- выбор режима эксперимента;
- сортировка и анализ результатов эксперимента;
- оценка качества эксперимента.

Ц В М:

- тесты каналов НИС;
- сбор информации, управление аппаратурой и контроль за аппаратурой во время операций;
- сообщение оператору о наличии аварийных и предаварийных ситуаций;
- выдача оперативной информации;
- расчет режимов управления;
- первичная обработка (фильтрация, приведение к наглядной системе координат);
- накопление данных (в виде перфолент, таблиц, графиков).

Однако вопрос о распределении функций периодически может пересматриваться в ходе проектирования.

Распределение функций не является последней фазой этапа формирования задачи.

Обычно на этом же этапе проводится предварительное планирование НИР и ОКР, распределение обязанностей между разработчиками и другие операции организации процесса проектирования систем.

На этом же этапе проводится подробное описание сущности задачи (как об этом говорилось выше) и рассматриваются некоторые пути решения задачи.

§ 5. Этап синтеза

На этапе синтеза разрабатываются основные альтернативы решения задачи.

При разработке альтернатив исходят из основного принципа системности. Этот принцип заключается в том, что любую систему можно расчленить на более простые подсистемы, а последние - на еще более простые элементы

/I-6/, что позволяет свести задачу синтеза сложной системы к подзадачам синтеза ее элементов.

Таким образом задача синтеза НИС-Т заключается в решении следующих подзадач и подсистем:

1. Подзадача управления температурой диска, она сводится в свою очередь к подзадачам:

- выбор принципа управления T,
- построение подсистемы управления T,.

2. Подзадача измерения температуры:

- выбор принципа измерения T,
- построение подсистемы измерения T.

3. Подзадача измерения давления P:

- выбор принципа измерения P,
- построение подсистемы измерения P.

4. Подзадача сбора и накопления информации.

5. Подзадача аварийного контроля и блокировок.

6. Подзадача контроля и управления аппаратурой.

7. Подзадача выдачи информации оператору.

8. Подзадача определения общей структуры НИС.

Решение этих подзадач обычно проводится в два приема:

1. Сбор исходной информации по альтернативам.

2. Генерация новых альтернатив.

При сборе исходной информации пользуются литературными обзорами, консультациями специалистов, патентной литературой и т.п. Особенно эффективным может оказаться использование энциклопедической и справочной литературы (физическая энциклопедия, техническая энциклопедия и др.) в которой, кроме краткого и доступного обзора, обычно дается список соответствующей литературы.

При генерации новых альтернатив пользуются различными эвристиками поиска новых решений /2,4/.

1. Метод "мозгового штурма". Использование этого метода связано с выполнением следующих восьми правил:

- рабочая группа должна состоять из различных специалистов хорошо представляющих данную задачу, но они могут и не иметь специализацию по задаче,
- специалисты не должны быть слишком глубоко связаны друг с другом,
- исключается любое административное, либо авторитарное давление внутри группы,
- исключается любая критика, либо суждения на момент генерации идей - наиболее важное правило,
- обязательно генерирование непрерывного потока идей,
- необходимо свободно высказывать свои мысли, поскольку при последующем после "мозгового штурма" разборе идей самые "нелепые" в период генерации идеи могут оказаться решением задачи, либо способствовать его нахождению,
- рассматриваемая задача не должна быть слишком конкретна,
- во время генерации идеи должны фиксироваться (стенорама, фонограмма и т.п.).

После проведения "мозгового штурма" следует критически проанализировать идеи, отобрать из них часть для оставления списка альтернатив.

2. Метод инверсии. Предполагает инверсию имеющихся способов решения задачи, например, если известный способ предполагал нагреватель снизу образца, то следует рассмотреть противоположную позицию; если нагреватель представлял излучатель, то следует рассмотреть "не-излучательные" нагреватели - контактные, буферные, конвективные и т.п.; если температура измерялась термопа-

рами, то рассматриваются "нетермопарные" варианты - (пирометры, изменения свойств объекта и т.п.).

3. Метод аналогии. Предполагает рассмотрение аналогичных ситуаций, Например, задача нагрева образца сравнивается с задачей плавки металла, либо с задачей построения вакуумного диода и т.п.

4. Метод эмпатии. Означает вхождение одной личности в роль другой. Этот принцип при должной тренировке может быть распространен и на технические объекты. Метод эмпатии позволяет более детально учитывать процессы, происходящие с объектом поскольку разработчик "переносит" себя в непосредственную близость с объектом, либо даже отождествляет себя с ним.

"Отождествите себя с ядром ореха, находящегося под скорлупой. Чтобы выйти наружу, нужно, чтобы вам помогли продать скорлупу. От уяснения этой задачи до схемы подачи воздуха под давлением остается один небольшой шаг" /2/.

5. Систематическое исследование новых комбинаций

Метод представляет собой нахождение нового решения "путем создания новых комбинаций вещей, процессов или идей" /2/.

Например, таблица вариантов нагрева образца может иметь следующий вид

Таблица 5

Источник	Передача энергии				
	газ	расплав	непосред- ств. кон- такт	через пленку (слой)	излу- чение
1. Газовое пламя	x	x	x	x	x
2. Нагретое тело	x	x	x	x	x
3. Дуга	x	x	x	x	x
4. Расплав	x	x	x	x	x
5. Плазма	x	x	x	x	x
6. e ⁻ луч		x	x	x	

6. Кроме вышеперечисленных методов, существует ряд других: метод идеализации, метод Дельфи, сенектика и др. на которых останавливаться не будем.

Отметим лишь основную опасность, подстерегающую разработчика на этапе проектирования.

Психологическая инерция

Явление заключается в бессознательном влечении в какому-либо одному (вообще, к ограниченному набору) "излюбленному" методу решения задач или к одной альтернативе. Ясен тот вред, который может нанести отказ от рассмотрения многих вариантов. Конечно "излюбленный" вариант может действительно оказаться лучшим в создавшейся ситуации, но к этому надо прийти, проанализировав рядное количество других вариантов.

Часто психологической инерции может способствовать навязывание решений заказчиком. В этом случае следует разъяснить заказчику, что он тем самым отказывается от, возможно, более оптимальных решений. Кроме того, поскольку процесс выработки альтернатив представляет собой наиболее интересный момент проектирования, навязывание решения заказчиком лишает разработчика творческой инициативы при создании системы.

Психологическая инерция преодолевается осознанием ее, специальной тренировкой, изучением разнообразных методик исследований.

Принцип равномерного огрубления

Он состоит в том, что при проектировании элементов системы исходят из согласования ограничений на различные свойства элементов друг с другом. Например, если известно, что класс точности одного элемента низок, то не будет иметь смысла стремиться необоснованно ставить

за ним элемент значительно более высокого класса. Каждому элементу должен быть сопоставлен "достойный" его элемент (по параметрам, сложности, возможностям).

Этот принцип² нарушается особенно часто. В результате - с одной стороны появляются системы, в которых комбинируются, например, нестабильные, медленно-действующие коммутаторы и цифровые приборы высокого класса, а с другой стороны - возникает неоправданно большие затраты на проектирование отдельных элементов с явно завышенными техническими требованиями.

Принцип соответствия мощности

Этот принцип заключается в требовании соответствия "мощности" (возможностей), разрабатываемой НИС, "мощности" класса предполагаемых объектов исследования. Проектирование системы неоправданно большой "мощности" заранее определит низкую эффективность ее работы, а проектирование НИС с заниженной мощностью в лучшем случае³ означает быстрое моральное старение НИС. Однако следует заметить, что поскольку любому исследованию сопутствует неопределенность в методе и средствах, то мощность НИС должна быть несколько выше, чем требуется вначале; этот избыток может быть тем больше, чем выше степень неопределенности, чтобы обеспечить в последующем совершенствование методики и средств исследований.

"Метод единичной нити" /I/

Итак, на втором этапе, по существу, имеется набор решений для построения будущей системы, ее основные элементы; естественно, что часть этих элементов впоследствии может оказаться несовместимой.

Однако, как правило, такой набор позволяет получить несколько вариантов проектируемой системы, каждый из которых удовлетворяет требованиям проектного задания. Построение варианта системы на основе совокупности элементов

получил название "метода единичной нити". Этот метод заключается в определении способа действия НИС на каждый из разнотипных входов системы.

"Метод единичной нити" предполагает:

- 1) Нахождение функциональной блок-схемы НИС, т.е. алгоритма, реализуемого системой в ходе отработки реакций на каждый вход. По-существу, это блок-схема, объединяющая обобщенное описание функций ЦВМ, локальных автоматов оператора, а также взаимодействий между ними в процессе проведения исследований объекта. Исходным пунктом может явиться "шаблон" НИС.
- 2) Определение блок-схемы оборудования. Эта блок-схема получается в результате реализации функциональной блок-схемы НИС с помощью известных ранее элементов НИС или элементов, полученных в процессе генерации идей.
Не исключена коррекция функциональной блок-схемы в соответствии с возможностями элементов.
На блок-схеме оборудования указываются обобщенные потоки информации через различные элементы НИС.
- 3) Разработка блок-схемы компонентов. Здесь каждый элемент оборудования представляется необходимыми компонентами. На схеме этого типа приводятся наименования устройств и поток информации между внутренними элементами системы.

§ 6. ЭТАП III. Анализ альтернатив[†])

Третий этап заключается в тщательном анализе вариантов решения задачи.

При анализе рассматривают каждую альтернативу с точ-

[†]) Иллюстрация анализа альтернатив для НИС-Т дана в следующей статье (стр. 85).

ки зрения возможности работы системы в реальных условиях с учетом накладываемых ограничений на характеристики системы (прочность, надежность, безопасность, совместимость элементов, ограниченные ресурсы и т.п.), а также на методику проведения эксперимента с помощью системы (точность, инерционность, воспроизводимость, доступность измерительной информации, полнота измерительной информации, универсальность режимов регулирования, наглядность результатов, оперативность ведения эксперимента и т.п.).

На этом этапе обычно выполняются следующие процедуры /2/.

1. Определение задачи анализа. Здесь необходимо сформулировать основной вопрос, допускающий получение вполне определенного конкретного количественного решения.

2. Построение модели. Модель служит для определения рабочих характеристик каждого варианта решения задачи и для выяснения затрат на реализацию варианта. Модель должна учитывать наиболее существенные стороны реальной ситуации. "Создатель модели старается воспроизвести в миниатюрной, контролируемой форме действие изучаемой системы в реальном мире" /8/ Она может быть как аналитической, на основе применения физических принципов, так и экспериментальной. При построении модели особенно важно пользоваться "принципом равномерного огрубления".

3. Применение физических принципов и накопление данных. Модель обычно стараются выразить на языке математических уравнений, описывающих наиболее общие физические принципы, в крайнем случае это могут быть специальные уравнения, если есть уверенность в применимости всех ограничений специальных методов для моделируемой задачи.

Накопление данных предполагает использование экспериментальной модели и должно проводиться с учетом статис-

тического характера измеряемых величин и методов планирования эксперимента.

4. Проверки. Необходимы для избежания ошибок на этапах проектирования систем. Различают два вида проверок /2/: математические и проверки соответствия физическому смыслу.

Математические проверки предполагают:

1. Проверки верности записи формул и исходных данных;
2. Проверки результатов вычисления;
3. Проверки аналитических результатов.

Проверки физического смысла результатов:

1. Проверка размерности уравнения;
2. Проверка пределов, т.е. удовлетворяет ли решение предельным случаям внешних параметров;
3. Проверка тренда, т.е. удовлетворяет ли решение с точки зрения медленного роста (спада) внешних параметров;
4. Проверка знаков, т.е. удовлетворяет ли знак изменения результата при различных направлениях изменения внешних параметров;
5. Проверка полноты результата, т.е. учтены ли в результате все существенные факторы.

5. Оценка и обобщение. На этом этапе определяется степень соответствия результата изучения модели реальной задаче. Наиболее достоверный ответ в этом случае может дать постановка моделирующих экспериментов, преследующих цель получения информации о наиболее неопределенных и неочевидных режимах работы будущей системы.

Здесь же, экспериментально, либо с иных теоретических позиций, чем принятая при моделировании, оцениваются принятые допущения при построении модели и их влияние на результат моделирования.

На этапе оценки проверяется соответствие результата моделирования исходной неопределенной задаче, которая

при построении модели была заменена точным вопросом (серией вопросов), сделавшим возможным построение модели.

На данном этапе приходится пользоваться специальной методикой принятия решения.

Процедура обобщения особенно важна, если предполагается дальнейшее развитие, проектируемой системы и применяемой методики экспериментирования с помощью этой системы. Часто эта сторона дальнейшего существования системы является не менее важной, чем ее назначение для целей непосредственно указанных в Проектном задании. Иногда может оказаться, что достаточно наделить систему некоторыми дополнительными по отношению к заданию свойствами, чтобы существенно отдалить срок морального старения системы.

Какими именно свойствами нужно снабдить систему и какие ограничения необходимо ослабить, решается на этапе обобщения.

6. Оптимизация. Эта процедура может выполняться непосредственно на этапе обобщения, однако оптимизация в той или иной форме обычно сопутствует всем этапам проектирования систем.

Оптимизация может идти в форме итеративного процесса, при котором одна и та же задача решается многократно с целью получения наиболее оптимального решения.

Оптимизация может быть и локальной, когда, используя традиционный математический аппарат, находят оптимальные характеристики элементов систем, оптимальные параметры режима экспериментирования, минимальные затраты на построение системы и т.п.

7. Предоставление и выдача результатов. На этом этапе оформляются основные результаты синтеза и анализа, систем, т.е. весь обратительский, теоретический и экспериментальный материал.

Как правило, составляются два отчета: краткий - с изложением наиболее существенных результатов работы и детальный - с подробным обоснованием способов получения и обработки всей информации заключенной в результатах работы.

§ 7. Этап IV. Принятие решений

Принятие решений /2, 3, 7/ означает сравнение и выбор такого варианта решения задачи, который обеспечивает наиболее оптимальное достижение поставленной цели при учете всех существенных факторов.

Цель. Проектирование системы (как и всякое проектирование) бессмысленно, если нет цели, которую нужно достичь в результате проектирования. Однако зачастую цели приходится формулировать самим проектировщикам, поскольку непосредственный опрос заказчиков редко выявляет все истинные цели. В таком случае /7/ проектировщик должен, исходя из целей, сообщенных заказчиком, разработать один из вариантов решения задачи и представить заказчику список возможных результатов. Обсуждение этого списка совместно с заказчиком поможет выявить истинные цели задачи. Список целей может включать не только цели, которые требуется достичь, но и ранее достигнутые цели, которые нужно сохранить.

Альтернативы. Альтернативами называются различные варианты достижения поставленной цели. Практически любая задача решается многими способами, разница только в качестве решения и объеме затраченных ресурсов. Поэтому оптимальное или близкое к нему решение всегда связано с анализом многих принципиально различных альтернатив.

Чем более полон список альтернатив, тем может быть больше уверенности в успешном решении задачи. При составлении списка альтернатив пользуются обзорами, отдельными

литературными источниками, специальными каталогами, личным опытом и т.п. К этому списку обычно добавляются альтернативы, полученные эвристическими методами генерации идей /2/.

Факторы /2/+)

В число факторов, с которыми приходится считаться при проектировании систем, входят следующие:

- научная необходимость построения НИС,
- техническая целесообразность,
- экономическая эффективность,
- необходимые ресурсы,
- человеческие факторы.

Факторы, обусловленные ресурсами, предполагают:

- наличие финансов для разработки и последующей эксплуатации НИС,
- наличие кадров для НИР, ОКР и производства,
- наличие материалов и оборудования,
- наличие помещений,
- наличие необходимого времени для разработки.

Чтобы список факторов не был слишком большим, обычно определяются основные, наиболее существенные факторы.

Критерий /3/

Принятие оптимального решения в значительной степени зависит от выбора критерия, по которому производится выбор альтернативы. Критерий обязательно должен учитывать как общие затраты, так и результаты в достижении цели /3/.

Есть два типа критериев:

- можно зафиксировать цель и искать самый дешевый путь достижения этой цели,
- можно зафиксировать затраты и искать способ достижения максимума поставленной цели.

+) Список факторов для анализа НИС-Т приведен в следующей статье (стр. 85).

Мера эффективности /7/

Возможность проведения выбора альтернативы определяется способностью оценить затраты и результаты достижения целей.

Если цели носят количественный характер, то обычно производят операцию "взвешивания" целей, т.е. их приведение к одному эталону измерения (например, стоимость, надежность, воспроизводимость операций и т.д.).

Правила принятия решения

Процедура принятия решения, помимо формулирования цели, изыскания альтернатив, определения факторов и выбора критерия, должна иметь определенные правила и рациональный порядок принятия решения.

В большинстве случаев используется следующий эвристический метод /2, 7/:

1. Составляется список целей,
2. Составляется список альтернатив,
3. Составляется список факторов,
4. Определяется критерий эффективности,
5. Минимизируется список целей. Для этого ищутся и устраняются те цели, которые являются подцелью по отношению к другим.

Устраняются также те цели, которые не могут быть достигнуты с помощью альтернатив.

6. Минимизируется список альтернатив:
 - устраняются альтернативы, нарушающие поставленные ограничения,
 - устраняются альтернативы, которые нельзя реализовать из-за ограниченных ресурсов,
 - устраняются явно недостижимые альтернативы.

При этом обязательно нужно фиксировать причины устранения альтернатив.

7. Упорядочение оставшихся альтернатив. При этом список альтернатив подвергается классификации по некоторым общим признакам. Результатом классификации является граф альтернатив, отдельные ветви которого представляют детализацию различных альтернативных путей. Граф альтернатив делает обозримой всю совокупность вариантов решения, позволяет проводить оперативный анализ совокупности, ее расширение и изменения отдельных компонент. ^{+))}

При составлении графа альтернатив следует иметь в виду, что на нулевом уровне всегда имеется 3 альтернативы:

A_0 - отказаться от разработок,

A_1 - отложить разработки,

A_2 - начать разработки.

0 - уровень

I - уровень

2 - уровень

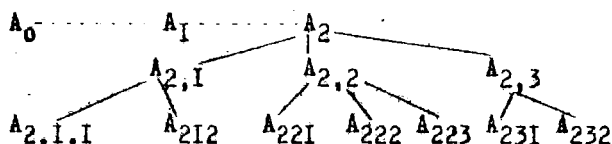


Рис. I

8. Минимизируется список факторов. Это достигается, во-первых, устранением несущественных факторов. Однако часто относительно большинства факторов, до выполнения последующих процедур, установить степень существенности бывает очень сложно, поэтому на данной этапе минимизация должна быть исключительно осторожной.

Если предполагается чисто количественный анализ альтернатив, то устраняются и те факторы, которые либо вообще не поддаются количественной оценке, либо такая оценка требует значительных затрат.

^{+))} на стр. 91 приведен граф альтернатив для проблемы нагрева дисков.

Устраняются также и те факторы, которые в равной степени относятся ко всем альтернативам, поскольку они не позволяют провести необходимую минимизацию альтернатив.

В любом случае причины устранения факторов обязательно фиксируются.

9. Составляется граф факторов. Сложность графа, т.е. количество уровней факторов, зависит от степени детализации задачи. Чем глубже мы хотим проследить влияние фактора на альтернативу, тем разветвленной и длиннее окажется граф (рис.2).

Такая систематизация, как и для случая альтернатив, делает обозримой всю совокупность факторов и, главное, позволяет быстро и качественно производить оценку альтернатив не "зарываясь" в мелочные оценки. Это становится возможным, если оценки производить каждый раз с наиболее общего уровня графа и по необходимости переходить на более детализованные уровни.

Конечно, процедура упорядочивания делает возможным последующее расширение, либо сужение списка факторов.

На этапе систематизации факторов выясняются также взаимосвязи факторов.

Обычно ослабление либо усиление одного из факторов влечет за собой изменения в других факторах (усиливает, ослабляет, отбрасывает, добавляет новые факторы). Выяснение взаимозависимости факторов - важный момент для проектирования систем.

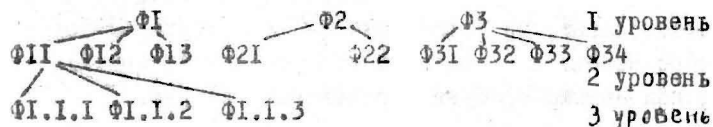


Рис.2.

10. Минимизация альтернатив на основе факторов. Эта процедура связана с оценкой каждой альтернативы (в порядке убывания общности) на основе факторов (также в порядке убывания общности).

Здесь особо важным обстоятельством является возможность количественной оценки альтернативы с точки зрения удовлетворения совокупности факторов, в этом случае для минимизации может быть использована процедура 13.

11. Минимизация факторов на основе альтернатив. Часть факторов после выполнения пункта 10 отпадает, если соответствующие им альтернативы вычеркнуты из списка.

Среди оставшихся факторов могут быть такие, которые в равной степени относятся ко всем оставшимся альтернативам. Их тоже следует вычеркнуть.

12. Теперь возможно 6 вариантов:

а) Альтернатив больше не осталось, тогда следует обратиться к методам генерации идей с целью разработки новых альтернатив и перейти к пункту 2. Если попытка генерации не увенчалась успехом, следует пересмотреть причины заставившие вычеркнуть все альтернативы и, вернувшись к пункту 6, ослабить некоторые требования.

б) Исключены все факторы, в этом случае нужно изучить причины исключения и, вернувшись к п.8, ослабить некоторые, либо можно воспользоваться случайным выбором оставшихся альтернатив.

в) Остался один фактор. Следует, воспользовавшись методами принятия решений (пункт 13) либо оптимизации, произвести выбор оптимальной альтернативы.

г) Осталась одна альтернатива. Если это удовлетворяет, то можно её принять, если нет, то следует

пересмотреть причины исключения альтернатив и вернуться к пункту 6, либо попытаться предложить новые альтернативы и перейти к пункту 2.

- д) Если возникла сложная ситуация и объективный выбор все еще невозможен, следует пересмотреть причины исключения альтернатив и факторов и повторить все процедуры сначала.

13. Этот пункт относится к численной методике принятия решений. Прежде всего следует иметь количественные оценки альтернатив по факторам.

Если такие оценки существуют, то можно использовать различные формальные методы подсчета эффективности альтернатив [2,7].

Обычно составляется матрица потерь (или выигрыша)

Таблица 6

Факторы веса факт.	Φ_1	Φ_2	Φ_3
	ψ_1	ψ_2	ψ_3
альтернат.				
A_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}
A_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}
A_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}
...

здесь: P_{ij} - потери (выигрыши) для A_j -альтернативы, Φ_i - фактора.

Затем определяется математическое ожидание потерь (выигрыша) для каждой альтернативы:

$$P_j = \sum_i \varphi_i P_{ij}$$

и, исходя из принятого критерия, выбирается альтернатива, обеспечивающая \min потери (\max выигрыш).

В следующей статье (стр. 84) приведен результат минимизации альтернатив для НИС-Т и их оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуд Г.Х., Макол Р.Э., Системотехника, "Сов.Радио", М., 1962.
2. Дикрон Д., Проектирование систем, "Мир", М., 1962.
3. Квейд Э., Анализ сложных систем, "Сов.радио", М., 1969.
4. Уилсон А., Уилсон М., Информация, вычислительные машины и проектирование систем, "Мир", М., 1968.
5. Мейстер Д., Рабидо Д., Инженерно-психологическая оценка при разработке систем управления, "Сов. радио", М., 1970.
6. Кибернетизация научного эксперимента. Изд. ДГУ им. П.Стучки, Рига, 1968 г.
7. Черчмен У., Акоф Р., Арифф Л., Введение в исследование операций, "Наука", М., 1968.
8. Олтвер С.Л., Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем, "Сов.радио", М., 1969.

Я.Страумен

СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА НАГРЕВА ДЛЯ НИС-Т

§ I. Задача

Требуется построить систему для моделирования условий нагрева, заданных рис. I.

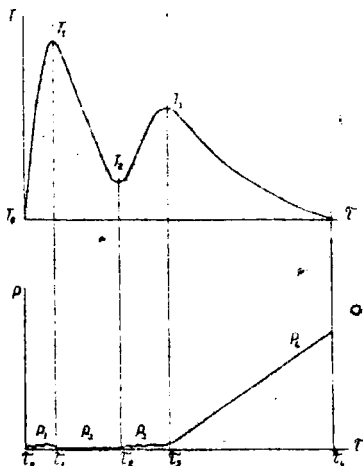


Рис. I.

Указанные режимы должны реализоваться на лицевой поверхности исследуемых образцов, которые представляют собой диски диаметром до 60 см и толщиной до 2 см.

Участок I:

Происходит возрастание температуры на лицевой поверхности диска со скоростью (ν_I) не более 30°/сек. от 350°K до 1800°K, следовательно, наименьшее время прохождения участка I будет

$$\delta = \frac{T_1 - T_0}{\nu_I} \sim \frac{1800^\circ - 300^\circ}{30 \text{ }^\circ/\text{s}} = 50 \text{ s}$$

Давление на лицевой поверхности должно быть близко к нулю.

Участок 2:

Происходит снижение температуры за время τ_2 на лицевой поверхности диска от T_1 до T_2 за счет излучения в пространство абсолютно черного тела с температурой 77°K и за счет теплоотвода в глубину диска.

Давление на лицевой поверхности близко к нулю. Время τ_2 нам неизвестно и, следовательно, неизвестна конечная температура T_2 .

Участок 3:

Происходит повторное увеличение температуры от T_2 до T_3 со скоростью не более $30^\circ/\text{сек}$ и T_3 не достигает значений T_1 . Процессы теплообмена на участке "3" аналогичны участку "1". Время прохождения участка неизвестно.

Участок 4:

Температура лицевой поверхности диска уменьшается от T_3 до T_0 из-за конвективного теплообмена между поверхностью диска и воздухом, имеющим температуру T_0 , а также излучением в пространство абсолютно черного тела (77°K) и разравниванием температуры в диске. Время τ_4 можно подсчитать.

§ 2. УСЛОВИЯ, МОДЕЛИРУЕМЫЕ НА СТЕНДЕ НИС-Т

Ниже будут изложены наиболее жесткие режимы, которые предполагается моделировать на стенде НИС-Т.

Участок I (рис. I)

Линейный нагрев лицевой поверхности диска от 300°K до 1800°K за время 50 сек.

Величина давления (0,100 мм рт.ст.) компенсируется давлением на заднюю поверхность диска.

Участок 2:

Охлаждение от T_1 до T_2 можно вести без регулирования, до любого значения $T_2 \geq 77^\circ\text{K}$, если степень черноты лицевой стороны на этом участке соответствует (не ниже) степени черноты изделия в эксплуатационных условиях, а также, если теплообмен происходит в вакууме между диском и абсолютно черным телом 77°K . Однако реализация подобного режима потребует большого расхода хладагента.

Если охлаждать диск за счет излучения на тело с другими тепловыми параметрами (степень черноты $\epsilon = 0,9$, температура 300°K , с большой лицевой поверхностью F_0 диска), то T_2 может быть определено, исходя из следующих оценок.

Известно [4], что приведенная степень черноты

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_0} - 1} \quad \text{при } F = F_0 \quad (1)$$

или

$$\epsilon_{np} \approx \epsilon_2 \quad \text{при } F \ll F_0 \quad (2)$$

где: ϵ_2 - степень черноты изделия на участке 2р
 ϵ_0 - степень черноты поглощающего тела,
 F, F_0 - поверхности изделия и поглощающего тела, соответственно.

Если $\epsilon_0 \sim 0,9$, то $\epsilon_{np} \sim \epsilon_2$ по (1).

Теплоотвод на участке "2" должен быть:

$$Q_{\text{экспл}} = \epsilon_2 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{77}{100} \right)^4 \right] F \quad (3)$$

Так как по заданию температура диска может отклоняться от расчетного не более чем на $\pm 30^{\circ}\text{K}$, то охлаждающий поток при температуре диска $(T + 30^{\circ}\text{K})$ и $T_0 = 300^{\circ}\text{K}$ будет

$$Q_{\text{стенд}} = \epsilon_2 C \left[\left(\frac{T+30}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (4)$$

Поскольку должно выполняться'

$$Q_{\text{стенд}} \geq Q_{\text{экол}} \quad (5)$$

то, подставляя (3) и (4) в (5):

$$\left(\frac{T+30}{100} \right)^4 - 81 \geq \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

$$\left(\frac{T+30}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \geq 81 \quad (7)$$

Решая (7), получим, что $T \geq 400^{\circ}\text{K}$, а истинная температура $T_2 \geq 430^{\circ}\text{K}$. Если T_2 должно быть еще ниже, то потребуется дополнительное охлаждение.

Величина давления P_2 на лицевой поверхности диска должна быть ниже 1 мм рт.ст., в общем P_2 будет зависеть от компенсирующего (с обратной поверхности диска) давления P_2 и от учета влияния на изменение скорости охлаждения.

Участок 3:

Здесь должны быть обеспечены, по крайней мере, условия "1" участка, но $T_3 < T_1$, а $760 \geq P_3 > 1$ (мм рт. ст.)

Участок 4:

Уменьшение T_3 до T_0 путем излучения (как на участке "2") и за счет конвекции газа температуры T_0 . Требуется регулирование T .

Давление P_4 близко к 760 мм рт.ст.

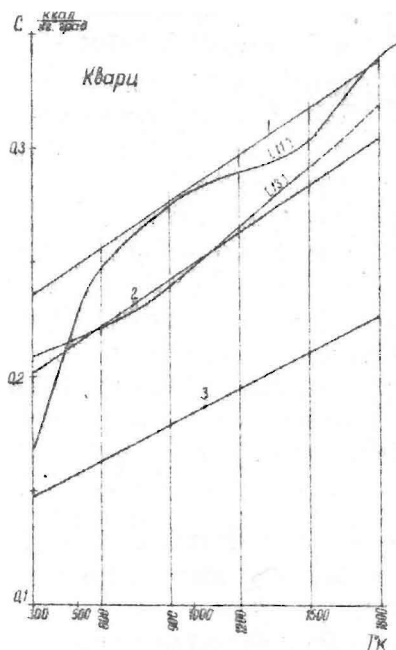


Рис. 2 /II, I3/

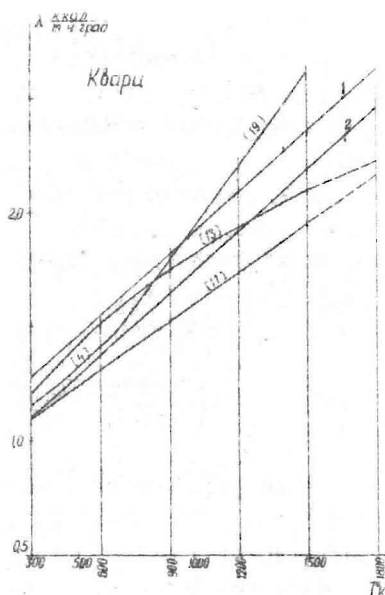


Рис. 3 /4, II, I3, I9/

§ 3. ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА НАГРЕВА ДИСКА

Задача

В качестве примера рассмотрим кварцевую пластину, толщиной $h = 20$ мм, температура лицевой поверхности растет линейно ($300 + 1800^\circ\text{K}$) ($v = 1.08 : 10^5$ град/час), вторая поверхность теплоизолирована.

Требуется определить распределение температур и теплоемкость по толщине во времени, а также мощность нагрева

Оценка

Для расчета приняты значения табл. I.

Расчет ведется по /18/. Температура любой точки по толщине определяется формулами:

$$T = T_0 + \theta \frac{\delta^2 x^2}{a} \quad (8)$$

где:

$$\theta = F_0 - \eta + 0.5\eta^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos[\mu_n(1-\eta)] \times e^{-\frac{\mu_n^2}{F_0}} \quad (9)$$

$$\mu_n = 0.5(2n-1)\pi \quad (10)$$

$$A_n = 2(-1)^{n+1} \mu_n^{-1} \quad (11)$$

$$F_0 = \alpha \tau h^{-2} \quad (12)$$

$$\eta = x h^{-1} \quad (13)$$

$$\beta = (T - T_0) \tau^{-1} \quad (14)$$

$$a = \lambda (c \rho)^{-1} \quad (15)$$

X - расстояние определяемой точки от передней поверхности.

Расчетные данные приведены в виде кривых на рис.4, где каждая кривая соответствует распределению T по толщине пластинки при определенном τ , которому соответствует заданная $T_{x=0}$ (см.табл. I).

Таблица I

τ [сек]	$T_{x=0} = T_0 + \beta \tau$	c [$\frac{\text{гм} \cdot \text{гас}}{\text{кг} \cdot \text{г} \cdot \text{г} \cdot \text{г}}$]	λ [$\frac{\text{гм}}{\text{м} \cdot \text{г} \cdot \text{г}}$]	ρ [$\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$]	$a = \frac{\lambda}{c \rho}$ [$\frac{\text{м}^2}{\text{гас}}$]
0	300°K	0,273	1,48	2210	$2,44 \cdot 10^{-8}$
10	600	0,295	1,80	"	2,76 "
20	900	0,318	2,12	"	3,00 "
30	1200	0,345	2,44	"	3,20 "
40	1500	0,367	2,74	"	3,40 "
50	1800	0,394	3,06	"	3,55 "

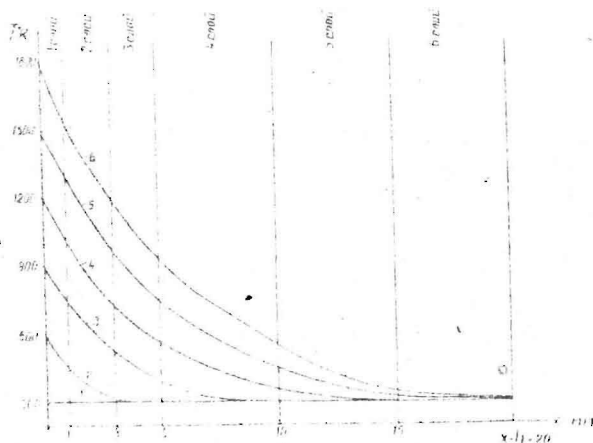


Рис. 4.

При расчетах, в пластине выделяются слои (рис.4) толщиной 1, 2, 2, 5, 5, 5 мм, имеющие вес G (кг/м²). Для каждого слоя при определенном τ определяется T_{cp} по рис.4, по рис.2 находится соответствующее "С"; теплоемкость вычисляется по

$$Q = c \cdot G \cdot T_{cp} \quad (16)$$

Суммируя теплоемкости по слоям, получим суммарные теплоемкости для всей толщины пластинки при данном τ . Результаты приведены в табл. 2.

Среднюю мощность нагрева, необходимую для увеличения теплоемкости пластинки, можно получить из табл.2.

Результаты соответствующих вычислений приведены в таблице 3 и на рис. 5.

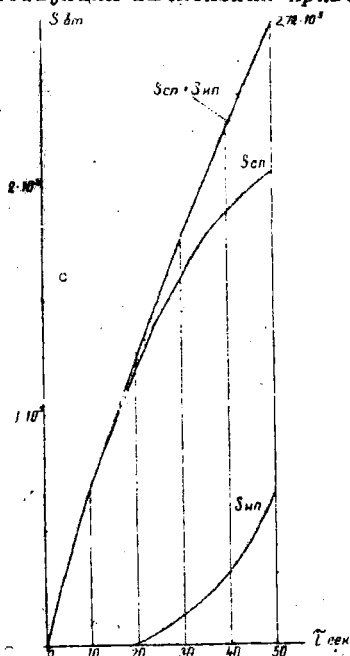


Рис. 5.

Для расчета потерь на излучение принимаем, что соотношения поверхностей и степеней черноты

$$\frac{L_1}{L_2} \sim 1.5, \quad \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sim 0.1$$

где: $L_1 = 0,28 \text{ м}^2$ - проходное сечение диска,
 L_2 - внутренней поверхности обоймы,
 ϵ_1 - степень черноты отражателя,
 ϵ_2 - степень черноты внутр.поверхн.обоймы

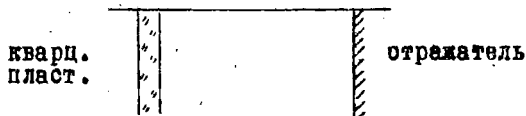


Таблица 2

С Л О И	G $\frac{кг}{м^2}$	$\tau_0 = 0$			$\tau_1 = 10$			$\tau_2 = 20$			$\tau_3 = 30$			$\tau_4 = 40$			$\tau_5 = 50$		
		T_{cp}	C	Q	T_{cp}	C	Q	T_{cp}	C	Q	T_{cp}	C	Q	T_{cp}	C	Q	T	C	Q
		°K	$\frac{кг \cdot \tau}{кг \cdot \tau \cdot \mu^2}$	$\frac{кг \cdot \tau}{м^2}$															
1	2,2	300	0,273	180	520	0,290	332	820	0,313	563	1100	0,336	810	1400	0,360	1100	1650	0,430	1570
2	4,4	"	"	360	387	0,278	465	640	0,300	845	870	0,319	1220	1120	0,340	1680	1350	0,356	2110
3	4,4	"	"	360	300	0,273	360	450	0,284	560	660	0,302	885	850	0,317	1190	1050	0,334	1540
4	II	"	"	900	300	"	900	310	0,273	930	450	0,284	1400	580	0,296	1890	700	0,305	2350
5	II	"	"	900	300	"	900	300	"	900	320	0,274	965	370	0,278	1130	420	0,282	1310
6	II	"	"	900	300	"	900	300	"	900	300	0,273	900	320	0,274	965	330	0,274	595

$$\Sigma_0 = 3600 \frac{кг \cdot \tau}{кг \cdot \tau \cdot \mu^2}$$

$$\Sigma_1 = 3857$$

$$\Sigma_2 = 4698$$

$$\Sigma_3 = 6180$$

$$\Sigma_4 = 7955$$

$$\Sigma_5 = 9875$$

При вычислениях потерь пластинки на одностороннее излучение используется формула:

$$S_{\text{сп}} = 0,62 \left[\left(\frac{T(x=0)}{100} \right)^4 - 81 \right] [Вт] \quad (18)$$

здесь принят диаметр пластинки 60 см. Результаты расчета даны в табл. 4 и на рис. 5.

Необходимая максимальная мощность для осуществления нагрева состоит $(S_{\text{оп}} + S_{\text{ип}})_{\text{max}} = (2,07 \cdot 10^5 + 0,655 \cdot 10^5) / \text{вт} = 272,5$ квт.

Далее нам понадобится оценка общих расходов тепла на нагрев пластинки ϕ 60 см.

Тепло для повышения теплосодержания Q_c оценим по табл.2:

$$Q_c = \sum S - \sum o = 9875 - 3600 = 6275 \frac{\text{Втч}}{\text{м}^2}$$

для пластинки ϕ 60 см

$$Q_{\text{сп}} = \pi \frac{0,6^2}{4} \cdot 6275 \text{ вт.ч.} = 2540 \text{ вт.ч.}$$

Оценку тепла, расходуемого на излучение, получим из табл.4. Для удобства пользования, результаты приведены в табл. 5.

Общий расход тепла будет $Q_{\text{сп}} + Q_{\text{изл}} = 2540 + 235 = 2775$ вт.ч.

Таблица 3

Отрезок времени	Разность	Мощность	Мощн. для пластинки ϕ 600 мм
	1920	$6,9 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^5$
	1775	$6,4 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$
	1482	$5,34 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^5$
	841	$3,02 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$
	257	$0,9 \cdot 10^5$	$0,254 \cdot 10^5$

Таблица 4

τ	$T(x=0)$ °К	Потери мощн. S_n [вт/м ²]	Потери мощн., Пластинки Ø 600 мм $S_{ип}$ [вт]
τ_5	1800	$2,31 \cdot 10^5$	$0,655 \cdot 10^5$
τ_4	1500	$1,11 \cdot 10^5$	$0,314 \cdot 10^5$
τ_3	1200	$0,47 \cdot 10^5$	$0,133 \cdot 10^5$
τ_2	900	$0,142 \cdot 10^5$	$0,04 \cdot 10^5$
τ_1	600	$0,026 \cdot 10^5$	$0,0074 \cdot 10^5$
τ_0	300	0	0

Таблица 5

отрезок времени	средние потери мощн. на излуч. S_n сред. [вт/м ²]	средн. потери тепла на из- луч. Q_n сред. [втч/м ²]	средние потери тепла на излуч. пласт. Ø 600 мм Q_n сред. [втч]
$\tau_5 - \tau_4$	$1,71 \cdot 10^5$	475	132
$\tau_4 - \tau_3$	$0,79 \cdot 10^5$	220	62
$\tau_3 - \tau_2$	$0,306 \cdot 10^5$	85	24
$\tau_2 - \tau_1$	$0,085 \cdot 10^5$	37,4	10,5
$\tau_1 - \tau_0$	$0,0134 \cdot 10^5$	33,2	6,6

$$Q_{ип} = 235,1 \text{ [вт.ч]}$$

§ 4. Анализ альтернатив нагрева изделия по основным факторам

Как видно из предыдущих оценок, задача построения системы нагрева (300 + 350 квт) не является тривиальной. По трудности решения это один из самых серьезных вопросов проектирования НИС-Т.

Решение задачи проведено по системной методике, изложенной в предыдущей статье.

Результаты синтеза альтернатив после проведения упорядочивания приведены в рис.6.

Основные факторы, учитываемые при минимизации графа альтернатив, приведены ниже.

Результат минимизации и оценок основных альтернатив оформлен в виде табл.6.

Анализ показывает, что самую высокую оценку как по общим, так и по релевантным факторам получили системы с тепловым аккумулятором.

Описание самого анализа из-за его большого объема мы опускаем.

Список факторов, учитываемых при проектировании НИС-Т

Основные группы факторов

- I технические,
- II технологические,
- III энергетические,
- IV измерительные,
- V эксплуатационные,
- VI организационные,
- VII испытательные,
- VIII экономические.

I. Технические факторы

I.1. Факторы качества НИС

I.1.1. надежность НИС

I.1.1.1. механическая надежность

I.1.1.2. термическая надежность

I.1.1.3. электрическая надежность

I.1.1.3.1. управления температурой

I.1.1.3.2. управления давлением

I.1.1.4. надежность контроля НИС

I.1.1.5. автоблокировка критических режимов управления.

I.1.2. отсутствие паразитных обратных связей.

I.2. Простота регулирования температурой

I.2.1. в режиме 1-го нагрева и 2-го нагрева

I.2.2. в режиме 1-го и 2-го охлаждения.

I.3. Универсальность НИС

I.3.1. возможность смены геометрии диска

I.3.1.1. смена диаметра

I.3.1.2. смена толщины

I.3.1.3. смена формы

I.3.2. возможность управления T от ЦВМ

I.3.3. возможность управления давлением.

II. Технологические факторы

II.1. Простота изготовления НИС

II.1.1. min дефицитных материалов, приборов

II.1.2. мал промышленные элементы

II.1.3. приемлемые размеры

II.2. Простота сборки

II.2.1. стандартизация и унификация элементов

II.2.1. легкость доступа к элементам

II.2.3. min разнообразия элементов.

III. Энергетические факторы

III.1. Ограниченная пиковая мощность подводимая от централей

III.1.1. сеть ≤ 50 квт

III.2. Ограниченный общий расход Σ мощности.

IV. Измерительные факторы

IV.1. Факторы качества измерений

IV.1.1. близость модели к реальным условиям

IV.1.1.1. однородность теплового потока

IV.1.1.2. возможность управления потоком

IV.1.1.3. достижимость T_{min} и T_{max}

IV.1.1.4. близость условий на поверхности диска к реальным

IV.1.1.5. корреляция с давлением

IV.1.2. Полнота измерительной информации

IV.1.2.1. возможность измерения T поля и T поверхности

IV.1.2.2. возможность измерения термического напряжения

IV.1.2.3. возможность измерения давлений.

IV.1.3. Точность управления T поверхности

IV.1.4. Малая инерция управления $\dot{T} \sim 20 + 30^\circ/\text{сек}$

IV.1.5. Малые осцилляции T поверхности

IV.1.6. Воспроизводимость управления T и измерения.

IV.2. Простота измерений T и P не должна нарушаться способом управления.

IV.3. Измерительная надежность

IV.3.1. автоблокировка критических режимов измерения

IV.3.2. контроль за критическим состоянием и режимом измерений

- У.3.3. точность измерения Т и Р
- У.3.4. помехоустойчивость относительно управляющих и измерительных каналов Р и Т
- У.3.4.1. min электрические помехи
- У.3.4.2. min излучательные помехи

У. Эксплуатационные факторы

- У.1. Простота подготовки эксперимента
 - У.1.1. простота смены диска
 - У.1.2. простота подготовки системы
- У.2. Ремонтодоступность узлов НИС
- У.3. min постоянное потребление системой дефицитных материалов, приборов
- У.4. Простота ремонта узлов и их замены
- У.5. Простота обслуживания эксперимента
 - У.5.1. наглядность информации
 - У.5.2. оперативность вмешательства в эксперимент
 - У.5.3. минимум количества обслуживающего персонала.
- У.6. Безопасность эксперимента
 - У.6.1. излучательная безопасность
 - У.6.2. токсичная безопасность
 - У.6.3. взрывобезопасность
 - У.6.4. электрическая безопасность
- У.7. Возможность перевозки НИС и последующей сборки.

У1. Организационные факторы

- У1.1. Наличие средств на изготовление НИС
- У1.2. Наличие помещений на сборку НИС
- У1.3. Наличие специалистов
 - У1.3.1. разработчики
 - У1.3.2. конструкторы
 - У1.3.3. экспериментаторы
 - У1.3.4. монтажники

- УІ.3.5. программисты
- УІ.3.6. машинисты (ЦВМ)
- УІ.3.7. электроники
- УІ.3.8. снабженцы
- УІ.4. Минимум неопределенности в задаче
 - УІ.4.1. минимум нерешенных задач
 - УІ.4.2. максимум литературных источников
 - УІ.4.3. возможность проведения всех экспериментов.
- УІ.5. Быстрота реализации системы
 - УІ.5.1. быстрота построения узлов (разработка, эксперимент, изготовление)
 - УІ.5.2. быстрота ввода ЦВМ
 - УІ.5.3. быстрота сборки и отладки НИС.
- УІ.6. Подготовка специалистов заказчика.

УП. Испытательные факторы

- УП.1. Испытания у исполнителя
 - УП.1.1. наличие специалистов
 - УП.1.2. наличие энергетических ресурсов
 - УП.1.3. наличие объекта исследования
 - УП.1.4. возможность макетирования.
- УП.2. Испытания у заказчика
 - УП.2.1. минимальный уровень помех
 - УП.2.2. подготовка персонала
 - УП.2.3. подготовка площадей
 - УП.2.4. подготовка электроэнергии
 - УП.2.5. установка НИС

УШ. Экономические факторы

- УШ.1. Оптимум НИР
- УШ.2. Оптимум разработки
 - УШ.2.1. система управления Т
 - УШ.2.2. система измерения Т, Р

- УШ.2.3. система программирования
- УШ.2.4. каналов связи с ЦВМ
 - УШ.2.4.1. УСО
 - УШ.2.4.2. сбор информации
 - УШ.2.4.3. контроль системы
 - УШ.2.4.4. индикация информации (график, осциллограмма, таблица)

УШ.3. Материалы, приборы

- УШ.3.1. печь, экраны, термомары
- УШ.3.2. термометр, АЦП, ЦАП; ...
- УШ.3.3. кабели
- УШ.3.4. радиодетали
- УШ.3.5. механика, металлы.

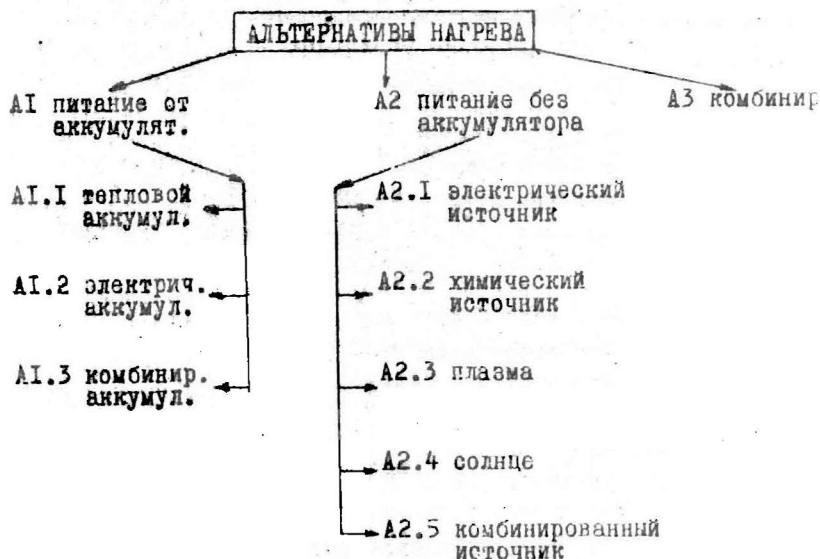


Рис. 6.

Альтернативы нагрева:

- AI. Питание от аккумулятора энергии
- AI.I. Тепловой аккумулятор
 - AI.I.I. Газ, пар, жидкость; $T = \text{const}(T_1, T_2, T_3 \dots)$; Твар.
 - AI.I.I.I. принудит. конвекция
 - AI.I.I.I.I. механич. перемешивание
 - AI.I.I.I.2. электр. индукц.
 - AI.I.I.2. естеств. конвекция
 - AI.I.I.2.I. прямая передача тепла
 - AI.I.I.2.I.I. не регулир.
 - AI.I.I.2.I.2. регулир. коэф. теплоотд.
 - AI.I.I.2.I.3. регулир. продолжит. (имп. нагрева)
 - AI.I.I.2.2. передача тепла через сопротивл.
 - AI.I.I.2.2.I. не регулир.
 - AI.I.I.2.2.2. рег. коэф. теплопров.
 - AI.I.I.2.2.3. рег. площадь
 - AI.I.I.2.2.4. рег. расстоян.
 - AI.I.I.2.2.5. рег. продолж. имп. нагр.
 - AI.I.I.2.2.6. рассеив. энергии.
 - AI.I.I.3. комбинир.
- AI.I.2. Твердое тело $T = \text{const}(T_1, T_2, \dots)$; Т вар.
 - AI.I.2.I. передача тепла теплопроводностью
 - AI.I.2.I.I. передача тепла контактам
 - AI.I.2.I.I.I. не регулир.
 - AI.I.2.I.I.2. регулир. давления
 - AI.I.2.I.I.3. регулир. продолж. тепл. импульса
 - AI.I.2.I.2. передача тепла через теплосопрот.
 - AI.I.2.I.2.3. регулир. коэф. теплопров.
 - AI.I.2.I.2.4. регулир. площадь
 - AI.I.2.I.2.5. регулир. толщина
 - AI.I.2.I.2.6. регул. продолж. тепл. имп.
 - AI.I.2.I.2.7. рассеив. энергии.
 - AI.I.2.2. Передача тепла излучением
 - AI.I.2.2.I. прямая передача тепла

A2.1.2.1.1.2.1.1.1. нагрев катода эл.сопрот.

A2.1.2.1.1.2.1.1.2. нагрев катода эл.пучковой

A2.1.2.1.2. проекция пучка малого размера

A2.1.2.1.2.1. форма - круглая, развертка - телевизионного типа.

A2.1.2.1.2.2. форма - прямоугольник, развертка - широкой стороной пучка.

A2.1.2.1.2.2.1. питание ≥ 35 кв.

A2.1.2.1.2.2.1.1. нагрев катода эл.сопр.

A2.1.2.1.2.2.1.2. нагрев катода эл.пучковой

A2.1.2.2. много пучков

A2.1.2.2.1. стационарные пучки

A2.1.2.2.1.1. проекция пучка большого размера

A2.1.2.2.2. сканируемые пучки

A2.2.1.2.2.2.(1,2) проекция пучка большого размера
проекция пучка малого размера

A2.1.2.2.2.(1,2)1. питание ≥ 35 кв.

A2.1.2.2.2.(1,2).1.1. нагрев катода эл.сопр.

A2.1.2.2.2.(1,2).1.2. нагрев катода эл.пучковой.

A2.1.3. Ионная бомбардировка

A2.1.4. Комбинир.способ

A2.2. Химический источник

A2.2.(1,2) газообразное топливо, жидкое топливо

A2.2.(1,2). окисл.воздухом, окисл.кислородом.

A2.2.(1,2).1. без интенсификац.

A2.2.(1,2).1.(1,2). беспламенное горение, открытое
пламя.

A2.2.(1,2).1.(1,2).(1,2). стац.пламя большого
диаметра, много пламенных
сканируемых горелок.

A2.2.1.3. твердое топливо

A2.3. плазма

A2.3.(1,2). фокусир.пучок, нефокусируемый пучок.

A2.3.(1,2).(1,2). один, много пучков.

A2.3.(1,2).(1,2).(1,2). стационарные передвиж.пучки.

Таблица 6

ТАБЛИЦА АНАЛИЗА АЛЬТЕРНАТИВ ПО ФАКТОРАМ

Альтернативы нагрева		Ф а к т о р ы (стр.)																								Σ ФАКТ.	Σ бсе ФАКТ.
		1			2			3			4			5			6			7							
		11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	51	52	53	61	62	63	71	72	73					
Питание от аккумулятора		1	1	1	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	20,5
Питание без аккумулятора		0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	5	15
1. Тепловой акумулятор; жидкость; T ₁ , T ₂ , ... естественн. конв.; через спортивн. нерегул.		1	1	1	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	3	20,5
2. Тепловой акумулятор; тверд. тело T ₁ - соотн.; излучением; через сопротивл.; измен. F.		0	1	1	0	0,5	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0,5	0	1	4	14
3. Тепловой акумулятор; твердое тело; T ₁ - соотн.; теплопроводность; через сопротивл. нерегул. (теплоемкости).		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	1	0,5	10	24,5
4. Без акумулятора; эл. источник; эл. сопротивл.; излуч.; инфракрасн. лампы; регул. U; M; Z.		0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	7	22
5. Без акумулятора; эл. источник; эл. соотн.; одним пучком; проекц. пучок большой на диск; катушка 35 кв.; индуктивн. метод; по слову «и»; регул. U; M; Z.		0	0,5	1	0	0	0	1	0	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0	1	0	0,5	0	0	0	1	0	1,5	9
6. Без акумулятора; эл. источник; эл. соотн.; одним пучком; малая катушка 35 кв.; нагрев кат. эл. сопротивл.; по слову «и»; регул. U; M; Z.		0	0	1	0	0	0	1	0	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0	1	0	0,5	1	0	0	1	0	2	9,5
7. Без акумулятора; эл. источник; эл. соотн.; много пучков; проекц. пучок большой на диск; катушка 35 кв.; нагрев кат. эл. сопротивл.; по слову «и»; регул. U; M; Z.		1	0,5	1	0	0	0	1	0,5	1	0	0,5	0,5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0,5	0	0	2	11,5
8. Без акумулятора; хим. источник; газообразан.; кислородом; без интенсиф.; открыт. пламя; сван. горелки; прямое регул.; общ. колич.; соотн.; T.		1	0,5	1	0	0	1	1	0	0	0,5	1	1	1	0	0	1	1	1	0,5	0	1	1	1	0	6	15,5

§ 5. Модели основных альтернатив "Теплового удара"

Ниже будут рассмотрены модели и конструктивные решения систем нагрева по альтернативам заслужившим наибольшую оценку.

- А. Жидкостный тепловой аккумулятор;
 T_1, T_2, \dots, T_n ; отдача тепла естественной конвекцией; нагрев через тепловое нерегулируемое сопротивление;

На рис.7 изображен вариант такой системы. Система состоит из съемной камеры I с инертной атмосферой, сосудов 2, 3, ..., n, в которых находятся теплоносители находящиеся при температурах T_1, T_2, \dots, T_n ; Температура в сосудах поддерживается электронагревателями. Сосуды имеют тепловую изоляцию 4 и убирающиеся при вводе диска тепловые экраны. Диск 6 на лицевой поверхности имеет нанесенный специальный слой, действующий как тепловой демпфер. К обойме диска 6 прикреплена камера 8 для создания давления на противоположной лицевой поверхности и водяная рубашка 9 для охлаждения. Имеются также выводы для датчиков температуры и давления.

Управление температурой диска достигается помещением диска 6 в сосуд с теплоносителем нужной температуры.

Вариант технически решаемый.

Недостатки:

- большие габариты,
- инерционность,
- трудность плавной регулировки.

Преимущества:

- надежность,
- отсутствие электрических помех.

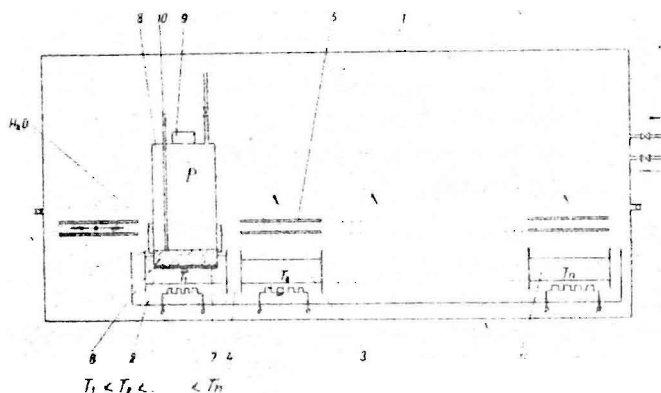


Рис. 7.

Б. Тепловой аккумулятор на твердом теле с постоянной максимальной температурой; отдача тепла излучением через теплосоппротивление σ изменяемому F.

На рис. 8. Изображено соответствующее конструктивное решение. Имеется съемная камера I с инертной атмосферой. Излучатель 2 питается от электронагревателя 5 сравнительно небольшой мощности. Излучатель закрыт тепловым изолятором 4. Заслонки 5, 6 со слоем теплоизоляции. Заслонки 7, 8 водоохлаждаемые, повышенной степени черноты. Диск 9 крепится в камере I и имеет водяную рубашку 10. Поверхность диска должна быть покрыта слоем 11 повышенной степени черноты. Герметический колпак 12 позволяет создавать необходимое давление. 14 и 15 - вводы датчиков дав-

ления и температуры. Клапаны 15 и 16 служат для подвода охлаждающего газа. Герметизирующая заслонка 17 позволяет разъединить верхнюю и нижнюю части камеры I.

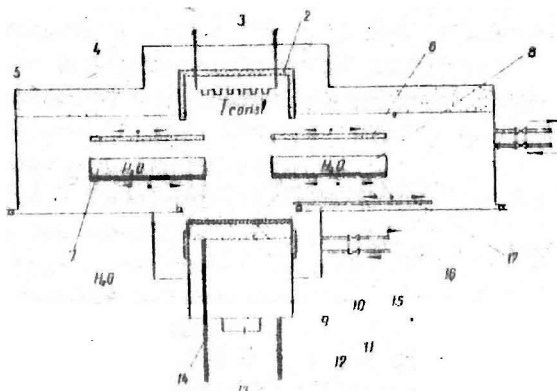


Рис. 8.

Цикл управления температурой:

- $T_0 + T_1$ - открыта заслонка 17; заслонки 7, 8 раздвинуты; заслонки 5, 6 раздвигаются на величину, задаваемую управляющим устройством (эти заслонки являются регуляторами величины теплового потока).
- $T_1 + T_2$ - заслонки 5, 6 и 7, 8 закрыты; происходит естественное охлаждение диска излучением на заслонки 7, 8.
- $T_2 + T_3$ - аналогично $T_0 + T_1$.
- $T_3 + T_0$ - аналогично $T_1 + T_2$, но при определенной T закрывается герметизирующая заслонка 17 и продувается газ через подводы 15, 16.

Модель. Выбор материалов.

Излучатель может быть многоблочным, как на рис. 8, либо оставлен из нескольких частей, что в общем не изменяет систему нагрева. Для установления режима излучения в $3 \cdot 10^5$ Вт необходимо задать температуру излучающего тела $T_{и}$, приведенные степени черноты $\epsilon_{пр}$ тел, тогда при максимальной температуре диска можно рассчитать необходимую приведенную поверхность H теплообменных тел. Поскольку

$$S = \epsilon_{пр} \zeta H \left[\left(\frac{T_{и}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \quad [Вт] \quad (19)$$

то можно получить, что

$$H = \frac{S}{\epsilon_{пр} \zeta \left[\left(\frac{T_{и}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]} \quad [м^2] \quad (20)$$

при: $S = 3 \cdot 10^5$ Вт, $\epsilon_{пр} = 0,8$, $\zeta = 5,67$ Вт/м²град⁴

$$T_{и} = 3000^{\circ}К, T = 1800^{\circ}К$$

получили $H = 0,094$ м².

Если оставить те же параметры, то изменить $T_{и} = 2700^{\circ}К$, то $H = 0,16$ м².

При $d_1 = d_2 = 0,6$ м (диаметры излучателя и диска равны) и расстояния между излучателем и диском $h = 0,4$ м.

$$H = \frac{\pi}{4} \left(\sqrt{d^2 + h^2} - h \right)^2 \sim 0,08 м^2 \quad (21)$$

Получается, что диаметр диска мал и его следует увеличить. Принимая $d_1 = 0,8$ м, $d_2 = 0,6$ м, $h = 0,4$ м, получим, что приведенная поверхность

$$H = \frac{\pi}{4} \left[\sqrt{\left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 + h^2} - \sqrt{\left(\frac{d_1 - d_2}{2} \right)^2 + h^2} \right]^2 \quad (22)$$

$$H \sim 0,085 м^2$$

Как видим увеличение площади излучателя не приводит к заметному увеличению H . Отсюда следует, что необходимо либо увеличивать температуру излучателя $T_{\text{л}}$, либо уменьшить расстояние k . Первое отпадает, поскольку уже при 3000°K трудно подобрать подходящие материалы /2, 14, 21/.

Единственным подходящим материалом для излучателя может служить графит, а в качестве изоляционного материала ламповая сажа. Изоляция экранами - затруднена, так как при таких температурах неприменимы ни вольфрамовые ни танталовые экраны /2, 14/, ибо при этих температурах они образуют соединения с графитом.

Следовательно, в этом варианте диск должен передвигаться во время эксперимента.

Технически нерешенных вопросов в этом варианте нет, но конструкция получается сложной.

В. Тепловой аккумулятор на твердом теле; отдача тепла проводимостью через нерегулируемое теплосоппротивление

На рис.9 изображен вариант стенда. Стенд состоит из герметической разъемной камеры I с инертным газом. В верхней части камеры установлен тепловой аккумулятор 2, нагреваемый электрическим сопротивлением 3. В период накопления тепла аккумулятор окружен экранами 4. Изделие 5 закреплено в нижней части камеры I, имеет водяное охлаждение 6, снабжено камерой давления 7 и кольцом 8, удерживающим теплоемкостное сопротивление 9 на лицевой поверхности. Стенд снабжен также водяным холодильником 10, перемещаемым в то же положение, которое на рис.9 занимает аккумулятор 2.

Предусмотрены датчики 11, 12 температуры и давления.

Цикл изменения температуры (рис.1) осуществляется следующим образом.

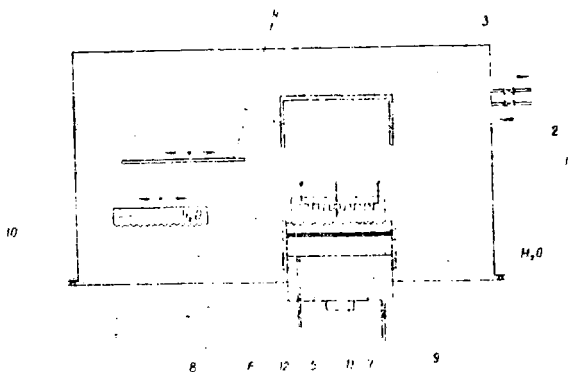


Рис. 9.

- $T_0 + T_I$: аккумулятор касается поверхности жидкого слоя 9, тепло от аккумулятора 2 к изделию 5 передается теплопроводностью слоя 9.
- $T_I + T_2$: аккумулятор убирается вверх, на его место выводится холодильник 10.
- $T_2 + T_3$: аналогично как $T_0 - T_I$.
- $T_3 + T_0$: аналогично $T_I + T_2$; в случае необходимости, для имитации эксплуатационных условий давление в камере может повышаться.

Ниже приводится ориентировочный расчет нагревающей системы стенда.

Известно, что для нагрева диска от T_0 до T_I (рис. I) требуется (с учетом излучения лицевой поверхности) тепловое излучение (см. "Расчет нагрева диска") количеством:

$$Q = 2775 \text{ вт.4}$$

и максимальная мощность теплового потока

$$S = 3 \cdot 10^5 \text{ вт}$$

Принимая в качестве теплоемкостного сопротивления олово /2/, толщину слоя олова на диске $h = 3$ мм, коэффициент теплопроводности олова $\lambda = 30$ вт/м.град. /15/ (экстраполяция) и поверхность контакта $F = 0,282$ м², можем рассчитать необходимый температурный напор для получения теплового потока заданной мощности.

$$S = \frac{\lambda \cdot F \cdot \Delta T}{\ell} \quad (23)$$

откуда

$$\Delta T = \frac{S \cdot \ell}{\lambda \cdot F} \sim 110^\circ \text{К}$$

Следовательно, в конце первого этапа нагрева тепловой аккумулятор должен иметь температуру

$$T_{a1} = T_I + 110 = 1800 + 110 = 1910^\circ \text{К.}$$

Задавая начальную температуру теплового аккумулятора на 90°К выше $T_{a0} = 2000^\circ \text{К}$, и используя в качестве материала аккумулятора молибден с удельной теплоемкостью при 2000°К $c = 0,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ /15/, т.е. $c = 0,12 \frac{\text{вт} \cdot \text{ч}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$, можно рассчитать необходимый вес аккумулятора

$$Q = c G_{mo} (T_{a0} - T_{a1}) \quad (24)$$

откуда

$$G_{mo} = \frac{Q}{c(T_{a0} - T_{a1})} = \frac{2775}{0,12 \cdot (2000 - 1910)} = 257 \text{ кг.}$$

при удельном весе молибдена $\gamma = 10200$ кг/м³ и площади поперечного сечения $F_a = 0,282$ м² толщина диска h_a будет

$$h_{mo} = \frac{G}{F_a \cdot \gamma} = \frac{257}{0,282 \cdot 10200} = 0,089 \text{ м}$$

т.е. $h_a = 89$ мм.

Как видим, получаются большие расходы дорогостоящего материала,

Повторяя расчет и принимая в качестве материала аккумулятора графит:

$C = 0,45$ ккал/кг.град = $0,52$ вт.4/кг.град по средним данным 32, 23/ $\gamma = 1900$ кг/м³.

Вес графитового аккумулятора $G_c = 60$ кг.

Толщина диска аккумулятора $h_c = 0,112$ м = 112 мм.

Теперь проверим, не упадет ли температура на рабочей поверхности аккумулятора в конце нагрева ниже $T_a = 1910^{\circ}\text{K}$.

Как видно из рис. 5, подводимая мощность для нагрева почти линейно меняется во времени со скоростью изменения

$$S_o = \frac{S}{\tau} = \frac{3 \cdot 10^5}{50} \cdot \frac{3600}{50} = 2,26 \cdot 10^7 \text{ вт/ч}$$

С такой же скоростью должно отводиться тепло от аккумулятора и температура на его рабочей поверхности будет изменяться /18/ по закону:

$$T'_{a1} = T_{a0} - G \frac{S_o \cdot h_c^3}{\lambda \cdot a} \quad (25)$$

где: θ - см /18/

h - толщина аккумулятора $h = 0,112$ м

λ - коэффициент теплопроводности для графика при 2000°K

$\lambda = 21$ вт/кг.град. /2/

a - коэффициент температуропроводн.

$$a = \frac{\lambda}{c \delta} = \frac{21}{0,45 \cdot 1900} = 24,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$$

Для получения θ рассчитаем аргументы: $F_o = \frac{a \tau}{h^2}$

где: τ время продолжения нагрева $\tau = \frac{50}{3600}$ ч

$$F_o = \frac{24,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{50}{3600}}{(0,112)^2} = 0,0275$$

при этом $\theta = 0,006 = 6 \cdot 10^{-3}$

$$T_{aI}' = 2000 - \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 16 \cdot 10^7 \cdot (0,112)^3}{21 \cdot 24,5 \cdot 10^{-3}} = 1640^{\circ}\text{K}$$

Отклонение от принятой зависимости T_{aI}

$$\Delta = T_{aI} - T_{aI}' = 1910 - 1640 = 270^{\circ}\text{K}$$

На такую величину следует увеличивать начальную температуру аккумулятора. Итак ориентировочно начальная температура аккумулятора

$$T_{a0}' = 2270^{\circ}\text{K}$$

Коэффициенты конвективной теплопередачи для жидких металлов большие и колеблются от 200 до 40.000 ккал/м² ч.град. /4/, так как для передачи через слой необходимой мощности нам потребуется создать дополнительный температурный напор, который здесь не учтен. Требуется дополнительное изучение коэффициента теплопередачи в системе олово-кварц.

Г. Нагрев без аккумулятора; электрический источник на электросопротивления (на лампах), передача тепла излучением; регулирование изменением u, N, T .

Принципиальная схема показана на рис.10. Стенд состоит из разъемной герметической камеры I наполненной инертным газом. В камере встроены эл.сопротивления 2 с водяным охлаждением 3 выводов. Изделие 4 имеет водяной холодильник 5 и колпак 6 для создания давления на задней стороне изделия. Передняя сторона диска покрыта слоем 7. Камера I снабжена выдвигаемым холодильником 8 и вводами газа 9. Для измерения температуры диска и давления служат датчики 10, 11.

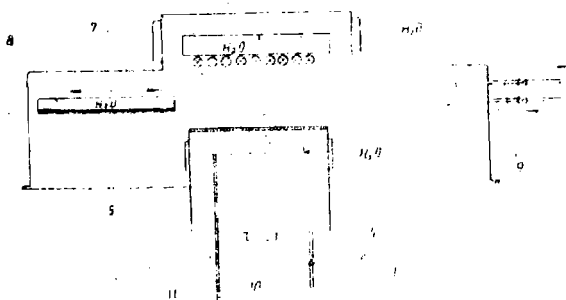


Рис. 10.

Выполнение цикла (см.рис.1) происходит следующим образом.

$T_0 - T_1$: Излучением нагревателей производится нагрев диска.

$T_1 - T_2$: вдвигается холодильник 8, охлаждение происходит излучением поверхностного слоя 7, диска 4.

$T_2 - T_3$: аналогично $T_0 - T_1$.

$T_3 - T_0$: аналогично $T_1 - T_2$ и дополнительно продуванием газа через вводы 9.

Если излучатель 2 имеет общую площадь равную площади диска 4 и находится на расстоянии $h = 70$ мм от поверхности диска, то можем считать, что d_1 , диска равный d_2 излучателя: $d_1 = d_2 = d = 600$ мм.

Приведенную поверхность вычислим по формуле

$$H = \frac{\pi}{4} (\sqrt{d^2 + h^2} - h)^2 = 2250 \text{ см}^2$$

Если степень черноты вольфрамового нагревателя $\varepsilon = 0,32$ и необходимо передавать на диск мощность $S = 3 \cdot 10^5$ вт, то при температуре диска $T_I = 1800^\circ\text{K}$ температура излучателя T_H будет

$$T_H = 100 \sqrt[4]{\frac{S}{\varepsilon \sigma H} + \left(\frac{T_I}{100}\right)^4} \sim 3030^\circ\text{K}$$

Если температура нагревателя $T = 3030^\circ\text{K}$ и он помещен в камеру из окисленного алюминия (степень черноты $\varepsilon = 0,15$), а температура стенок $T_0 = 300^\circ\text{K}$, то дополнительные потери будут

$$S_{\text{пот}} = \varepsilon_0 F \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4 \right] \sim 2,02 \cdot 10^5 \text{ вт}$$

Так что суммарная мощность для осуществления нагрева диска от 300 - до 1800°K за время 50 сек будет

$$\Sigma S = 3 \cdot 10^5 + 2,02 \cdot 10^5 = 5,02 \cdot 10^5 \text{ вт.}$$

При использовании графитовых нагревателей, у которых степень черноты $\varepsilon = 0,8$, температура нагревателя получилась бы $T_{\text{нг}} \approx 2500^\circ\text{K}$, следовательно, потери на излучение $S_{\text{пот}} = 0,93 \cdot 10^5$ вт.

Потери на излучение можно снизить применяя экраны, но для увеличения эффективности экранирования в нестационарном режиме необходимо их массу брать минимальной, что возможно при использовании экранов из вольфрама и молибдена.

- Д. Без теплового аккумулятора; электрический источник на основе электронной бомбардировки; однолучевая пушка с катодом большого диаметра; $u \approx 35$ кВ; бомбардировка по слою с теплоемкостью $Q_c \sim 0$; регулирование изменением U_{a1} и τ .

Принципиальная схема стенда показана на рис. II. Стенд состоит из вакуумной камеры, в которой находится катод 2 большого диаметра, фиксирующий электрод 3 и водяной холодильник 4. Диск 5 закреплен в днище камеры и имеет водяное охлаждение 6. На лицевой поверхности диска 5 нанесен электропроводящий слой 7, контактирующий с облойсой диска. Диск 5 снабжен камерой давления 8 с датчиками давления и температуры 9, 10.

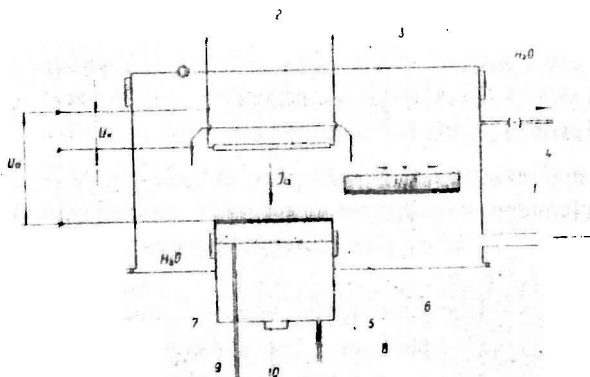


Рис. II.

Выполнение цикла (см. рис. I) происходит следующим образом:

$T_0 + T_1$: нагревается катод 2, между катодом и диском прикладывается анодное напряжение U_a ; напряжение U_k служит для отражения электронов.

$T_1 + T_2$: включается нагрев катода и анодное напряжение. Вводится холодильник 4.

$T_2 + T_3$: аналогично $T_0 - T_1$.

$T_3 + T_0$: аналогично $T_1 - T_2$ и дополнительно впускается газ в камеру I.

Если принять анодное напряжение $U_a = 30.000$ в, то для выделения мощности $S = 3 \cdot 10^5$ вт на диске потребуются анодный ток

$$J_a = \frac{S}{U_a} \sim 10 \text{ а}$$

Принимаем площадь катода 0,8 от площади изделия т.е. $F_k = 0,8 \cdot F_{\text{изд}} = 0,8 \cdot 0,282 = 0,235 \text{ м}^2 = 2350 \text{ см}^2$.

Удельный анодный ток получится

$$i_a = \frac{J_a}{F_k} = \frac{10}{2350} = 0,00423 = 4,23 \cdot 10^{-3} \frac{\text{а}}{\text{см}^2}$$

По /22/ для вольфрамового катода необходима температура $T_k = 2100^\circ \text{К}$.

При этом на диск будет падать дополнительно тепловой поток от катода $\sim 0,145 \cdot 10^5$ вт.

Потери на излучение составят

$$S_{\text{пот}} = \epsilon \delta F_k \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]$$

где ϵ - степень черноты поверхности камеры, для окисленного алюминия $\epsilon = 0,15$.

F_k - поверхность катода $F_k = 0,235 \text{ м}^2$

$T_0 = 300^\circ \text{К}$

$$S_{\text{пот}} = 0,15 \cdot 5 \cdot 67 \cdot 0,235 (21^4 - 3^2) = 0,39 \cdot 10^5 \text{ вт.}$$

Суммарная мощность для нагрева диска от 300°K до 1800°K за время 50 сек будет

$$\sum S = 3,10^5 + 0,39 \cdot 10^5 = 3,39 \cdot 10^5 \text{ вт}$$

Эксперимент.

Для выполнения условий нагрева с помощью электронной пушки были поставлены следующие эксперименты.

1. На кварцевую пластинку методом вакуумного распыления наносилась угольная пленка. Покрытие имело вид отдельных угольных блоков неправильной формы с прозрачностью 0,8 и размерами 0,1 + 2,0 мм². В пограничных зонах толщиной 0,1 + 0,3 мм уголь отсутствовал.

Такая пластинка прогревалась электронным лучом сечением 20 x 0,1 мм и мощностью 300 вт. Это соответствует потоку на диск в 3,5 · 10⁵ вт.

Прогрев до T ~ 1600°С заметных изменений, как в составе угля, так и в составе пластинки не вызвал. Это следует из электронограмм, снятых после эксперимента. Электронограммы не обнаружили переход угля в графит. Однако в местах прогрева угольная пленка хорошо адгезировалась с кварцем. Электронограммы показали, что при этом химических соединений (например, карбид кремния) не образовалось.

Испарение пленки не замечено.

2. Было исследовано покрытие, состоящее из сажи, которая получена осаждением продуктов горения бензола на кварцевую пластинку.

Электронный луч тех же параметров позволил нагреть покрытие до T ~ 1600°С. Слой сажи не испарился, но несколько изменился по цвету.

3. Изучалась возможность использования сажи в качестве теплоизолятора. Для этого сажа наносилась на графитовую подложку и прогревалась до 3000°С. Оказалось, что T подложки при этом не превысила 900°С. Это говорит о хороших теплоизолирующих свойствах сажи при очень высоких

температурах.

Однако анализ рентгенограммы слоя обнаружил слабые, но все же различные кольца, принадлежащие графиту. Это указывает на возможность частичной графитизации сажи, а, следовательно, и постепенной потери своих свойств. Однако необходимо заметить, что в связи с высокой степенью дисперсности сажи она может сохранять свои теплоизолирующие свойства, даже несмотря на частичную графитизацию.

4. Изучалась возможность нагрева электронной пушкой кварцевой пластинки без проводящего слоя. Как и следовало ожидать, пластинка не нагревалась.

5. Изучалась возможность применения пушки для плавления кварца. Если температуру проводящего слоя (уголь, сажа) повысить до 2000°C , то в течение $15 + 30$ сек наблюдалось значительное проплавление пластинки под лучом. Однако при этом, из-за сильного испарения кварца, наблюдались перебои в работе пушки (сильные разрядные токи).

Е. Разновидности нагрева диска электронной пушкой

Разновидности систем нагрева диска электронными пушками показаны на рис. 12 и рис. 13.

Пушка рис. 12 со сдвинутой пучкой отличается от показанной на рис. 11 тем, что имеет отдельный анод 1, магнитную линзу 2 и отклоняющую систему 3. Стенд по рис. 13 оборудован N пушками, которые по своей конструкции похожи на показанные на рис. 12, только не имеют специальные отклоняющие системы.

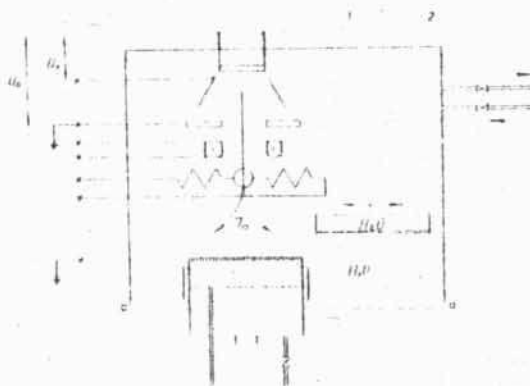


Рис. 12.

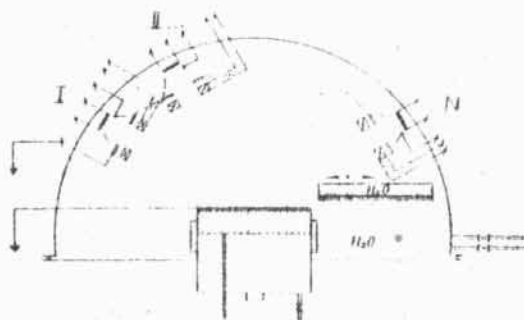


Рис. 13.

Ж. Нагрев изделия газовым
пламенем

Такая система показана на рис. 14. Нагревающее устройство имеет вращающийся блок горелок 1, и устройство для отсоса дымовых газов 2.

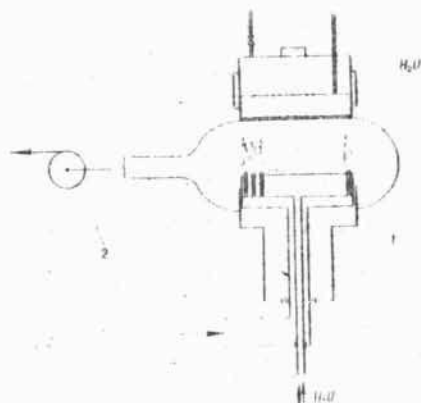


Рис. 14.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ П

1. Шлык Ю.П., Ганин Е.А., Контактный теплообмен, М., Л., ГЭЦ, 1963.
2. Техника высоких температур, под ред. И.Э.Кэмпбелла М., ИЛ., 1959.
3. Ильин В.Г., Теплообменные аппараты из графита, М., Машиностроение, 1965.
4. Справочник металлста, т. I, под ред. Н.С.Ачеркана, М., Машиностроение, 1965.
5. Sava A., Grislin V., Hidro augsttemperatūras siltumneses siltumenerģētika. R., Liezma, 1967.
6. Свет Д.Я., Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения, М., Наука, 1968.
7. Бродский С.И., Ковзан В.В., Хаскович Л.Л., Оборудование для термической обработки тугоплавких металлов в электровакуумном производстве, М., Энергия, 1969.
8. Блок А.Г., Основы теплообмена излучением., М., Л., ГЭИ, 1962.
9. Заборонок Г.Ф. и др., Электронная плавка металлов, М., Металлургия, 1965.
10. Алямовский И.В., Электронные пучки и электронные пушки, М., Сов.радио, 1966.
11. Ботвинкин О.К., Запорожский А.И., Кварцевое стекло, М., 1965.
12. Эспе В., Технология электровакуумных материалов, Т1; Т2, М., Л., ГЭИ, 1962.

13. Конструкционные материалы ТЗ (энциклопед. справочник), редактор. А.Т.Туманов М., 1965.
14. Котельников Р.В. и др., Особо тугоплавкие элементы и соединения М., 1969.
15. Чиркин В.С., Теплофизические свойства материалов ядерной техники (справочник), М., Атомиздат 1968.
16. Данилин Б.С., Вакуумное нанесение тонких пленок, М., Энергия, 1967.
17. Башенко В.В. и др., Электротермия зонной плавки металлов и полупроводников М., Энергия, 1965.
18. Пехович А.И., Жидких В.М., Расчеты теплового режима твердых тел., Л., Энергия, 1968.
19. Исаченко В.П. и др., Теплопередача., М., Энергия, 1969.
20. Ласло Т., Оптические высокотемпературные печи, М., Мир, 1968.
21. Высокотемпературные неорганические покрытия, под ред. Дх.Гуменика, мл. М., Металлургия, 1968.
22. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В., Эмиссионная электроника, М., Наука, 1966.
23. Справочник по машиностроительным материалам, ТУ, под ред. Г.И.Погодина-Алексеева, М., Машгиз, 1960.

Л. Кузьмина

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ
И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ЛИНЕЙНЫХ
МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ

§ I. Задача сглаживания

Дана реализация некоторого процесса $x(t)$

$$x(t) = F(s(t), \xi(t)) \quad (I.1)$$

где $s(t)$ - детерминированная функция,
 $\xi(t)$ - случайная функция.

Предполагаем, что тип функции известен. Рассмотрим случай, когда:

$$x(t) = s(t) + \xi(t) \quad (I.2)$$

Где: $s(t)$ на любом произвольном промежутке времени $[t_i, t_{i+n}]$ принадлежит классу P -алгебраических полиномов или разлагается в сходящийся ряд Тейлора; $\xi(t)$ - стационарная случайная функция, статистически независимая от $s(t)$; $M_\xi(t) = 0$.

Сглаживанием будем называть процесс получения гладкой в определенном смысле функции $\tilde{x}(t)$ по исходной $x(t)$ таким образом, чтобы выполнялось некоторое условие минимального отклонения преобразованной функции от исходной.

Линейность сглаживания

Различают два вида сглаживания - линейное и нелинейное. Нами будут рассмотрены лишь линейные методы сглаживания. Условие линейности - ограничение типа операций, применяемых для сглаживания. При линейном сглаживании $\tilde{x}(t)$ всегда будет принадлежать линейной оболочке $x(t)$

$$\tilde{x}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \alpha_j x(t-j) \quad (I.3)$$

где $\sum_{j=0}^{n-1} a_j = 1$

Это условие вытекает из требования несмещенности оценки $\tilde{x}(t)$,

$$M[\tilde{x}(t) - s(t)] = 0 \quad (I.4)$$

Гладкость функции.

В определении понятия сглаживания говорилось, что это процесс получения гладкой функции. Какую функцию мы будем называть гладкой? Непрерывную функцию называют гладкой, если она имеет непрерывные первые производные /32/. К сожалению рассматриваемые нами непрерывные функции заданы на дискретном множестве значений аргумента (t_i) . Согласно одной точке зрения дискретные функции класса P называются гладкими, если составленная для них таблица разностей правильна /1/. Согласно /33/ таблица разностей до k -го порядка включительно называется правильной, если все разности $(k+1)$ порядка удовлетворяют неравенству.

$$|\Delta^{k+1} x| < 2^k \quad (I.5)$$

При этом не обязательно, чтобы выполнялось

$$|\Delta^m x| < 2^m, \quad m < k$$

Пусть нам задана последовательность значений функции

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

где $s(t_i) = \sum_{j=0}^i a_j t_i^j$. Составим таблицу разностей.

Если бы $x(t_i)$ была гладкой, то есть $\xi(t_i) = 0$ для всех $i = \overline{1, N}$ то, начиная с $k = m+1$, все разности практически равны нулю. В силу присутствия $\xi(t_i)$ этого не произойдет.

Будем характеризовать степень негладкости $x(t)$ дисперсией σ_{ξ}^2 функции $\xi(t)$. Предположим, что все $\xi(t)$ попарно независимы. Тогда по $(m+1)$ разности можно оценить σ_{ξ}^2 . Трудности встречаются двойного характера:

1) неизвестна степень полинома, а, следовательно, неизвестно какого порядка взять разности,

2) функция $S(t)$ вообще не является полиномом.

Согласно /5/ практика исследования поведения разностей различных функций показала, что разности имеют тенденцию вначале уменьшаться по величине, а затем увеличиваться, испытывая сильные колебания из-за отрицательной корреляции. Считают, что первый столбец разностей, следующий за минимальным, соответствует $\xi(t)$. Дисперсия распределения $(m+1)$ разности равна:

$$D(\Delta^{m+1}_{\xi}) = M \left[\sum_{\kappa=c}^{m+1} (-1)^{m+1-\kappa} C(m+1, \kappa) \xi_{m+\kappa+1} \right]^2 \quad (I.7)$$

Учитывая, что $M_{\xi}(t) = 0$, $M[\xi_{\kappa+m}, \xi_{m+s}] = 0$, $\kappa \neq s$

$$D(\Delta^{m+1}_{\xi}) = \sigma_{\xi}^2 C(2(m+1), m+1) = \frac{2(m+1)!}{(m!)^2} \sigma_{\xi}^2 \quad (I.8)$$

Вычислив среднее значение квадратов разностей $(m+1)$ -го столбца и разделив его на $C(2(m+1), m+1)$, получим оценку σ_{ξ}^2 в исходной таблице.

§ 2. ВЫБОР МОДЕЛИ

Приступая к процессу сглаживания, необходимо выбрать модель, описывающую исходные данные. От правильности выбора модели зависит качество сглаживания. Модель может описывать непосредственно все исходные данные или их некоторую часть. Соответственно различают локальное сглаживание и сглаживание в "целом". При сглаживании данных физического эксперимента, как правило, заранее известен вид модели, описывающей исходные данные. Но сложность модели часто приводит к трудным и громоздким расчетным формулам. В этом случае исходная модель заменяется более простыми моделями, описывающими ее по частям, и приме-

няется локальное сглаживание. При использовании локального сглаживания возможны следующие варианты:

- 1) интервал сглаживания постоянный,
- 2) интервал сглаживания переменный,
- 3) вид модели не меняется при переходе от одного интервала сглаживания к другому,
- 4) вид модели меняется от одного интервала сглаживания к другому.

§ 3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

После определения вида модели $F(a_0, \dots, a_m, t)$, перед нами стоит задача выбора метода для оценки ее параметров. Наиболее распространенным является метод наименьших квадратов, согласно которому искомые параметры a_0, \dots, a_m надо выбирать так, чтобы

$$\sum_{i=0}^{n-1} [x(t_i) - F(a_0, \dots, a_m, t_i)]^2 = \min, \quad m < n. \quad (3.1)$$

Возможны и другие методы определения параметров. Минимизация суммы модулей отклонений:

$$\sum_{i=0}^{n-1} |x(t_i) - F(a_0, \dots, a_m, t_i)| = \min \quad (3.2)$$

Минимизация максимального отклонения

$$\max |x(t_i) - F(a_0, \dots, a_m, t_i)| = \min, \quad i = \overline{0, n-1} \quad (3.3)$$

Помимо требования выполнения основного условия, например 3.1, на искомые параметры могут налагаться дополнительные соотношения.

Нами будут рассмотрены локальные методы сглаживания при двух предположениях:

1) среди всевозможных классов моделей рассматривается лишь класс многочленов - P

$$F(a_0, \dots, a_m, t) = \sum_{j=0}^m a_j t^j \quad (3.4)$$

2) способ определения параметров модели - метод наименьших квадратов

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} \left[x(t_i) - \sum_{j=0}^m a_j t_i^j \right]^2 = \min \quad (3.5)$$

В качестве метода, налагающего, кроме основных условий типа (3,5) дополнительные соотношения на искомые параметры, будет рассмотрен метод Родса. В сумме Q все значения $x(t_i)$ рассматриваются с одинаковыми весами. В общем случае $x(t_i)$ приписывают веса и минимизируется сумма:

$$Q' = \sum_{i=0}^{n-1} \rho_i \left[x(t_i) - \sum_{j=0}^m a_j t_i^j \right]^2 = \min \quad (3.6)$$

где

$$\rho_i > 0, \quad \sum_{i=0}^{n-1} \rho_i = 1$$

Сглаживание в "целом" будет осуществляться путем разложения данных в ряд Фурье.

Будем предполагать, что область изменения аргумента функции есть $0, 1, \dots, n, \dots$. В противном случае замена переменной $t_k = t_0 + \kappa h$ (h -шаг дискретизации) на новую $t'_k = (t_k - t_0) h^{-1} = \kappa$ — приводит к этой области изменения аргумента.

§ 4. СЛУЧАЙНАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ОШИБКИ
СГЛАЖИВАНИЯ

Пусть сглаживание проводится по формуле вида

$$\tilde{x}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j x(t-j), \quad t = \overline{1, N} \quad (4.1)$$

Полная ошибка сглаживания определится

$$\alpha_{\Sigma}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j x(t-j) - A s(t) \quad (4.2)$$

где $A s(t)$ - функция, которую необходимо получить после сглаживания (если нас интересует только процедура сглаживания, то A - единичный оператор).

Перепишем (4.1), заменяя $x(t)$ суммой $s(t) + \xi(t)$

$$\alpha_{\Sigma}(t) = \left[\sum_{j=0}^{n-1} \omega_j s(t-j) - A s(t) \right] + \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j \xi(t-j) \quad (4.3)$$

Из (4.3) видим, что полная ошибка сглаживания состоит из двух составляющих

$$\alpha_{\Sigma}(t) = \sigma_g(t) + \sigma_{cn}(t) \quad (4.4)$$

где

$$\sigma_g(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j s(t-j) - A s(t) \quad (4.5)$$

динамическая ошибка сглаживания, а

$$\sigma_{cn}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j \xi(t-j) \quad (4.6)$$

случайная ошибка сглаживания.

Случайная ошибка сглаживания

Случайную ошибку сглаживания принято характеризовать средним квадратом этой ошибки

$$c_{ca}^2(t) = M \left[\sum_{j=0}^{n-1} \omega_j \xi(t-j) \right]^2 \quad (4.7)$$

поскольку $M_{\xi}(t) = 0$, выражение (4.7) приводится к виду

$$c_{ca}^2(t) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j \omega_{\kappa} R_{\xi}(\kappa-j) \quad (4.8)$$

$R_{\xi}(\kappa-j)$ - корреляционная функция. Если значения случайной функции $\xi(t)$ взаимно независимы в отдельные дискретные моменты времени, то

$$R_{\xi}(\kappa-j) = \begin{cases} c_{\xi}^2 & \kappa = j \\ 0 & \kappa \neq j \end{cases} \quad (4.9)$$

где $c_{\xi}^2 = n^{-1} \sum_0^{n-1} \xi^2(j)$ - дисперсия случайной функции $\xi(t)$. Таким образом дисперсия случайной ошибки после сглаживания равна

$$c_{ca}^2(t) = c_{\xi}^2 \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j^2 \quad (4.10)$$

Качество сглаживания будем характеризовать коэффициентом сглаживания

$$\eta = \frac{c_{ca}^2(t)}{c_{\xi}^2(t)} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j^2 \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) справедливо и для оценки качества сглаживания по реализации бесконечной длины.

$$\eta = \sum_{j=0}^{\infty} \omega_j^2 \quad (4.12)$$

Динамическая ошибка сглаживания

Рассмотрим динамическую ошибку сглаживания

$$C_g(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_j s(t-j) - A s(t) \quad (4.13)$$

Представим $s(t-j)$ на интервале сглаживания в виде ряда Тейлора:

$$s(t-j) = s(t) - j S^{(1)}(t) + \frac{j^2}{2!} S^{(2)}(t) + \dots + \frac{(-1)^m j^m}{m!} S^{(m)}(t) \quad (4.14)$$

Функция $A s(t)$ аналогично может быть представлена в виде

$$A s(t) = C_0 s(t) + C_1 S^{(1)}(t) + \dots + \frac{C_m}{m!} S^{(m)}(t) \quad (4.15)$$

Коэффициенты C_k определяют величину запаздывания /7/. В случае просто сглаживания

$$C_k = (-j)^k \quad (4.16)$$

Подставив (4.14), (4.15) в (4.13), получим выражение для динамической ошибки

$$C_g(t) = D_0 + D_1 S^{(1)}(t) + \dots + D_m S^{(m)}(t) \quad (4.17)$$

где

$$D_k = \mu_k - \frac{C_k}{k!} \quad (4.18)$$

$$\mu_k = \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{\ell=0}^{n-1} \ell^k \omega_\ell, \quad k = \overline{0, m} \quad (4.19)$$

При сглаживании по реализации бесконечной длины коэффициенты μ_k определяются

$$\mu_k = \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{\ell=0}^{\infty} \ell^k \omega_\ell \quad (4.20)$$

Если все $D_j = 0, j = \overline{0, m}$, то сглаживание $S(t)$ происходит без искажения. В этом случае на каждом интервале сглаживания $S(t)$ точно описывается полиномом степени m . На практике $S(t)$ аппроксимируется на интервале сглаживания полиномом степени m с той или иной степенью точности, зависящей от величин неучтенных производных, в результате чего и будет возникать динамическая ошибка. Будем говорить, что данная формула сглаживания дает динамическую ошибку $(m+1)$ порядка, если все

$$D_j = 0, \quad j = \overline{0, m} \quad (4.21)$$

Динамическую ошибку сглаживания в этом случае будем оценивать

$$e_g(t) = D_{m+1} S^{(m+1)}(t) \quad (4.22)$$

§ 5. СГЛАЖИВАНИЕ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Пусть модель, описывающая исходные данные, есть полином m -ой степени

$$s(t-i) = \sum_{j=0}^m a_j (-i)^j, \quad i = \overline{0, n-1} \quad (5.1)$$

где t - момент времени, в который определяются коэффициенты полинома. Наилучшие значения коэффициентов определяются из условий

$$\frac{\partial Q}{\partial a_j} = 0, \quad j = \overline{0, m} \quad (5.2)$$

где

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} \left[x(t-i) - \sum_{j=0}^m a_j (-i)^j \right]^2 \quad (5.3)$$

В дальнейшем для краткости индекс t в a_t^j опускаем. Подставляя (5.3) в (5.2) получим систему уравнений

$$\sum_{i=0}^{n-1} [x(t-i)(-i)^\kappa - \sum_{j=0}^m a_j(-i)^{j-\kappa}] = 0, \quad \kappa = \overline{0, m} \quad (5.4)$$

Введем обозначения:

$$\chi = \sum_{i=0}^{n-1} x(t-i)(-i)^\kappa \quad (5.5)$$

$$b_j = \sum_{i=0}^{n-1} (-i)^j$$

тогда (5.4) преобразуется в:

$$\sum_{j=0}^m a_j b_{j+\kappa} = \chi_\kappa, \quad \kappa = \overline{0, m} \quad (5.6)$$

Решая систему уравнений (5.6) относительно a_j , получим

$$a_j = \frac{D_j}{D} \quad (5.7)$$

где

$$D = \begin{vmatrix} b_0 & \dots & b_m \\ \dots & \dots & \dots \\ b_m & \dots & b_{2m} \end{vmatrix}$$

D_j получается из D заменой j -го столбца на столбец из свободных членов. Раскроем определитель D_j по элементам j -го столбца.

$$a_j = D^{-1} \sum_{\ell=0}^m Q_{\ell+1, j+1} \sum_{i=0}^{n-1} x(t-i)(-i)^\ell \quad (5.8)$$

$Q_{\ell+1, j+1}$ - определитель, получающийся из \mathcal{D} вычеркиванием $(\ell+1)$ -ой строки и $(j+1)$ -го столбца. Сглаженное значение $\tilde{\xi}(t)$ будет равно a_0 , так как $i=0$

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\mathcal{D}} \sum_{\ell=0}^m Q_{\ell+1, 1} \sum_{i=0}^{n-1} x(t-i)(-i)^\ell \quad (5.9)$$

Введя переменные ω_i и Δ_ℓ , перепишем (5.9)

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i x(t-i) \\ \omega_i &= \sum_{\ell=0}^m \Delta_\ell (-i)^\ell \\ \Delta_\ell &= \frac{1}{\mathcal{D}} Q_{\ell+1, 1} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Сглаженное значение в произвольной точке $(t-i)$, $i = \overline{0, n-1}$

$$\tilde{x}(t-i) = \sum_{j=0}^m (-i)^j \cdot \frac{1}{\mathcal{D}} \sum_{\ell=0}^m Q_{\ell+1, j+1} \sum_{i=0}^{n-1} x \quad (5.11)$$

В формуле (5.11) $(-i)^j$ есть ничто иное как величина запаздывания, введенная в (4.16). Преобразуем (5.11), обозначив $(-i)^j$ через c_j .

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t-i) &= \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i x(t-i) \\ \omega_i &= \sum_{\ell=0}^m \Delta'_\ell (-i)^\ell \\ \Delta'_\ell &= \frac{1}{\mathcal{D}} \sum_{j=0}^m Q_{\ell+1, j+1} c_j \end{aligned} \quad (5.12)$$

Динамическая ошибка при сглаживании по формуле (5.12) определяется из (4.17 + 4.19). Подставим в μ_j значение весовой функции

$$\mu_j = \frac{1}{j!} \sum_{k=0}^{n-1} (-\kappa)^j \sum_{\ell=0}^m \Delta_\ell (-\kappa)^\ell = \frac{1}{j!} \sum_{\ell=0}^m \Delta_\ell \nu_{\ell+j} \quad (5.13)$$

Из (5.13) можно сделать заключение, что формула сглаживания (5.12) обладает динамической ошибкой $(m+1)$ порядка

$$D_j = 0, \quad j = \overline{0, m} \quad (5.14)$$

Действительно, подставляя в (5.13) значение Δ'_ℓ из (5.12), получим, что

$$\mu_j = \frac{c_j}{j!} \quad (5.15)$$

Коэффициент сглаживания, соответствующий формуле сглаживания (5.12)

$$\eta = \sum_{\ell=0}^m Q_\ell \Delta_\ell \quad (5.16)$$

§ 6. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА - КОНСТАНТА

В предыдущем параграфе была получена общая формула сглаживания (5.12) для случая, когда модель процесса - полином m -ой степени. Остановимся на конкретных примерах.

Пусть $s(t) = \text{const} = a$ (случай $m = 0$). Тогда из (5.10) получаем:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \quad (6.1)$$

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(t-i) \quad (6.2)$$

Сглаживание по формуле (6.2) есть простое усреднение по n точкам. Коэффициент сглаживания в этом случае равен:

$$\zeta = \frac{1}{n} \quad (6.3)$$

а коэффициенты динамической ошибки

$$D_0 = 0, \quad D_1 = -\frac{(n-1)}{2}, \quad D_2 = \frac{(n-1)(2n-1)}{12} \quad (6.4)$$

Таким образом формула сглаживания (6.2) обладает динамической ошибкой первого порядка. Уже при сглаживании линейной функции появляется динамическая ошибка, равная

$$C_g(t) = -\frac{(n-1)}{2} S^{(1)}(t) \quad (6.5)$$

Отметим, что ζ уменьшается с увеличением числа точек, по которым проводится сглаживание. Напротив, динамическая ошибка растет одновременно с возрастанием n . Поведение этих ошибок, а также суммарной ошибки, с возрастанием n показано на рис. I.

Только в случае равенства нулю динамической ошибки, случайная ошибка с возрастанием n асимптотически стремится к нулю. В противном случае перед нами стоит задача выбора оптимального n . Так как суммарная и динамическая ошибки не коррелированы между собой, то квадрат суммарной ошибки равен сумме квадратов ее составляющих.

$$C_{\Sigma}^2(t) = C_g^2(t) + C_{\lambda}^2(t) \quad (6.6)$$

Для определения оптимального n по критерию минимума дисперсии суммарной ошибки необходимо продифференцировать сумму (6.6) по n и приравнять результат к нулю.

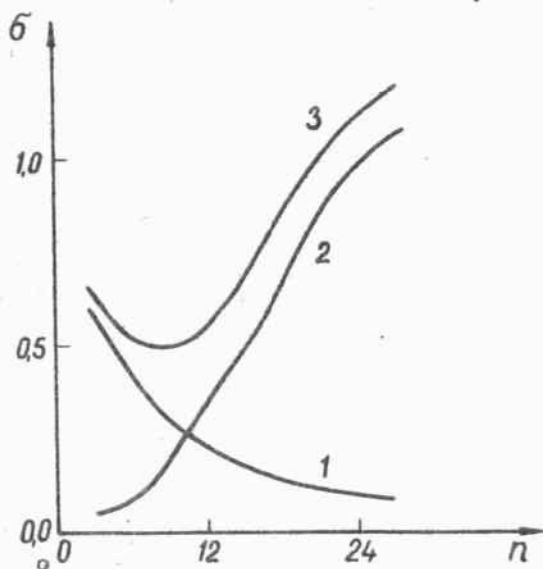


Рис. I.

Кривая 1 показывает ход случайной ошибки
 Кривая 2 " " динамической ошибки
 Кривая 3 " " суммарной ошибки

Напомним, что в общем случае квадрат динамической ошибки находится /7/ из выражения:

$$\sigma_g^2(t) = C_i^2 \left(\frac{d^{(Q)} S(t)}{dt^i} \right)^2 \quad (6.7)$$

где $\frac{d^{(i)} S(t)}{dt^i}$ i - производная исходной функции. Оценка i - производной в большинстве случаев представляет сложный и трудоемкий процесс. Поэтому на практике n выбирают интуитивно в зависимости от величины дисперсии σ_{ξ}^2 случайной функции. Величину последней для каждого измерительного канала можно определить до начала эксперимента. Различные функции класса P сглаживались по формуле (6.2) при различных значениях σ_{ξ}^2 . В результате было получено, что чем больше величина σ_{ξ}^2 , тем больше точек необходимо брать для сглаживания. В целом сглаживание по формуле (6.2) целесообразно применять при больших значениях σ_{ξ}^2 . В этом случае мы имеем значительное уменьшение суммарной ошибки.

§ 7. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА СГЛАЖИВАНИЯ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

В работе /28/ предлагается методика повышения порядка динамической ошибки для формул сглаживания. Это осуществляется путем введения некоторой величины запаздывания. При сглаживании функции

$$S(t) = a_0 + a_1 t \quad (7.1)$$

по формуле (6.2) коэффициенты динамической ошибки были равны:

$$D_0 = 0, \quad D_1 = -\frac{(n-1)}{2} \quad (7.2)$$

Введем в (4.18) параметр :

$$D_k = \mu_k - \frac{(-i)^k}{k!} \quad (7.3)$$

Величину i теперь можно выбрать так, чтобы D_1 обратилось в нуль. В этом случае

$$i = -\frac{(n-1)}{2} \quad (7.4)$$

Таким образом при сглаживании линейной функции по цент-

рированной формуле динамическая ошибка первого порядка будет равна нулю

$$\tilde{x}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=\frac{n-1}{2}}^{n-1} S(j+i) \quad (7.5)$$

Выбор величины запаздывания можно проводить приравнивая нулю коэффициенты динамической ошибки или из условия определения минимального λ .

§ 8. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА - ПОЛИНОМ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ

Согласно (5.12) для $m = 1$ сглаженное значение в произвольный момент времени $(t-j)$ будет выражаться

$$\tilde{x}(t-j) = \frac{2}{(n-1)n(n+1)} \sum_{i=0}^{n-1} \left[(2n-1)(n-1) - 3i(n-1) - j(3n-6i-3) \right] x(t-i) \quad (8.1)$$

Коэффициент сглаживания, соответствующий формуле (8.1)

$$\lambda = \frac{2}{(n-1)n(n+1)} \left[(n-1)(2n-1) \left(\frac{c_0^2}{6} + 6(n-1)c_0c_1 + 6c_1^2 \right) \right] \quad (8.2)$$

где c_i ($i = \overline{0,1}$) - величина запаздывания, равная $c_i = (-j)^i$

Формула (8.3) определяет сглаженное значение в момент t , т.е. $j = 0$.

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{2(2n-1) - 6i}{n(n+1)} x(t-i) \quad (8.3)$$

Соответственно, коэффициент сглаживания равен

$$\lambda = \frac{2(2n-1)}{n(n+1)} \quad (8.4)$$

а коэффициенты динамической ошибки

$$D_0 = D_1 = 0, \quad D_2 = -\frac{1}{12} (n-1)(n-2) \quad (8.5)$$

Определим, для какого j величина ζ по (8.2) принимает минимальное значение:

$$\frac{\partial \rho}{\partial j} = \frac{2}{(n-1)n(n+1)} [-6(n-1) + 12j] = 0 \quad (8.6)$$

Отсюда:

$$j = \frac{n-1}{2} \quad (8.7)$$

для $j = \left(\frac{n-1}{2}\right)$ ζ принимает минимальное значение, равное

$$\zeta = \frac{1}{n} \quad (8.8)$$

Подставим в (8.1) значение $j = \frac{n-1}{2}$ и сделаем замену переменных. Формула (8.9) дает наилучшее качество сглаживания в смысле минимума случайной ошибки

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} x(t-i) \quad (8.9)$$

Коэффициенты динамической ошибки в этом случае равны:

$$D_0 = D_1 = 0, \quad D_2 = \frac{(n-1)(n+1)}{24} \quad (8.10)$$

Формула аналогичная (8.9), была получена в предыдущем параграфе путем введения величины запаздывания. Последняя определялась приравниванием D_1 к нулю. Таким образом (8.9) — оптимальная формула сглаживания для линейной функции.

§ 9. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА - ПОЛИНОМ ВТОРОЙ СТЕПЕНИ

Пусть

$$s(t-j) = a_0 - j a_1 + j^2 a_2 \quad (9.1)$$

Решая систему уравнений (5.6), находим значения коэффициентов a_i :

$$a_0 = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} [(3n^2 - 3n + 2) - 6i(2n-1) + 10i^2] x(t-i)$$

$$a_1 = \frac{6}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} \left[3(2n-1) - \frac{2(2n-1)(3n-1)}{(n-1)(n-2)} i + \frac{30i^2}{n-2} \right] x(t-i) \quad (9.2)$$

$$a_2 = \frac{30}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} \left[1 - \frac{6}{n-2} i + \frac{6}{(n-1)(n-2)} i^2 \right] x(t-i)$$

Формулу (9.1) представим в виде:

$$S(t-j) = \sum_{k=0}^3 a_k c_k, \quad c_k = (-j)^k \quad (9.3)$$

Сглаженное значение в момент времени t , $j=0$, определится из:

$$\tilde{x}(t) = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} [(3n^2 - 3n + 2) - 6(2n-1)i + 10i^2] x(t-i) \quad (9.4)$$

Коэффициент сглаживания

$$h = \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)} \quad (9.5)$$

а коэффициенты динамической ошибки

$$\mathcal{D}_0 = \mathcal{D}_1 = \mathcal{D}_2 = 0 \quad (9.6)$$

$$\mathcal{D}_3 = -\frac{1}{120} (n-1)(n-2)(n-3)$$

Сглаженное значение для произвольной величины запаздывания определяется

$$x(t-c) = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} \left\{ (3n^2 - 3n + 2)c_0 + 6(2n-1)c_1 + 10c_2 - \right. \\ \left. - [6(2n-1)c_0 + \frac{4(2n-1)(8n+11)}{(n-1)(n-2)}c_1 + \frac{60}{(n-2)}c_2]i + \right. \\ \left. + [10c_0 + \frac{60}{(n-2)}c_1 + \frac{60}{(n-1)(n-2)}c_2]i^2 \right\} x(t-i) \quad (9.7)$$

Отметим, что весовая функция оптимальной[†] формулы сглаживания есть полином, степень которого равна степени сглаживаемого полинома. Впервые этот результат был получен в работе /7/.

Определим величину запаздывания c для (9.7) из условия $D_3 = 0$:

$$c_{\text{опт}} = \frac{n-1}{2} \quad (9.8)$$

Подставляя $c_{\text{опт}}$ в (9.7), имеем

$$x\left(t - \frac{n-1}{2}\right) = \frac{3}{2(n-2)n(n+2)} \sum_{i=0}^{n-1} \left[-(n^2 - 5n + 6) - 10(n-1)i - 10i^2 \right] x(t-i) \quad (9.9)$$

Введем двойную замену переменных:

$$t' = t - \frac{n-1}{2}, \\ j = \frac{n-1}{2} - i$$

тогда

$$\tilde{S}(t') = \sum_{j=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \frac{9n^2 - 21 - 60j^2}{4(n-2)n(n+2)} x(t'+j) \quad (9.10)$$

[†] В смысле равенства нулю динамической ошибки.

Сглаживание по (9.10) дает динамическую ошибку четвертого порядка. Коэффициент сглаживания равен:

$$\eta = \frac{3(3n^2 - 4)(n^2 - 6)}{n(n-2)^2(n+2)^2} \quad (9.11)$$

Пример: Рассмотрим случай $n = 5$, $m = 2$.

Формула (9.10) преобразуется к виду:

$$\tilde{S}(i) = \frac{1}{35} [-3x(i-2) + 12x(i-1) + 17x(i) + 12x(i+1) - 3x(i+2)] \quad (9.12)$$

Сглаживание по этой формуле известно под названием метода четвертых разностей. Недостаток всех центрированных методов сглаживания в том, что остаются несглаженные крайние точки. Для них приходится использовать другие расчетные формулы, что увеличивает длину программы и время вычислений. Например, крайние точки для вышеприведенной формулы сглаживания вычисляются следующим путем /3/

$$\begin{aligned} \tilde{x}(-n) &= x(-n) + \frac{1}{5} \delta_{n-2}^3 + \frac{2}{35} \delta_{n-2}^4, \\ \tilde{x}(-n+1) &= x(-n+1) - \frac{2}{5} \delta_{n-2}^3 - \frac{1}{7} \delta_{n-2}^4, \\ \tilde{x}(n) &= x(n) - \frac{1}{5} \delta_{n-2}^3 + \frac{2}{35} \delta_{n-2}^4, \\ \tilde{x}(n-1) &= x(n-1) + \frac{2}{5} \delta_{n-2}^3 - \frac{1}{7} \delta_{n-2}^4. \end{aligned} \quad (9.13)$$

где $\delta_i^4 = x_{i-2} - 4x_{i-1} + 6x_i - 4x_{i+1} + x_{i+2}$

$$\delta_i^3 = x_{i-2} - 3x_{i-1} + 3x_i - x_{i+1}$$

В ы в о д:

Если исходные данные не поступают в автоматическом режиме, имеется вся совокупность значений функции, то желательно применять центрированные формулы сглаживания. В этом случае мы получаем минимальный коэффициент сглаживания или близкий к минимальному и наиболее высокий порядок динамической ошибки. Расчеты весовых коэффициентов в центрированных формулах сглаживания упрощаются так-

же потому, что суммы вида

$$\sum_{i=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} i^{j+k}$$

для четных $j+k$ равны нулю. Отсюда вытекает, что

$$a_{mj} = a_{m+1j}$$

если m и j оба четные, или оба нечетные. Индекс m означает степень проводимого полинома, j - порядковый номер коэффициентов полинома.

§ 10. МЕТОД РОДСА

Сущность метода состоит в получении гладкой кривой, состоящей из последовательности дуг полиномов. Проведем через точки $-k, \dots, 0, \dots, k$ полином степени $m < n = 2k + 1$

$$S(i) = \sum_{j=0}^m a_j i^j, \quad i = \overline{-k, k} \quad (10.1)$$

Коэффициенты a_j определяются из (5.6). Сглаженное значение $\tilde{S}(i)$ в точке $i = 0$ равно a_0 , а значение первой производной в этой точке равно a_1 . Через следующие n точек проведем полином той же степени

$$S'(i) = \sum_{j=0}^m b_j i^j, \quad i = \overline{-k-1, k+1} \quad (10.2)$$

таким образом, чтобы он касался $S(i)$ в точке $i = 1$. Условие касания запишется

$$\begin{aligned} b_0 &= a_0 + a_1 + \dots + a_m \\ b_1 &= a_1 + 2a_2 + \dots + ma_m \end{aligned} \quad (10.3)$$

Коэффициенты b_0, b_1 определяются через a_0, a_1, x_i из уравнений (10.4), (10.5):

$$b_0 - a_0 - a_1 = \sum_{j=2}^m a_j$$

$$\sum_{i=-k}^k i^u x_i - \sum_{i=-k}^k i^u a_0 - \sum_{i=-k}^k i^{u+1} a_1 = \sum_{j=2}^m \sum_{i=-k}^k i^{j+u} a_j \quad (10.4)$$

$$b_0 - a_1 = \sum_{j=2}^m j a_j$$

$$\sum_{i=-k}^k i^u x_i - \sum_{i=-k}^k i^u a_0 - \sum_{i=-k}^k i^{u+1} a_1 = \sum_{j=2}^m \sum_{i=-k}^k i^{u+j} a_j \quad (10.5)$$

Остальные коэффициенты определяются из $(n-1)$ уравнений

$$\sum_{j=0}^m \sum_{i=-k+1}^{k+1} i^{u+j} b_j = \sum_{i=-k+1}^{k+1} i^u x_i, \quad u = \overline{2, m} \quad (10.6)$$

Продолжая такое построение, проводим полином

$$S''(i) = \sum_{j=0}^m c_j i^j \quad (10.7)$$

через следующие n точек $-k+2, \dots, \dots, k+2$ так, чтобы он касался $S'(i)$ в точке $i=2$. Уравнения для определения c_j аналогичны уравнениям (10.4 + 10.6). В /12/ даны расчетные формулы для $m=4, n=2, 3, 4, 5, 6, 7$.

Пример: Приведем расчетные формулы для случая $m=2, n=5$ и сравним их с методом четвертых разностей.*

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{35} [-3(x_{i-2} + x_{i+2}) + 12(x_{i+1} + x_{i-1}) + 17x_i] \\
 a_1 &= \frac{1}{10} [2(x_{i+2} - x_{i-2}) + (x_{i+1} - x_{i-1})] \\
 b_0 &= \frac{1}{34} [4(x_{i+2} + x_{i-2}) + (x_{i+1} - x_{i-1}) + 24a_0 + 34a_1] \\
 b_1 &= \frac{1}{17} [4(x_{i+2} + x_{i-2}) + (x_{i+1} - x_{i-1}) + 17a_1 - 10a_0] \quad (10.8) \\
 c_0 &= \frac{1}{34} [4(x_{i+3} + x_{i-1}) + (x_{i+2} + x_i) + 24b_0 + 34b_1] \\
 c_1 &= \frac{1}{17} [4(x_{i+3} + x_{i-1}) + (x_{i+2} + x_i) + 17b_1 - 10b_0]
 \end{aligned}$$

Перепишем a_0 , b_0 , c_0 в более удобном виде для дальнейших расчетов и подставим в b_0 значения a_0 и a_1 , выраженные через x , а в c_0 — b_0 , b_1 .

Окончательно получим:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= -0.085x_{i-2} + 0.343x_{i-1} + 0.484x_i + 0.343x_{i+1} - 0.085x_{i+2} \\
 b_0 &= 0.028x_{i-2} + 0.257x_{i-1} + 0.343x_i + 0.29x_{i+1} + 0.085x_{i+2} \quad (10.9) \\
 c_0 &= 0.107x_{i-2} + 0.057x_{i-1} - 0.014x_i + 0.158x_{i+1} + 0.575x_{i+2} + 0.117x_{i+3}
 \end{aligned}$$

Соотношение для a_0 совпадает с (9.12). Случайная ошибка сглаживания в первой точке будет

$$\sigma_{сг}^2 = \sigma_{\xi}^2 \cdot 0.466 \quad (10.10)$$

Для метода четвертых разностей случайная ошибка во всех остальных точках также вычисляется по формуле (10.10). В методе Родса случайная ошибка во второй сглаженной точке, равной b_0 , вычисляется по формуле

$$\sigma_{сг}^2 = \sigma_{\xi}^2 \cdot 0.35 \quad (10.11)$$

В следующей точке, соответственно, по формуле

$$\sigma_{сг}^2 = \sigma_{\xi}^2 \cdot 0.27 \quad (10.12)$$

После сглаживания этим методом получается последовательность неравноточных значений функции.

Условие соприкосновения дуг полиномов в методе Родса состояло в равенстве первых производных в точке касания. Это условие можно расширить, потребовав равенство и вторых производных в точке касания. Расчетные уравнения составляются аналогичным образом.

§ II. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ

Все рассмотренные выше формулы сглаживания осуществляли процесс сглаживания по n текущим значениям $x(t)$. Для их реализации на ЦВМ необходимо n запоминающих ячеек для хранения всех дискретных значений функции, и n запоминающих ячеек для хранения значений весовой функции. Кроме того при вычислении сглаженного значения $\tilde{x}(t)$ необходимо выполнить n операций умножения и n операций сложения за один шаг дискретизации. Значительного уменьшения объема памяти можно достичь, если осуществлять сглаживание по всем прошлым значениям функции взятым с постепенно убывающими весами.

Метод, в котором весовые коэффициенты меняются по экспоненциальному закону, впервые был описан Холтом /23/. Специальный случай экспоненциального сглаживания исследовался Брауном /9-10/.

Определим оператор экспоненциального сглаживания S :

$$S_t(x) = \alpha \sum_{j=0}^{t-1} (1-\alpha)^j x_{t-j} + (1-\alpha)^t x_0, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{II. I})$$

При $\alpha = 1$ эффект сглаживания отсутствует, при $\alpha = 0$ сглаженное значение в точке t будет равно сглаженному значению в предыдущей точке. Соотношение (II. I) можно

представить

$$S_t(x) = \alpha x_t + (1-\alpha) S_{t-1}(x) \quad (II.2)$$

откуда нетрудно заметить, что с возрастанием α все меньше учитываются предыдущие значения функции. Экспоненциальное сглаживание дает несмещенную оценку:

$$M[S_t(x)] = \alpha \sum_{\kappa=0}^{\infty} \beta^{\kappa} M[x_{t-\kappa}] = M[x_t] \sum_{\kappa=0}^{\infty} \alpha \beta^{\kappa} = M[x_{\kappa}] \quad (II.3)$$

здесь $\beta = 1 - \alpha$.

Оператор экспоненциального сглаживания можно применять повторно, при этом справедлива следующая теорема.

Т е о р е м а I

Сглаживание кратности K соответствует однократному сглаживанию оператором S^K .

$$S_t^K = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \alpha^K \frac{(K-1+t)!}{t!(K-1)!} (1-\alpha)^t, & t \geq 0 \end{cases}$$

Доказательство проведем по методу математической индукции. Согласно (II.1).

$$S_t(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha (1-\alpha)^j x_{t-j} \quad (II.5)$$

т.е. (II.4) справедливо для $K = 1$. Предположим, что оно справедливо для K и докажем для $K + 1$.

$$S_t^{K+1} = S_t(x) S_t^K(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \alpha (1-\alpha)^i \alpha^K (1-\alpha)^j \frac{(K-1+j)!}{j!(K-1)!} x_{t-j-1} \quad (II.6)$$

Введем индекс $\ell = m + j$. Область определения $0 \leq m \leq \infty$, $0 \leq j < \infty$ соответствует области определения $0 \leq \ell \leq \infty$, $0 \leq j < \ell$. Поэтому

Методом математической индукции покажем, что

$$\sum_{j=0}^{\ell} \frac{(k-1+j)!}{j!(k-1)!} = \frac{(k+\ell)!}{\ell!k!} \quad (\text{II.8})$$

Для $\ell = 0, 1$ справедливость равенства очевидна. Предположим, что оно верно для ℓ и докажем его справедливость для $\ell+1$.

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{\ell+1} \frac{(k-1+j)!}{j!(k-1)!} &= \sum_{j=0}^{\ell} \frac{(k-1+j)!}{j!(k-1)!} + \frac{(k+\ell)!}{(\ell+1)!(k-1)!} = \\ &= \frac{(k+\ell+1)!}{(\ell+1)!k!} \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

что и требовалось доказать.

n -раз сглаженное значение выразим через введенный оператор n -го порядка

$$S_t^n(x) = \alpha S_t^{n-1}(x) + (1-\alpha) S_{t-1}^n(x) \quad (\text{II.10})$$

Сглаживание по формуле (II.5) дает динамическую ошибку первого порядка. Действительно,

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha \beta^i = 1, \quad \tau = 1, \quad Q_0 = 0 \quad (\text{II.11})$$

Случайная ошибка при сглаживании функций вида $S(t) = \text{const}$

$$\sigma_{\text{сл}}^2 = \frac{\alpha}{2-\alpha} \sigma_{\xi}^2 \quad (\text{II.12})$$

Качество сглаживания характеризуется коэффициентом сглаживания h . Потребуем, чтобы качество сглаживания по формулам (II.5) и (6.2) было одинаковым:

$$h = \frac{1}{n} = \frac{\alpha}{2-\alpha} \quad (\text{II.13})$$

Из (II.13) получаем соотношение для определения α

$$\alpha = \frac{2}{n+1} \quad (\text{II.14})$$

Если выбрать $\alpha = 0.2$, качество сглаживания будет таким же, как при усреднении по 9 точкам. При этом требуется три запоминающие ячейки для хранения α , β , \tilde{x}_{t-1} . Если имеется реализация длиной $n = 50$, то по методу усреднения минимальный коэффициент сглаживания, который можно достичь, равен $1/50$. Для получения такого же \hat{y} по методу экспоненциального сглаживания достаточно выбрать $\alpha = 0.04$. Выбран $\alpha < 0.04$ мы добьемся лучшего качества сглаживания, чем при простом усреднении. Отметим, что в (II.11) при вычислении μ_0 сумма бралась по бесконечному числу точек. На практике мы имеем дело с конечной реализацией. В этом случае

$$\alpha \sum_{i=0}^{n-1} \beta^i = 1 - \beta^{n-1} \quad (II.15)$$

Так как

$$\beta = \frac{n-1}{n+1}$$

то
$$\beta^{n-1} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^{n-1}$$

Для конечной реализации динамическая ошибка не равна нулю. Однако уже для $n > 10$ она становится незначительной. Почти 90% весовых коэффициентов приходится на первые n значений.

§ 12. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ ПОЛИНОМОВ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ

Пусть на интервале сглаживания

$$S(t-i) = \sum_{j=0}^m a_t^j (-i)^j \quad (12.1)$$

Фундаментальная теорема экспоненциального сглаживания утверждает следующее /10/.

Теорема 2:

Если $S(t-i) = \sum_{j=0}^m a_t^j (-i)^j$, то коэффициенты a_t^j могут быть представлены

в виде линейных комбинаций величин, полученных в результате действия оператора S^{m+1} на $x(t)$, причем

$$a_t^0 = [J - (J - S)^{m+1}]_t x \quad (12.2)$$

где $S_t^0(x) = J_t(x) = x_t$ - единичный оператор.

Непосредственный способ получения коэффициентов $a_t^0, a_t^1, \dots, a_t^m$ через экспоненциально сглаженные величины получается из условия

$$\alpha \sum_{j=0}^{\infty} \beta^j (x_{t-j} - S_{t-j})^2 = \min \quad (12.3)$$

Напомним, что

$$x_{t-j} = S_{t-j} + \xi_{t-j}$$

Т е о р е м а 3 /II/

Полином $S(t-j)$ степени m , минимизирующий (12.3), обладает тем свойством, что

$$S_t^k(x) = S_t^k(s) \quad (12.4)$$

Пусть

$$S(t-j) = a_t^0 - ja_t^1 + j^2 a_t^2 / 2! \quad (12.5)$$

Уравнения для вычисления коэффициентов параболы следующие:

$$\begin{aligned} a_t^0 \alpha \sum_j \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^2 \beta^j &= \alpha \sum_j \beta^j x_{t-j} \\ a_t^0 \alpha \sum_j j \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j^2 \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^3 \beta^j &= \alpha \sum_j j \beta^j x_{t-j} \\ a_t^0 \alpha \sum_j j^2 \beta^j - a_t^1 \alpha \sum_j j^3 \beta^j + 0.5 a_t^2 \sum_j j^4 \beta^j &= \alpha \sum_j j^2 \beta^j x_{t-j} \end{aligned} \quad (12.6)$$

Приведем ряд полезных соотношений, необходимых для дальнейших вычислений:

$$\sum_{j=0}^{\infty} \beta^j = \frac{1}{1-\beta}, \quad \sum_{j=0}^{\infty} j \beta^j = \frac{\beta}{(1-\beta)^2}, \quad \sum_{j=0}^{\infty} j^2 \beta^j = \frac{\beta(1+\beta)}{(1-\beta)^3},$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} j^3 \beta^j = \frac{\beta(1+4\beta+\beta^2)}{(1-\beta)^4}, \quad \sum_{j=0}^{\infty} j^4 \beta^j = \frac{\beta(1+11\beta+11\beta^2+\beta^3)}{(1-\beta)^5} \quad (12.7)$$

Принимая во внимание (12.7) и (11.4), решаем (12.6) относительно a'_t :

$$a_t^0 = 3S_t(x) - 3S_t^2(x) + S_t^3(x)$$

$$a_t^1 = \frac{\alpha}{2\beta} [(6-5\alpha)S_t(x) - 2(5-4\alpha)S_t^2(x) + (4-3\alpha)S_t^3(x)] \quad (12.8)$$

$$a_t^2 = \frac{\alpha^2}{\beta^2} [S_t(x) - 2S_t^2(x) - S_t^3(x)]$$

Для сравнения приведем соотношения для вычисления a_t^0 , a_t^1 в случае, когда $S(t-j) = a_t^0 - ja_t^1$:

$$a_t^0 = 2S_t(x) - S_t^2(x) \quad (12.9)$$

$$a_t^1 = \frac{\alpha}{\beta} [S_t(x) - S_t^2(x)]$$

Сглаженное значение в момент времени t равно коэффициенту a_t^0 :

$$\tilde{x}(t) = 3S_t(x) - 3S_t^2(x) + S_t^3(x) \quad (12.10)$$

$$\tilde{x}(t) = 2S_t(x) - S_t^2(x) \quad (12.11)$$

Для сглаживания по (12.10) и (12.11) необходимо задать начальные 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 среднему значению, вычисленному по предшествующим значениям, в противном случае необходимо предсказать значение средней. В худшем случае за начальные сглаженные значения можно принять исходные несглаженные. Коэффициенты сглаживания, соответствующие формулам (12.10) и (12.11) равны:

$$\begin{aligned} \hat{z}_1 = & \frac{\alpha}{4} (-5\beta^3 + 37\beta^7 + 77\beta^6 + 45\beta^5 + 36\beta^3 - 5\beta^2) (1+\beta)^{-5} \\ & + \frac{1}{4} (576\alpha - 2008\alpha^2 + 2944\alpha^3 - 2306\alpha^4 + 986\alpha^5 - \\ & - 189\alpha^6 - 4\alpha^7 + 5\alpha^8) (1+\beta)^{-5}. \end{aligned} \quad (12.12)$$

$$\hat{z}_2 = \alpha(1+4\beta+5\beta^2)(1+\beta)^{-3} \quad (12.13)$$

Сглаживание по методу экспоненциального сглаживания дает значительный эффект только в том случае, когда известна степень полинома $S(t)$. В противном случае получится расходящийся процесс. Действительно, если имеется полином степени ℓ , а в качестве гипотезы взят полином степени m , $m < \ell$, то динамическая ошибка будет равна:

$$e_{\hat{z}_i} = \sum_{k=m+1}^{\ell} c_k S^{(k)}(i) \quad (12.14)$$

Здесь $S^{(k)}(i)$ является функцией времени и будет стремиться к бесконечности при $t \rightarrow \infty$.

Как выбрать α ? Пусть для сглаживания функции $S(t) = \text{const}$ уже выбрано значение α . Тогда для сглаживания линейной функции $S(t) = a_1^0 + a_1^1 t$ константа α выбирается так, чтобы результат сглаживания относительно свободного члена a_1^0 был таким же, как при сглаживании функции $S(t) = a_1^0$. Это условие запишется

$$(1 - \alpha_1)^2 = 1 - \alpha \quad (12.15)$$

Аналогично, при сглаживании полинома степени m , α_m выбирается из условия

$$(1 - \alpha_m)^{m+1} = 1 - \alpha \quad (12.16)$$

В работах /14/, /16/ предлагаются другие подходы к определению сглаживающей константы α .

§ 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ α ПО ДВУМ РЕАЛИЗАЦИЯМ

Определение α , в случае когда неизвестен вид функции $S(t)$, возможно по двум реализациям. Пусть даны две реализации одного и того же процесса:

$$x(t) = S(t) + \xi(t) \quad (13.1)$$

$$x'(t) = S(t) + \xi'(t) \quad (13.2)$$

$\xi(t), \xi'(t)$ - две некоррелированные случайные функции, имеющие нормальный закон распределения и среднюю равную нулю. Составим

$$y(t) = x(t) - x'(t) = \xi(t) - \xi'(t) \quad (13.3)$$

В силу теоремы о композиции случайных величин с нормальным законом распределения, $y(t)$ тоже будет случайной величиной с нормальным законом распределения и дисперсией $\sigma_y^2 = \sigma_\xi^2 + \sigma_{\xi'}^2$. Так как оператор экспоненциального сглаживания линеен

$$\begin{aligned} S_t(x) &= S_t(S) + S_t(\xi) \\ S_t(x') &= S_t(S) + S_t(\xi') \end{aligned} \quad (13.4)$$

$M[S_t(\xi)] = M[S_t(\xi')] = 0$. Повторяя операцию сглаживания, согласно теореме 3, получим:

$$S_t^k(x) = S_t^k(x') = S_t^k(S) \quad (13.5)$$

т.е., по мере повторения операции сглаживания, σ_y^2 будет стремиться к нулю. Это обстоятельство и используется при определении оптимального α . Поиск α , доставляющий минимум σ_y^2 проводился по итерационному алгоритму Габора /18/. Задав три произвольных значения α , определяем соответствующие им σ_y^2 . Единственное ограничение.

накладываемое на α , таково, чтобы соответствующие C_y^2 не были расположены в порядке убывания или в порядке возрастания, в противном случае итерационный процесс — расходящийся. Через три точки $C_{y_1}^2, C_{y_2}^2, C_{y_3}^2$ проводим параболу и находим положение минимума:

$$C_y^2 = a_0 + a_1 \alpha + a_2 \alpha^2$$

$$\frac{\partial C_y^2}{\partial \alpha} = 0 \text{ или } \alpha_{opt} = -\frac{1}{2} \frac{a_1}{a_2} \quad (13.6)$$

Значения коэффициентов параболы определялись из уравнений параболы, составленных для трех исходных точек.

$$C_{y_1}^2 = a_0 + a_1 \alpha_1 + a_2 \alpha_1^2$$

$$C_{y_2}^2 = a_0 + a_1 \alpha_2 + a_2 \alpha_2^2$$

$$C_{y_3}^2 = a_0 + a_1 \alpha_3 + a_2 \alpha_3^2$$

(13.7)

В результате было получено соотношение для нахождения оптимального значения α_{opt} :

$$\alpha_{opt} = -\frac{1}{2} \frac{C_{y_1}^2(\alpha_2^2 - \alpha_3^2) + C_{y_2}^2(\alpha_3^2 - \alpha_1^2) + C_{y_3}^2(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)}{C_{y_1}^2(\alpha_3 - \alpha_2) + C_{y_2}^2(\alpha_1 - \alpha_3) + C_{y_3}^2(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (13.8)$$

Далее определение минимального C_y^2 сводится к последовательности итераций:

- а) задаются начальные значения α и вычисляются значения $C_{y_1}^2, C_{y_2}^2, C_{y_3}^2$.
- б) по этим значениям, используя формулу (13.8), находим α_{opt} .
- в) по α_{opt} вычисляем $C_{y_{opt}}^2$ и сравниваем его с $C_{y_i}^2$, $i = 1, 2, 3$, заменяем $C_{y_i}^2$ на $C_{y_{opt}}$ так, чтобы не нарушалось условие сходимости процесса.

Затем вычисления повторяются с пункта а), пока ошибка не стабилизируется на каком-то значении. Для машины "Днепр-1" была составлена программа, реализующая

этот итерационный алгоритм. Проводилось многократное сглаживание, причем на каждом шаге оптимальное α искалось вышеописанным способом. Ниже приведена таблица 10-кратного сглаживания.

В первом столбце три исходных значения α и соответствующие им дисперсии, в третьем столбце $\alpha_{\text{опт}}$ вычислялось по формуле (13.8).

Сглаживание проводилось с α , найденным уже на первом шаге, ибо уже на втором, третьем шагах ошибка стабилизировалась, а различие в α было лишь в третьем знаке. Исходная дисперсия была равна 8.00.

1 сглаживание:

$\alpha_1 = 0.01$	$\sigma_{y_1} = 7.64$	
$\alpha_2 = 1.1$	$\sigma_{y_2} = 4.56$	$\alpha_{\text{опт}} = 1.54$
$\alpha_3 = 2.1$	$\sigma_{y_3} = 4.76$	$\sigma_{\text{опт}} = 4.3$

2 сглаживание:

$\alpha_1 = 0.01$	$\sigma_{y_1} = 3.83$	
$\alpha_2 = 1.1$	$\sigma_{y_2} = 3.03$	$\alpha_{\text{опт}} = 1.50$
$\alpha_3 = 2.1$	$\sigma_{y_3} = 3.12$	$\sigma_{\text{опт}} = 3.00$

3 сглаживание:

$\alpha_1 = 0.01$	$\sigma_{y_1} = 3.42$	
$\alpha_2 = 1.1$	$\sigma_{y_2} = 2.81$	$\alpha_{\text{опт}} = 1.46$
$\alpha_3 = 2.1$	$\sigma_{y_3} = 2.91$	$\sigma_{\text{опт}} = 2.76$

4 сглаживание:

$\alpha_1 = 0.01$	$\sigma_{y_1} = 3.20$	
$\alpha_2 = 1.1$	$\sigma_{y_2} = 2.67$	$\alpha_{\text{опт}} = 1.43$
$\alpha_3 = 2.1$	$\sigma_{y_3} = 2.77$	$\sigma_{\text{опт}} = 2.65$

5 сглаживание:

$\alpha_1 = 0.01$	$\sigma_{y_1} = 3.09$	
$\alpha_2 = 1.1$	$\sigma_{y_2} = 2.54$	$\alpha_{\text{опт}} = 1.40$
$\alpha_3 = 2.1$	$\sigma_{y_3} = 2.67$	$\sigma_{\text{опт}} = 2.50$

7 сглаживание:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0.01 & \sigma_{y1} = 2.93 & \\ \alpha_2 = 1.1 & \sigma_{y2} = 2.45 & \alpha_{\text{опт}} = 1.39 \\ \alpha_3 = 2.1 & \sigma_{y3} = 2.57 & \sigma_{\text{опт}} = 2.42 \end{array}$$

10 сглаживание:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0.01 & \sigma_{y1} = 2.97 & \\ \alpha_2 = 1.1 & \sigma_{y2} = 2.38 & \alpha_{\text{опт}} = 1.19 \\ \alpha_3 = 2.1 & \sigma_{y3} = 2.42 & \sigma_{\text{опт}} = 2.34 \end{array}$$

Таким образом, отношение дисперсии до сглаживания к дисперсии после сглаживания получилось равным 3,4.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Уиттекер Э., Робинсон Г., Математическая обработка результатов наблюдений. 1933.
2. Линник Ю.В., Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений, ФМ, 1962.
3. Ланцош К., Практические методы прикладного анализа, ФМ 1961.
4. Пуначев В.С., Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления, ФМ 1962.
5. Хемминг Р.В., Численные методы, Наука 1968.
6. Зигмунд А., Тригонометрические ряды. Мир 1965, т.1.
7. Перов В.П., Статистический синтез импульсных систем, изд-во Советское радио 1959.
8. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А., Теория вероятностей, "Наука" 1967.

9. Brown R.G., Smoothing, Forecasting, Prediction of Discrete Time Series, Prentice Hall, cenc 1963.
10. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental Theorem of exponential Smoothing, Operat. Res. v.9 N 5, 1961.
11. D'Esopo P.A., A simple proof of a theorem in exponential smoothing, Operat. Reseach. v.11 N 3, 1963.
12. Rhodes E.C. Smoothing, N VI Tracts for computers, edited by J. Pearson, Camb. Univ. Press 1921.
13. Savitzky A., Golay M., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, Analytical Chemistry, v.36, N 5, 1964.
14. Morris R.H., Glassey C.R., The Dynamics and Statistics of Exponential Smoothing Operators, Oper. Res. v 11, N 4, 1963.
15. Levine N.A., A New Technique for Increasing the Flexibility of Recursive Least Squares Data Smoothing Bell System Techn. N 3 1961.
16. Jursik I., USA Journal, December 1966 NT-12.
17. Худсон Д., Статистика для физиков, Мир 1967.
18. Ивахненко А.Г., Лапа В.Г. Кибернетические предсказывающие устройства, Киев 1965.
19. Ахиезер Н.И., Лекции по теории аппроксимации. ФМ 1965.
20. Градштейн И.С., Рыжик И.М., Таблица интегралов, сумм, рядов и произведений, ФМ 1963.
21. Канторович Л.К., О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдения, Сибирский математический журнал, т. III, № 5, 1962.
22. Поляк Ю.Г., О сглаживании шумов и случайных погрешностей измерений, ограниченных по амплитуде, Радиотехника т. 21, № 12, 1966.

23. Holt C.O., Forecasting Seasonce and Trends by Exponentially Weighted Moving Averages. 1957, Carnegu Inst. of Technology, Pittsburgh.
24. Taylor G.I., A simple Graphical Method of Exponential Smoothing with a Linear Trend, Operational Research Quarterly, v.18, N 1.
25. Волошин Г.А., Гади Т.Н., Исследование параболических методов выравнивания (сглаживания) результатов наблюдений, Автометрия, № 1, 1968.
26. Зенков В.В., Сравнение дискретных и непрерывных фильтров, Автоматика и телемеханика № 8, 1967.
27. Клепиков И.П., Соколов С.Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия. "Наука" 1964 г.
28. Коршунов Ю.М., Бобиков А.И., Цифровые сглаживающие и преобразующие системы. "Энергия" 1969 г.
29. Кузьмина Л.М., Кибернетизация научного эксперимента, Рига, 1968, § 3.1, § 3.2.
30. Кузьмина Л.М., Сглаживание измерительной информации. Вычислительные системы, Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам, выпуск 6, Новосибирск, 1968.
31. Кузьмин С.З., Цифровая обработка радиолокационной информации; 1967 г., "Советское радио".
32. Фихтенгольц Г.М., Курс дифференциального и интегрального исчисления, ФМ, 1959 г., т.2.
33. Математический практикум под редакцией Положего Г.Н. Ф.М., Москва, 1960.

А. Бернуп

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УВМ "ДНЕПР-1"
ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУМЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАМИ**

Как известно, в научно-исследовательских системах экспериментирования все чаще применяются управляющие вычислительные машины (УВМ). Однако быстродействие управляемых комплексов не всегда согласуется с быстродействием машин. В связи с этим в научно-исследовательских центрах может оказаться возможным использовать УВМ для одновременного управления несколькими экспериментами /5, 18/. Это значит, что машина должна осуществлять два или более независимых процесса управления принадлежащих разным пользователям. Одновременно должна решаться задача разделения машинного времени.

В вычислительных системах такие функции обычно осуществляются с помощью диспетчеров, организованных на базе технических и программных средств /6/. В данном случае рассматриваются возможности построения двухканальной научно-исследовательской системы /НИС/ на базе машины "Днепр-1" для управления экспериментами в области физики твердого тела (рис. 1). При этом вопросы распределения машинной памяти не рассматриваются. Как будет показано дальше, диспетчер такой системы должен соответствовать некоторым специальным требованиям.

Каждая НИС экспериментирования осуществляет следующие функции /22/:

1. Формирование и выдача управляющей информации на исполнительные устройства.
2. Сбор измерительной информации и ее математическая обработка.

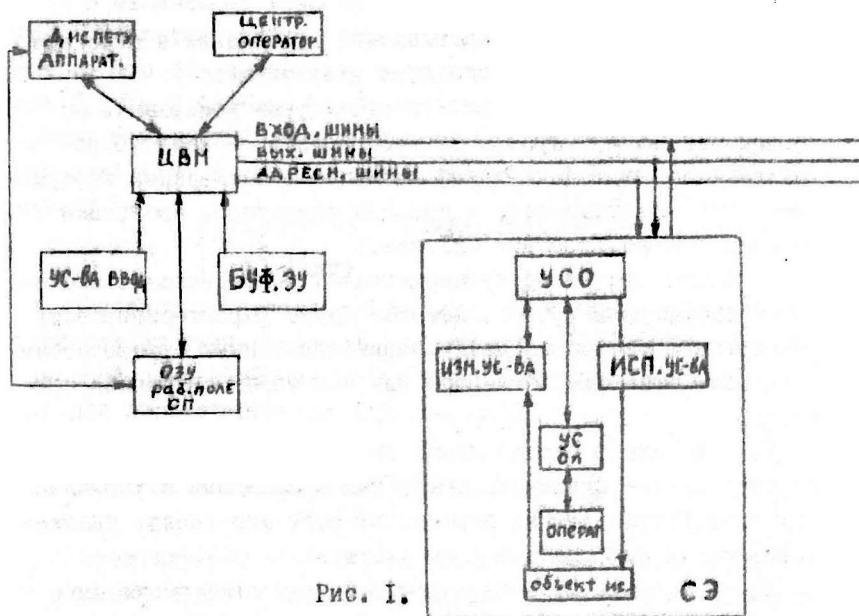


Рис. 1.

3. Опрос функциональных состояний агрегатов системы.

4. Связь экспериментатора с машиной.

При выборе принципов диспетчеризации процессов управления физическим экспериментом необходимо учесть агрегативную структуру НИС. Если через n обозначать число агрегатов в НИС, а через Z_i - субпроцесс в i -том агрегате, то процесс эксперимента можно записать в виде n -мерного вектора:

$$Z = Z(Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$$

через Z_0 обозначим субпроцесс в самой УВМ, а компонентами $Z_1 \div Z_n$ процессы исполнительных и измерительных агрегатах системы. Кроме того учтем, что в связи с работой в реальном масштабе времени Z и его компоненты обладают кусочно-линейными свойствами [1]. Это значит, что после получения исходной информации отдельный субпроцесс Z_i должен в соответствующем агрегате происходить автономно и без прерывания. С линейным истечением времени уменьша-

ется и количество перерабатываемой информации в агрегате и в некоторый момент subprocess заканчивается.

Чтобы i -тый агрегат мог снова функционировать по линейному закону, требуется восстановить в нем subprocess Z_i путем выдачи новой дозы перерабатываемой информации. Это осуществляется с помощью оператора, программы УВМ или некоторого агрегата системы.

Каждое состояние subprocess Z_i можно описать множеством параметров $\{\beta_i\}$, которые будут характеризовать временные соотношения между взаимосвязанными subprocessами.

Ниже приводим параметры для некоторых состояний процесса.

β_1 - параметр определяющий время, в течение которого агрегат должен функционировать без прерывания и управляющих воздействий других агрегатов, если его память снабжена управляющей информацией и он запущен.

β_2 - параметр характеризующий максимально допустимую задержку subprocessа в режиме ожидания перерабатываемой информации.

β_3 - параметр определяющий время, на которое допускается прерывать subprocess протекающий по линейному закону во времени.

β_4 - параметр фиксирующий время, на которое обязательно требуется затормозить subprocess Z_i , если информация перерабатываемая им исчерпана. Задача диспетчера заключается в организации двух параллельных процессов:

$Z_a = (Z_{0a}, Z_{1a}, \dots, Z_{na})$ и $Z_b = (Z_{0b}, Z_{1b}, \dots, Z_{nb})$ организованных в соответствующих НИС обслуживаемых одной УВМ.

Если процесс самой диспетчеризации обозначать через Z_g , то весь процесс в НИС (рис. 1) запишется в виде

$$Z_n = (Z_a, Z_b, Z_g)$$

В отличие от вычислительных систем /4,8,II/, особенность диспетчирования процессов в НИС заключается именно в том, что без применения и строгого соблюдения параметров β_1, β_4 в системе могут возникнуть аварийные ситуации. Пример такого случая субпроцесса Z_5 задан системой управлений (I), в которой параметры β_{a1} и β_{a3} относятся к каналу "а".

$$\begin{cases} \beta_{a1} > \min(\beta_{\delta 2}, \beta_{\delta 3}) \\ \beta_{a3} = 0 \end{cases} \quad (I)$$

Рассмотрим основные принципы, по которым обычно строятся системы разделения машинного времени. Одновременно обратим внимание на характер информации, используемой для диспетчеризации субпроцессов.

I. Синхронное обслуживание по кругу

/4,7,8/

Этот вариант часто применяется в мощных УВМ, в процессе решения задач и отладки программ. В системе применяется специальный счетчик, который через фиксированные интервалы времени вырабатывает сигнал прерывания текущей программы. Диспетчер анализирует состояние системы и в порядке очереди передает процессу следующему, к работе готовому, заказчику.

На рис. 2 показана временная диаграмма такого режима для случая двух пользователей.

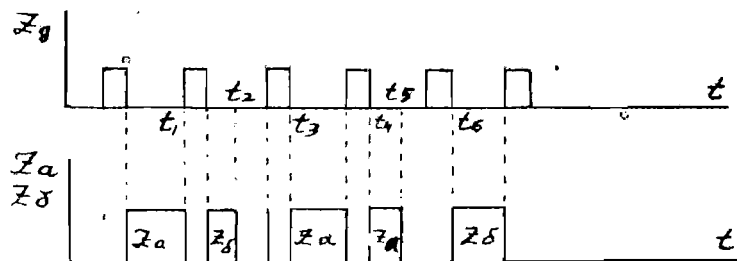


Рис. 2.

Z_a и Z_b - субпроцессы соответствующих каналов в машине.

Z_g - субпроцесс диспетчера.

Интервал $t_1 + t_3$ оператор канала "а" может использовать для оценки промежуточных результатов. Оператор канала "б" для той же цели имеет интервал $t_2 + t_6$. Предполагается, что в момент t_4 субпроцесс Z_b запускать не требовалось. Частота запуска диспетчера должна выбираться на основе априорной информации о максимальных значениях параметров $\beta_1 + \beta_4$ субпроцессов обеих систем.

В связи с синхронным принципом функционирования диспетчер в интервалах t_2, t_3, t_5, t_6 не может передать машину следующему каналу, что является серьезным недостатком системы.

Кроме того эта система разделения машинного времени допускает ситуацию, заданную уравнениями (I). Это резко ограничивает возможности ее применения в НИС.

П. Системы разделения времени с фиксированными приоритетами /35,9,10,11,17/

В этом случае программы низшего приоритета обслуживаются только при условии, что очередь высшего приоритета пуста. Приоритеты в таких системах присваиваются на основе априорной информации о предполагаемом режиме работы программы и необходимых технических ресурсов. В вычислительных системах старший приоритет получают алгоритмы, требующие малое время обслуживания /10/. Иногда этот вопрос решается путем специальных измерений статистических параметров субпроцессов /12/.

Фиксированные приоритеты применяются также в диспетчерах с повторяющимися циклами /2/. В таких системах предполагается, что алгоритм каждого рабочего процесса имеет циклический характер с максимальной длительностью T . Программа каждого канала разбивается по форматам /13/, которым присваиваются приоритеты, т.е. частота повторения в интервале T .

На рис. 3 приведена временная диаграмма двухканальной системы. Через $Z_{i\alpha}$ и $Z_{i\delta}$ обозначены программы двух форматов; i - номер канала. T_α, T_δ - периоды повторения соответствующих форматов.

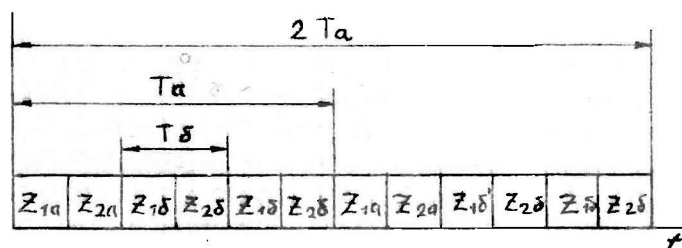


Рис. 3.

Низший приоритет обычно присваивается редко повторяющимся программам ($Z_{i\alpha}$). Формату $Z_{i\delta}$ соответствует основной процесс канала.

Рассмотренная методика преобразует фактическую ЦВМ в множество "виртуальных" машин с разным быстродействием. Однако термин "быстродействие" здесь должен пониматься в интегральном смысле за период T .

Указанный вариант нельзя применить, если система строится на УВМ, не имеющей буферную память для ввода и вывода информации на перфоленту (Днепр-1). В этом случае может возникнуть ситуация неравенствами (I), если параметр β_1 субпроцесса $Z_{i\alpha}$ (ввод с перфоленты) больше $0.5T_\delta$

$$\beta_1(Z_{i\alpha}) > 0.5T_\delta$$

Ситуация могла не возникать, если бы оперативная память машины имела несколько автономных входных каналов (Днепр-2I).

III. Система разделения времени с динамическими приоритетами

Так же как и в предыдущем варианте структура программы имеет несколько степеней иерархии (рис. 3). Отличие зак-

лючается в том, что приоритеты задачам присваивает сама машина во время выполнения диспетчерской программы. Это возможно, если машина обслуживает несколько вычислительных программ, для которых параметры типа β_2, β_3 не очень существенны.

Приоритеты присваиваются субпроцессами в зависимости от текущего состояния системы, а иногда даже в результате анализа его изменений /8/. При этом каждая задача задается вместе с так называемым паспортом, который может содержать следующие параметры: предполагаемое время решения, интенсивность загрузки устройств ввода-вывода, требуемый объем памяти, степень готовности задачи к решению /4, II, I4/.

Входной поток вычислительной системы образуется из задач, решаемых для разных пользователей, причем машина имеет возможность выбирать число одновременно решаемых задач /8/. Диспетчеризация процессов управления упомянутой НИС не допускает вероятностный подход к решению проблемы. Кроме того серьезные трудности появляются при обеспечении диспетчера информацией о параметрах выполняемых субпроцессов.

IV. Диспетчер, управляемый текущими состояниями системы /3, II, I5/

Известно, что для решения задачи динамического распределения памяти обычно применяют так называемые управляющие слова /16/, в которых задаются параметры запоминаемых массивов. Они могут быть применены и для указания временных параметров субпроцессов Z_i /3, I5/.

Диспетчер должен сопоставить требования субпроцессов с динамическими состояниями системы и на основе анализа параметров $\beta_i \div \beta_n$ запустить тот субпроцесс, который находится в состоянии готовности. Учет параметров $\{\beta_i\}$ не допустит ситуации заданной неравенствами (I), однако некоторые затруднения могут появиться при программировании.

Обычно предполагается, что программы имеют блочную структуру, а каждый блок начинается управляющим словом и соответствует субпроцессу Z_r .

Чтобы указать частоту повторения управляющих слов в программе, введем понятие ранга j субпроцесса Z_{rj} , который запишем в виде индекса при параметре β_1 . Если β_{1j} по-прежнему будет указывать на длительность непрерываемых кусочно-линейных субпроцессов в блоке программы, то ранг j применим для указания максимальной длительности t_0 таких частей Z_{rj} , перед выполнением которых в программе обязательно должно быть поставлено управляющее слово. С помощью параметров β_2 и β_3 в ней будет указано допустимое время прерывания.

Для конкретной реализации введено четыре ранга со следующими допустимыми длительностями субпроцессов:

$j = 3$	-	$t_0 = 30000$ мсек,
$j = 2$	-	$t_0 = 1000$ мсек,
$j = 1$	-	$t_0 = 50$ мсек,
$j = 0$	-	$t_0 =$ без ограничений.

Таким образом свободно выбранный основной блок Z_{rj} программы будет иметь следующую иерархическую структуру:

$$Z_{r1} \subset Z_{r2} \subset Z_{r3} \subset Z_{r0}$$

Каждый из указанных элементов программы будет характеризоваться параметрами $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$. Применение управляющих слов обеспечивает асинхронный принцип запуска диспетчера. Однако для уменьшения числа управляющих слов в программе целесообразно организовать частично синхронное управление диспетчером. По этой причине длительность кусочно-линейных субпроцессов ($j = 1$) выбрана такой, чтобы за время $t_0 = 50$ мсек в НИС не могли образоваться аварийные ситуации. В таком случае запуск диспетчера перед субпроцессами Z_{r1} , можно осуществлять синхронно, с помощью специального счетчика времени, который подключен к прерывателю программы. Количество управляющих слов уменьшится в $n = \frac{30000}{50} = 600$ раз.

Введение системы разделения времени предполагает следующие режимы работы машины:

1. Одновременная работа управляющей и независимой вычислительной программы.
2. Реализация двух вычислительных программ.
3. Одновременное выполнение двух управляющих программ.
4. Работа машины в одноканальном режиме с программой любого типа.
5. Дежурный режим диспетчера при включенных обоих каналах.

В зависимости от параметров все субпроцессы в машине разделены на следующие классы:

Субпроцессы типа P_0 , которые задаем параметрами:

$$\beta_{11} = 50 \text{ мсек,}$$

$$\beta_2 = \beta_3 = 15000 \text{ мсек,}$$

$$\beta_4 = (0, 1, 2; \dots; 30000) \text{ мсек.}$$

Субпроцессы типа P_1 :

$$\beta_{11} = 50 \text{ мсек,}$$

$$\beta_2 = 50 \text{ мсек,}$$

$$\beta_3 = 0 \text{ мсек,}$$

$$\beta_4 = (1, 2; \dots; 50) \text{ мсек.}$$

Субпроцессы типа P_2 :

$$\beta_{12} = \beta_3 = 50 \text{ мсек.}$$

$$\beta_2 = 500 \text{ мсек,}$$

$$\beta_4 = (1, 2; \dots; 1000) \text{ мсек.}$$

Субпроцессы типа P_3 :

$$\beta_{13} = \beta_3 = 50 \text{ мсек,}$$

$$\beta_2 = 15000 \text{ мсек,}$$

$$\beta_4 = (1, 2; \dots; 30.000) \text{ мсек.}$$

Субпроцессы типа P_4 , которые в основном предусмотрены для работы с магнитным барабаном:

$$\beta_{10} = 500 \text{ мсек,}$$

$$\beta_2 = 2000 \text{ мсек,}$$

$$\beta_3 = \beta_4 = 0.$$

Субпроцессы типа P_5 для ввода информации с перфоленты:

$$\beta_{10} = 15000 \text{ мсек,}$$

$$\beta_2 = 60000 \text{ мсек,}$$

$$\beta_3 = \beta_4 = 0.$$

Для всех субпроцессов здесь заданы максимально допустимые значения параметров.

На базе рассмотренного набора субпроцессов можно организовать программы двух типов: процессы $\{P_0, P_4, P_5\}$ могут образовать программы чисто вычислительного характера, а также применяться во всех случаях, когда временные параметры субпроцессов определить очень трудно. Такие программы будут прерываться через каждые 50 мсек на время $50 + 15000$ мсек, если только соседний канал в этом будет нуждаться.

Набор субпроцессов $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$ позволяет организовать программы детерминированного характера в пределах параметров соответствующих $\{P_i\}$. Для этого потребуем, чтобы программа рассматриваемого канала была разделена на блоки типа P_3 (рис. 4). Структурными элементами P_3 в свою очередь будет P_2 и P_5 . Соответственно $P_1 \subset P_2$, а также $P_4 \subset P_2$. Рассмотрим подробнее этот класс программ.

Чтобы был учтен параметр β_2 каждого ожидающего субпроцесса, максимальная длительность t_0 любого активного субпроцесса в соседнем канале должна соответствовать требованию ранга: $t_0 \leq \text{const}$. Для субпроцессов типа P_1 это обеспечивается с помощью синхронного счетчика времени. Однако P_1 может быть закончен и раньше, если внутри интервала $t_0 = 50$ мсек осуществляется одно из состояний системы:

- а) начало выдержки времени с параметром β_4 между двумя операциями с внешними агрегатами;
- б) заказ субпроцесса P_4 или P_5 ;

Для режима с набором $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$ в конструкции диспетчера предусмотрены некоторые меры предосторожности. Так, если программист ошибается и не соблюдает условия на длительность P_2 или P_3 , то соответствующая программа прерывается, выполняется запрос соседнего канала и только потом продолжается работа неправильно составленной программы. Ее оператор оповещается об этом.

Чтобы описать алгоритм функционирования системы разделения времени введены следующие обозначения:

- a_j : - состояние НИС, в котором программа j -того канала сообщила диспетчеру о необходимости осуществлять субпроцесс типа i ($i = P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$);
 - C_j : - состояние j -того канала, в котором не требуется выдержка времени перед выполнением следующего субпроцесса;
 - V_j : - состояние, в котором оператор j -того канала требует обслуживания его телетайпа;
 - R_j : - состояние, в котором запрещена программа j -того канала;
 - d_j : - состояние, в котором УВМ передана j -тому каналу;
 - K_j : - события, соответствующие передаче машин j -тому каналу;
- События, вызывающие запуск диспетчера:
- L_j : - обращение программы j -того канала к диспетчеру для осуществления останова, выдержки времени или смен типа субпроцесса;
 - S : - запуск диспетчера с помощью синхронного счетчика времени;
 - B_j : - запуск диспетчера после окончания субпроцессов типа P_4 или P_5 в j -том канале;
 - R_j : - закичивание диспетчера, в связи с отсутствием разрешения на субпроцесс j -того канала.

Введем следующие обозначения моментов времени:

$(t-1)$ - момент перед запуском диспетчера,

t - запуск диспетчера,

$(t+1)$ - момент входа машины в рабочую программу.

Алгоритм диспетчера в этом случае может быть задан помощью логических управлений.

I. Режим с набором субпроцессов $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$ в обоих каналах

$$K_2(t+1) = S(t) h_2(t-1) d_1(t-1) \{ b_2(t-1) \vee c_2(t-1) \cdot [a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee a_{23}(t-1)] \} \quad (1)$$

$$K_2(t+1) = L_1(t-1) h_2(t-1) \{ a_{24}(t-1) [a_{12}(t) \vee a_{13}(t) \vee a_{14}(t) \vee a_{15}(t)] \vee a_{25}(t-1) [a_{13}(t) \vee a_{15}(t)] \} \quad (2)$$

$$K_2(t+1) = L_2(t) [a_{21}(t) \vee a_{22}(t) \bar{a}_{14}(t-1) \vee a_{23}(t) \bar{a}_{14}(t-1) \cdot \bar{a}_{15}(t-1)] c_2(t-1) \quad (3)$$

$$K_2(t+1) = B_1(t) h_2(t-1) d_1(t-1) \{ a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee a_{23}(t-1) \} c_2(t-1) \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) \vee a_{15}(t-1) \vee b_2(t-1) \} \quad (4)$$

$$K_2(t+1) = R_1(t) h_2(t-1) \{ b_2(t-1) \vee [a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee a_{23}(t-1)] c_2(t-1) \vee a_{24}(t-1) [a_{12}(t-1) \vee a_{13}(t-1) \vee a_{15}(t-1)] \vee a_{25}(t-1) a_{13}(t-1) \} \quad (5)$$

Выражения для передачи машины первому каналу можно получить по аналогии с управлениями (I+5).

II. Режим с набором субпроцессов $\{P_0, P_4, P_5\}$ в обоих каналах

$$K_2(t+1) = S(t) h_2(t-1) d_1(t-1) \{ c_2(t-1) a_{20}(t-1) \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) [a_{10}(t-1) \vee a_{15}(t-1)] \vee b_2(t-1) \} \quad (6)$$

$$K_2(t+1) = L_1(t) h_2(t-1) \{ a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) [a_{10}(t) \vee a_{15}(t)] \} \quad (7)$$

$$K_2(t+1) = L_2(t) a_{20}(t) C_2(t-1) \bar{a}_{14}(t-1) \bar{a}_{15}(t-1) \quad (8)$$

$$K_2(t+1) = B_1(t) h_2(t-1) d_1(t-1) [b_2(t-1) \vee a_{20}(t-1) \cdot c_2(t-1) \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) a_{15}(t-1)] \quad (9)$$

$$K_2(t+1) = R_1(t) h_2(t-1) \{ b_2(t-1) \vee a_{20}(t-1) c_2(t-1) \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) [a_{10}(t-1) \vee a_{15}(t-1)] \} \quad (10)$$

III. Режим с набором субпроцессов $\{P_0, P_4, P_5\}$
 в первом канале и $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$
 во втором канале

$$K_2(t+1) = S(t) h_2(t-1) d_1(t-1) \{ b_2(t-1) \vee c_2(t-1) [a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee a_{23}(t-1)] \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) [a_{10}(t-1) \vee a_{15}(t-1)] \} \quad (11)$$

Для событий L_1 , L_2 и B_1 в этом режиме соответствующего управления 7, 3, 4.

$$K_2(t+1) = R_1(t) h_2(t-1) \{ b_2(t-1) \vee c_2(t-1) [a_{21}(t-1) \vee a_{23}(t-1)] \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) [a_{10}(t-1) \vee a_{15}(t-1)] \} \quad (12)$$

Запуск первого канала осуществляется при следующих условиях:

$$K_1(t+1) = S(t) h_1(t-1) d_2(t-1) [b_1(t-1) \vee a_{10}(t-1) \cdot c_1(t-1)] \quad (13)$$

$$K_1(t+1) = L_2(t) h_1(t-1) \{ a_{14}(t-1) [a_{22}(t) \vee a_{23}(t) \vee a_{24}(t) \vee a_{25}(t)] \vee a_{15}(t-1) [a_{24}(t) \vee a_{25}(t)] \} \quad (14)$$

$$K_1(t+1) = L_1(t) a_{10}(t) \bar{a}_{24}(t-1) \bar{a}_{25}(t-1) c_1(t-1) \quad (15)$$

$$K_1(t+1) = B_2(t) h_1(t-1) d_2(t-1) [c_1(t-1) a_{10}(t-1) \vee a_{14}(t-1) \vee a_{15}(t-1) a_{25}(t-1) \vee b_1(t-1)] \quad (16)$$

$$K_1(t+1) = R_1(t) h_1(t-1) \{ \bar{b}_1(t-1) \vee c_1(t-1) a_{10}(t-1) \vee \\ \vee a_{14}(t-1) [a_{22}(t-1) \vee a_{23}(t-1) \vee a_{25}(t-1)] \vee \\ \vee a_{15}(t-1) a_{23}(t-1) \} \quad (17)$$

IV. Режим с выключенным первым каналом и
с любым набором субпроцессов во втором
канале

Диспетчер в этом режиме фиксирует в индикаторах первого канала состояние a_{10} . Алгоритм задается логическими выражениями:

$$K_1(t+1) = [S(t) \vee R_2(t)] h_2(t-1) \bar{b}_1(t-1). \quad (18)$$

$$K_2(t+1) = S(t) h_2(t-1) d_2(t-1) \bar{b}_1(t-1) \{ \bar{b}_2(t-1) \vee \\ \vee c_2(t-1) [a_{20}(t-1) \vee a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee \\ \vee a_{23}(t-1)] \vee a_{24}(t-1) \vee a_{25}(t-1) \} \quad (19)$$

$$K_2(t+1) = L_2(t) c_2(t-1) [a_{20}(t) \vee a_{21}(t) \vee \\ \vee a_{22}(t) \vee a_{23}(t)] \quad (20)$$

$$K_2(t+1) = R_1(t) h_2(t-1) \{ \bar{b}(t-1) \vee [a_{21}(t-1) \vee a_{22}(t-1) \vee \\ \vee a_{23}(t-1) \vee a_{20}(t-1)] c_2(t-1) \vee a_{24}(t-1) \vee \\ \vee a_{25}(t-1) \} \quad (21)$$

Выбранный алгоритм диспетчера реализован программным способом. Программа занимает 350 ячеек. Время срабатывания диспетчера $t_g \approx 2$ мсвк, что в среднем составляет 4% машинного времени "Днепр-Г".

Чтобы оценить эффективность эксплуатации системы, введены следующие обозначения:

- t_i - требуемое время эксплуатации машины для реализации алгоритма i -того канала в интервале T ;
- τ_i - необходимое время реализации алгоритма i -того канала на внешних агрегатах. В течение этого времени эксплуатация машины не требуется. В одноканальном режиме $T = \tau + t$.

$\tau_i' - \tau_i' = \frac{\tau_i}{q}$ 100 - относительное необходимое время автономной работы внешних агрегатов системы;

K - коэффициент эффективной загрузки машины;

T_g - период срабатывания диспетчера;

t_g - время одноразового срабатывания диспетчерской программы,

Введем отношение $\frac{\tau_i}{t_i} = q_i$ и найдем коэффициент эффективной загрузки машины в одноканальном режиме K_0 :

$$K_0 = \frac{t}{t + \tau} = \frac{t}{(1 + q)t} \quad (22)$$

В таком случае $\tau' = \frac{q}{1+q}$ 100%, что позволяет построить функцию $K_0 = f(\tau')$

В режиме, когда работает только первый канал с применением диспетчерской программы коэффициент загрузки машины:

$$K_1 = \frac{t_1}{\tau_1 + t_1 + t_g \cdot \frac{t_1}{T_g}}$$

В режиме двухканальной работы коэффициент загрузки машины можно найти по формуле

$$K_M = \frac{t_2 + \tau_2 K_1}{\tau_2 + t_2 + t_g \cdot \frac{t_2}{T_g}}$$

Если допустить, что $q_1 = q_2 = q$, последнее равенство принимает вид:

$$K_M = \frac{1 + 2q + \frac{t_g}{T_g}}{\left[\left(1 + \frac{t_g}{T_g} \right) + q \right]^2} \quad (23)$$

Обозначим через T_0 суммарное время, необходимое для реализации алгоритмов обоих каналов в режиме диспетчеризации

$$T_0 = (t_1 + t_2) \cdot \frac{1}{K_M}$$

Если принять, что $t_1 = t_2 = t$; $q_1 = q_2 = q$ и учесть, что в одноканальном режиме $T_0 = t(1+q)$, то получаем выражение:

$$T_0 = \frac{2T}{(1+q)K_M} \quad (3); \quad \frac{T_0}{T} = \frac{2}{(1+q)K_M} \quad (24)$$

Соотношение (24) показывает, во сколько раз увеличивается время реализации программы в режиме диспетчеризации, по сравнению с одноканальным режимом. Обозначим через K_{Ai} коэффициент загрузки измерительной и исполнительной аппаратуры i -того канала:

$$K_{Ai} = \frac{\tau_i}{T_D} = \frac{\tau(1+q)}{2\tau} \cdot K_M$$

Если положить $T = \tau + \frac{\tau}{q}$, то:

$$K_{Ai} = \frac{q}{2} K_M \quad (25)$$

Выражения (22), (23), (24), (25) могут представить интерес при анализе и поиске оптимальной структуры системы (рис. 5).

Критерием оптимальности соответствующих подсистем может служить количество и ценность информации, вырабатываемой в них. Однако, как отмечено в /19 + 21/, определить ценность информации возможно только в некоторых специальных случаях. Поэтому для оценки системы будем пользоваться стоимостью её агрегатов, условно предполагая, что цена прямо пропорциональна количеству и ценности информации, которую теоретически способен вырабатывать соответствующий узел.

Введем обозначения:

C_1 - стоимость аппаратуры первого канала,

C_2 - стоимость аппаратуры второго канала,

C_M - стоимость машины,

C - стоимость системы $C = C_1 + C_2 + C_M$,

Λ - коэффициент использования экономических средств.

$$\Lambda = \left(\frac{C_1}{C} K_{A1} + \frac{C_2}{C} K_{A2} + \frac{C_M}{C} K_M \right) \quad (26)$$

обозначим: $\frac{C_1}{C_M} = \sigma_1$; $\frac{C_2}{C_M} = \sigma_2$

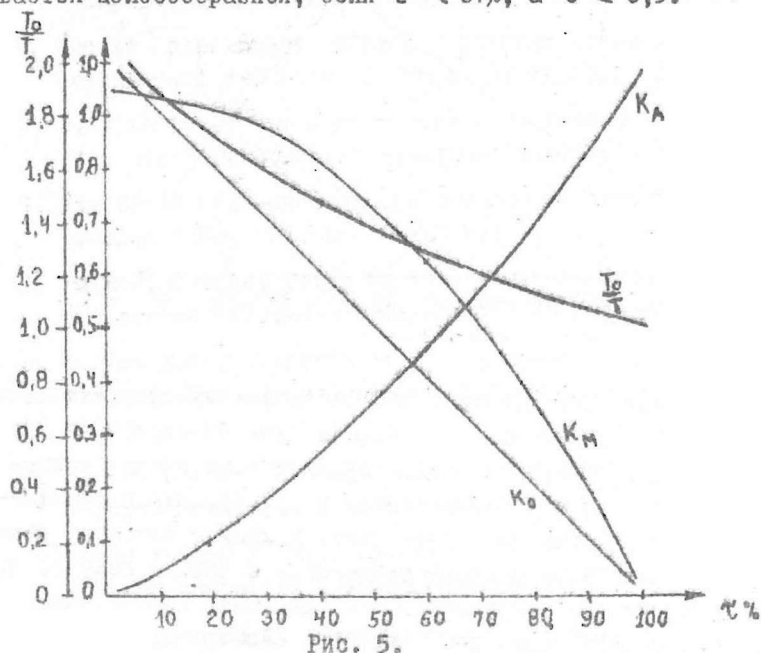
Преобразуя (26), находим:

$$\Lambda = K_M = \frac{q(\sigma_1 + \sigma_2) + 2}{(\sigma_1 + \sigma_2 + 1)2} = \frac{1 + 2q \cdot \frac{tg}{T_D}}{[(1 + \frac{tg}{T_D}) + q]^2} \cdot \frac{q(\sigma_1 + \sigma_2) + 2}{(\sigma_1 + \sigma_2 + 1)2}$$

На рис. 6 приведено семейство кривых функций $\Lambda = f(\sigma, \tau')$ при условии $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$

Если считать, что стоимость НИС известна, кривые рис. 6 позволяют определить на сколько изменится Λ , если использовать сумму ΔC для увеличения быстродействия автономных устройств (параметр τ) или время выполнения самой программы в машине t .

Централизация алгоритма эксперимента в машине оказывается целесообразной, если $\tau' < 67\%$, а $\sigma < 0,5$.



К децентрализации или увеличению роли автономных агрегатов в системе целесообразно стремиться, если $\tau' > 68\%$, а $\sigma > 0,5$.

Работа системы с коэффициентом $\Lambda > 0,55$ явно свидетельствует о неправильном распределении экономических средств в НИС.

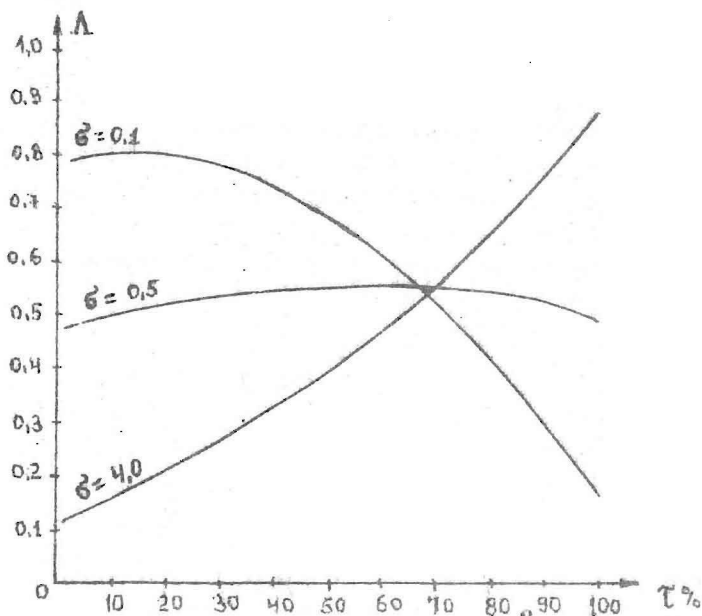


Рис. 6.

В заключении отметим, что проектируемая двухканальная НИС на базе усовершенствованной машины "Днепр-1" не позволяет решить такие проблемы как работа со специализированными языками программирования и организацию информационно-поисковых систем. Кроме того, в машине почти не решена задача динамического распределения и защиты памяти, что является крупным недостатком системы. Опыт разработки проекта диспетчера показывает, что его расширение для трех- и четырехканальной работы не является перспективным.

Отсюда следует вывод о целесообразности организовывать многоканальные комплексы НИС в области физики твердого тела типа "измерительный центр" на базе более мощной машины (см. стр. 28+32 настоящего сборника).

Л и т е р а т у р а

1. Н.П.Бусленко, Моделирование сложных систем, Наука, 1968 г.
2. Л.А.Маталин, Ж.Нараль Чубаров, Методы регистрации и обработки данных в ядерной физике и технике.
3. Ф.П.Брукс, Программно управляемая система прерывания программ. Кибернетический сборник № 2. 1961 г.
4. Проект Оперативной системы П очереди математического обеспечения УВС Днепр-2, Киев, ИК АН УССР, 1968 г.
5. T.Allan Prior and Hommer R.Warner, Time sharing in biomedical research. Datamation 1966. vol. 12 Nr. 4.
6. The first time-sharing generation is here. Elektronik Design 1968. vol. 16. 25/IV Nr. 9.
7. Pintel Nocola, Coben Daniel, Computer time sharing a review. "Computers and Automation", 1967 October.
8. Cofman E.G., Analysis of two time-sharing algorithms designed for limited swapping. J.Assoc.Comput. Mach. 1968 vol. 15 Nr. 3.
9. Laszlo Betyar, A>User-Oriented Time-Shared on-line System. Communications of ACM 1967 vol. Nr. 7.
10. Bauer Valter F. Hill Richard H. Economics of time-shared computing systems. Datamation 1967, 13, Nr.11.
11. Stevens David F., Communications of ACM 1968, 11, Nr. 8 on overcoming High-Priority Paralysis in Multi-programming Systems.
12. Allan L.Schirr, Time-sharing measurement, Datamation 1966 vol. 12 Nr. 4.
13. Kelly Viviah, Apex-a Programming System for On-line Process kontrol. Data process, 1967, Nr. 5.

14. G.Oppenheimer and N.Weizer, Reconice management for a Medium Scale Time-sharing Operating System. Communications of the ACM volume 11. Nr. 5, 1968.
15. Daniel L.Drew, The LACONIQ Monitor Time sharing; for On-line Dialogues. Communications of the ACM 1967 vol. 10, Nr. 12.
16. Jodsit Jane G., Storage organization in programming Systems. Communications of the ACM 1968 vol. 11 Nr.11.
17. Emanuel Katell, Real-Time Sharing In A Hybrid Mode. Data processing Magazin 1968 September.
18. H.U.Gladney, A.Simple Time-sharing Monitor System for Laboratory Automation. J.Computational Physics 1968, 2, Nr. 3.
19. Брилюэн Л., Наука и теория информации, Физматгиз, М.1960.
20. Харкевич А.А., О ценности информации. Проблемы кибернетики, 1960, вып. 4.
21. Бабич О.И., Определение ценности информации при передаче по каналу связи с запоминающим устройством.
22. "Кибернетизация научного эксперимента", ЛГУ им.П.Стучки, Рига, 1968 г.

С о д е р ж а н и е

	стр.
1. Ю. Кузьмин. Проблема автоматизации "мини-эксперимента".....	3
2. Ю. Кузьмин. О системном подходе и организации эксперимента.....	33
3. Ю. Кузьмин. Системный подход при разработке научно-исследовательской системы (НИС).....	44
4. Я. Страумен. Системное проектирование блока нагрева для НИС-Т.....	74
5. Л. Кузьмина. Исследование статистической и динамической ошибки линейных методов сглаживания.....	114
6. А. Бернуп. О возможности использования УВМ "Днепр-1" для одновременного управления двумя экспериментами.....	150

Коллектив авторов
КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ученые записки, том 144

Редактор Я. Цирулис

Корректор М. Гедэ

Подписано к печати 5/III 1971, лт 12226. Зак. № 420.
Ф/б 60x84/16. Писчая № I. физ. п. л. 10,3. Уч.-и. л. 8,3
Тираж 600 экз. 85 коп.

Отпечатано на ротапринтере. Рига - 50, бульвар Райня, 19
Латвийский государственный университет имени Петра Стучки

135534

LU bibliotēka



200022632

PT-75

144