

С345  
К-142

КАЗАНСКИЙ П.С.

Б2-9-4195

+

Б2-9-4195

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Г.С.КАЗАНСКИЙ

B2-9-4195

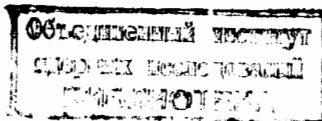
С 345

К-142

ВОПРОСЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ  
РЕГУЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРИМЕНЕНИИ К УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

с.р. 2342

12 декабря 68.



г. Дубна, 1968 г.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ.

В предыдущих обзорах, посвященных общему состоянию ускорительной техники и применению ЭВМ для обработки данных физического эксперимента, нами была показана необходимость в организации направления работ по созданию систем автоматического управления и оптимизации режимов для оперативной эксплуатации ускорительного комплекса оборудования, обеспечивающего проведение физического эксперимента. Создание автоматических, способных поддерживать оптимальный режим при изменяющихся в <sup>систем</sup> ~~состоянии~~ условиях и характеристиках объекта управления, является одной из ответственных задач, решаемых новым научным направлением - технической кибернетикой. Развитие этого направления науки открывает возможности для решения важнейших проблем в области авторегулирования многопараметрических систем и оптимизации управления физическими процессами.

Перспективность применения автоматической оптимизации управления (АОУ) для нужд ускорительной техники трудно переоценить. Процесс ускорения может быть представлен многопараметрическим неравномерным полем состояния регулируемого объекта (пучки заряженных частиц); Динамическая неравномерность поля состояния в данном случае определяется разрывной функцией управления в интервале времени существования объекта. Разрывность связана с временной дискретностью действия ряда параметров, определяющих состояние объекта. Неравномерность поля состояния будет усугубляться при многостадийности ускорения. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен при последующем изложении материала, но уже и это предварительное замечание указывает на важность использования научных достижений технической

кибернетики для нужд ускорительной техники.

Дадим некоторые определения.

Система автоматической оптимизации - самонастраивающаяся автоматическая система, осуществляющая поиск оптимальных режимов управления, обеспечивающих заданное состояние объекта регулирования и перестраивающая режимы управления в соответствии с найденным оптимальным решением. Эта система включает в себя систему авторегулирования и оптимизатор.

Система автоматического регулирования - система, осуществляющая поддержание постоянного значения регулируемой величины, либо изменение этой величины по определенному ( заданному программой) закону, Или по неизвестному заранее закону ( следующие системы).

Оптимизатор - устройство, обеспечивающее поиск оптимального режима управляемого объекта и поддержание режима на оптимальном уровне.

Автоматический поиск - включает в себя: а) процесс изменения состояния системы и б) процесс анализа результатов этого изменения.

Поисковое воздействие - опрос состояния системы.

Поле состояния -  $n$ -мерное пространство области регулирования.

В общем виде функциональная схема оптимизирующего устройства представлена на рис.1.

Существует три основных способа осуществления оптимальной настройки многопараметрических систем.

I. Способ ручного управления входами системы для достижения оптимального режима, определяющего заданное состояние объекта.

2. Способ с применением программных регуляторов, связывающих вход системы и некоторые переменные величины, которые зависят от входа и выхода.

3. Способ автоматической оптимизации, где оптимизатор служит в качестве обратной связи.

Коротко об этих способах.

Система ручного управления является, в сущности, замкнутой системой, в которой оператор в ходе процесса определяет оптимальные режимы и производит соответствующие изменения входных величин. Таким образом, оператор является как бы логическим элементом в цепи обратной связи замкнутой системы. Системы ручного управления являются медленнодействующими и ограничены субъективными ошибками оператора. Блок-схема такой системы приведена на рис. 2(а).

Программное управление сводит роль оператора к правильному заданию программы управления и внешнему контролю параметров. Блок-схема программно-управляемой системы представлена на рис. 2(б).

Наконец, при автоматической оптимизации предполагается полное "выключение" человека из процесса управления.

Блок-схема такой системы изображена на рис. 2(в).

Для автоматической оптимизации, прежде всего, необходимо, чтобы регулируемый объект обладал характеристиками с оптимальной точкой (экстремумом). В этом случае оптимальное решение ищется в окрестности этой точки при помощи поисковых заданий по входу и выходу регулируемого объекта. В связи с этим вводятся такие понятия как зона "отклика": "зона поиска входа" и "зоны поиска выхода", определяемые "амплитудой" поискового сигнала, которая пропорциональна чувствительности системы. Поскольку чувствительность системы есть отношение изменения выходной величины к

изменению входной, около некоторого заданного значения, то в окрестности экстремума "амплитуда" поиска и чувствительность системы стремятся к нулю по мере выхода в точку оптимума.

Системы, использующие информацию по сигналу пропорциональному чувствительности называются дифференциальными системами. Их существенный недостаток - подверженность влиянию в/ч - помех. Наибольшее распространение получили "системы с запоминанием экстремума". В этом случае для оптимизации используется сигнал пропорциональный отклонению выходного сигнала от его экстремального значения.

## 2. Некоторые теоретические соображения.

Рассматривая вопросы оптимизации режимов ускорительных устройств необходимо отметить следующие принципиальные особенности в построении функциональных схем оптимизаторов.

1) Поскольку объектом регулирования, в конечном итоге, является пучок ускоряемых или *выводимых* частиц, то, естественно, задание функции состояния осуществляется при помощи опосредствующего "индуктивного" влияния определённого множества параметров ускорителя и управляющих систем. Так например, одна из главных характеристик ускорителя - интенсивность ускоряемых частиц ( $\underline{J}$ ) является по своему характеру параметрической функцией насыщения. Иными словами, максимальная интенсивность пучка ускоряемых частиц определяется оптимальными функциональными связями определённого множества параметров и ограничена, в принципе, такими экстремальными функциями как: максимальный ток источника ( $\underline{I_{\text{ф, макс}}}$ ), коэффициенты переходных режимов ( $\underline{\eta_{1,2,3}}$ ), кулоновское взаимодействие, геометрический и магнитный объём области накопления заряда.

Если считать, что время существования заданного состояния объекта

определяется интервалом, измеряемым началом инъекции ( $\bar{t}_{02}$ ) и моментом использования состояния объекта  $\bar{t}_m$ , то, как нетрудно показать, в этом интервале поле состояния объекта неравномерно и определяется чередующимся параметрическим сопровождением. Такое многопараметрическое состояние регулируемого объекта довольно наглядно показывает сложность задачи, стоящей перед системами автоматической оптимизации режимов обеспечения физического эксперимента.

2) Особенностью является и то, что конечное состояние объекта регулирования определяется функцией предистории, которая запоминается объектом до момента использования его конечного состояния.

3) Наконец, взаимозависимость текущих параметров в течение времени существования объекта регулирования, требует создания параллельных ветвей оптимизации.

Прежде чем решать задачу оптимизации в комплексе, рассмотрим несколько упрощенных примеров, которые впоследствии нетрудно будет распространить на более сложные теоретические и практические построения.

Для начала будем рассматривать объект регулирования, состояние которого задается определенной суммой начальных условий и одним регулируемым входом. В экстремальных системах характеристика объекта может быть всегда представлена параболической функцией. Оптимальное значение функции состояния, видимо, будет определяться вершиной параболы, расположенной в зонах непрерывного поиска по входу и по выходу. Оптимум выявляется последовательным прохождением вершины параболы справа и слева в окрестности зоны поиска. В окрестности точки оптимума изменение амплитуды поискового сигнала в ту и другую сторону должно вызывать уменьшение (либо увеличение) амплитуды выхода (см. рис.3).

Введем понятие рабочей и оптимальной точки.

Точка характеристики, соответствующая входу входного задатчика называется рабочей точкой.

Оптимальная точка на кривой характеристики объекта, соответствует максимальному, или минимальному значению выхода.

В общем случае рабочая точка может не совпадать с точкой оптимума, так как последний может определяться несколькими задатчиками состояния.

Если оптимальная и рабочая точка не совпадают, или, если рассмотрение состояния объекта идет относительно произвольной точки, то полезно условиться относительно выбора системы координат. Используя таблицу I (см. рис.3) можно записать следующие уравнения преобразования:

$$\dot{Y} = \Delta \dot{Y}_{рад} + \dot{Y}_{опт}; \quad \dot{X} = \Delta \dot{X}_{опт} + \dot{X}_{опт} \quad (1)$$

$$\dot{Y} = \Delta \dot{Y}_{рад} + \dot{Y}_{рад}; \quad \dot{X} = \Delta \dot{X}_{рад} + \dot{X}_{рад} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{Y}_{опт} = \Delta \dot{Y}_{рад} + \Delta \dot{Y}_{рад.опт} = \Delta \dot{Y}_{рад} - \Delta \dot{Y}_{опт.рад} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{X}_{опт} = \Delta \dot{X}_{рад} + \Delta \dot{X}_{рад.опт} = \Delta \dot{X}_{рад} - \Delta \dot{X}_{опт.рад} \quad (4)$$

Частная производная выхода по входу или чувствительность объекта равна отношению скорости изменения выхода к скорости изменения входа

$$\dot{Y}(x) = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (5)$$

Т.о. при  $\dot{X}_{опт}$  и  $\dot{Y}_{опт}$  (фиксированный экстремум), используя выражения (5), (1), (2) имеем



$$\dot{y}_x = \frac{\partial(\Delta y_{opt})}{\partial(\Delta x_{opt})} \quad (6)$$

$$\text{и } \dot{y}_x = \frac{\partial(\Delta y_{рад})}{\partial(\Delta x_{рад})} \quad (7)$$

При параболической характеристике объекта

$$\Delta y_{opt} = -K(\Delta x_{opt})^2 \quad (8)$$

чувствительность объекта в рабочей точке определится как

$$\dot{y}_{x, рад} = -2K \cdot \Delta x_{рад, opt} = 2K \cdot \Delta x_{opt, рад}. \quad (9)$$

( В данном случае использована подстановка (8) в (7) ).

На рис. 4 представлена обобщенная функциональная схема оптимизации состояния регулируемого объекта в зависимости от поставленной задачи реализации данного состояния. Обобщенная схема рис. 4 решает классическую задачу теории управляющих процессов об оптимальном по быстродействию управлении. Задача состоит в том, чтобы найти управляющие переменные (функции), удовлетворяющие некоторым ограничениям, которые переводят управляемый объект из некоторого начального состояния в желаемое конечное состояние за кратчайшее время.

Такие задачи рассматривались в работах [1], [2], [3] с применением ограничений по амплитуде управляющей переменной в автономных линейных системах второго порядка.

Существуют другие методы решения таких задач, например, с использованием принципа максимума Понтрягина [4], [5], методы функционально-ограниченных функций управления.

Управляемая система, которую мы будем называть объектом может быть описана интегралом

$$\vec{x}(t) = \vec{x}^0(t) + \int_{t_0}^t \vec{h}(t, \tau) \underline{u}(\tau) d\tau \quad (10)$$

где  $\vec{x}$  - есть  $\bar{n}$  - мерный вектор и характеризует выход объекта, компонентами которого являются  $\bar{n}$  - параметров объекта, управляемого (для начала) единственной управляющей функцией  $\underline{u}(\tau)$ , которая называется управлением, Член  $\vec{x}^0(t)$  отражает влияние начальных условий на состояние объекта  $\vec{x}(t)$  при  $t = t_0$ .

Выражение (10) можно отождествить с решением векторного дифференциального уравнения

$$\dot{\vec{x}}(t) = \vec{A}(t) \cdot \vec{x}(t) + \vec{b}(t) \cdot \underline{u}(t), \quad (11)$$

которое имеет вид

$$\vec{x}(t) = \vec{\Phi}(t, t_0) \cdot \vec{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \vec{\Phi}(t, \tau) \vec{b}(\tau) \underline{u}(\tau) d\tau \quad (12)$$

где  $\vec{x}$  - вектор состояния, а  $\vec{\Phi}(t, \tau)$  - переходная матрица.

Задание объекта равенством (11) удобнее, т.к. объект может иметь разрывы и временные задержки в некоторых параметрах.

Функция  $\vec{h}(t, \tau)$  - есть реакция системы  $\vec{x}(t)$  на импульс ( $\delta$  - ф-ция) и  $\underline{u}(\tau) = \delta(\tau - \tau)$ , приложенную в момент времени  $t = \tau$ . Например, отклонение какого-либо одного параметра от заданной величины. Если это скачок, то эта ф-ция может иметь разрыв в точке  $t = \tau$ . Могут иметь место отклонения нескольких параметров.

Тогда, мы будем иметь дело с множественной реакцией системы  $\vec{x}(t)$ .

В таком случае мы запишем  $\vec{h}$  - функцию как  $\sum_{i=1}^n h_i(t, \tau)$  где  $i = 1, 2 \dots \bar{n}$ . Эти ф-ции должны удовлетворить следующим условиям:

- 1) ф-ции  $h_i(t, \tau)$  ограничены на конечных интервалах  $t_0 \leq \tau \leq t < \infty$  непрерывны по  $t$  и кусочно-непрерывны по  $\tau$ .
- 2) ф-ции  $h_i(t, \tau)$  линейно независимы на любом интервале  $t_0 \leq \tau \leq t$  т.е. для всякого ненулевого вектора  $\vec{\lambda}$

$$\vec{\lambda} \cdot \vec{h}(t, \tau) = \sum_{i=1}^n \lambda_i h_i(t, \tau) \neq 0 \text{ на } t_0 \leq \tau \leq t \quad (13)$$

Это условие утверждает, что объект может быть переведен при соответствующем выборе программы управления при любых начальных условиях в момент времени  $t = t_0$  в состояние, имеющее любой конечный выход  $\vec{X}(t)$  при  $t = T$ .

Это свойство получило название полной управляемости.

Цель управления состоит в том, чтобы обеспечить совпадение  $\vec{X}(t)$  - выхода состояния объекта с заданной функцией  $\vec{X}^*(t)$

Образуя разность

$$\vec{X}_d(t) = \vec{X}^*(t) - \vec{X}^0(t) \quad (14)$$

подбирают функцию регулирования  $u(\tau)$  т.о., чтобы эта разность была равна 0, либо *const*, либо выражала какую-либо функцию. Но во всех случаях должна быть обеспечена стабильность повторяемости результата, что определяет устойчивость систем авторегулирования. Заметим, что выход состояния объекта  $\vec{X}(t)$  может быть представлен множеством точек, образующих в декартовой пространственной системе объемное выпуклое "тело" (например, потенциальный рельеф) симметричное относительно начала координат  $X=0$  и непрерывное по  $T$ . Такое потенциальное поле состояния может быть образовано практически либо на ферритовых матрицах, либо записано в виде потенциалов на экранах запоминающих трубок. Образование разности  $\vec{X}_d(t)$  может быть осуществлено наложением полей состояния  $\vec{X}(t)$  и  $\vec{X}^*(t)$ .

В результате такого наложения образуется потенциальное поле регулирования.

Выше мы рассматривали случай, когда была одна единственная функция регулирования. Рассмотрим случай многих управляющих функций. Если объект управляется "  $\bar{z}$  " управляющими воздействиями  $u_j$  ( $j=1, 2 \dots \bar{n}$ ). То выход состояния объекта и его реакция запишется как

$$\bar{x}(t) = \bar{x}^0(t) + \int_{t_0}^t \bar{H}(t, \bar{z}) \bar{U}(\bar{z}) d\bar{z} = \bar{x}^0(t) + \sum_{j=1}^{\bar{z}} \int_0^t \bar{h}_{ij}(t, \bar{z}) u_j(\bar{z}) d\bar{z} \quad (15)$$

где  $\bar{h}_{ij}(t, \bar{z})$  есть  $j$ -й столбец ( $n \times \bar{z}$ ) матрицы  $\bar{H}(t, \bar{z})$ . Компоненты матрицы  $\bar{h}_{ij}(t, \bar{z})$  должны удовлетворить условию непрерывности.

Осуществляя аналоговые преобразования, возможно осуществление решения этих уравнений в зависимости от влияния отдельных параметров, определяющих состояние объекта или группы, функционально связанных параметров систем управления.

### 3. Выбор схем оптимизации при решении задач по управлению режимами ускорения частиц на синхрофазотроне.

Классическую схему оптимизации можно изобразить следующим образом (рис. 4).

Объектом регулирования является пучок частиц по какому-либо параметру или по всему параметрическому трафарету (напр. для  $\bar{H}$  режима:

$\gamma, \theta^0, \Delta \bar{z}, A_f, A_F$ ). Датчиками являются параметры магнитного поля и частоты ускоряющего напряжения ( $\bar{\omega}_0, \Sigma V_0, \bar{H}, \bar{n}(t), \bar{n}(\bar{z}, \bar{z})$  и др.). Поле датчиков регистрирует состояние объекта

по заданным параметрам. Параметрический трафарет задается программой приоритетного выбора информации. Далее, информация, представляющая из себя поле выходных параметров, обрабатывается многоканальными и многоцелевыми преобразователями. Преобразованные массивы данных либо поступает на МОЗУ, либо на оперативную регистрацию. Выходные параметры выбираются программным коммутатором в порядке приоритета и после кодирования, направляется в ЭВМ, либо в оперативную память. С ЭВМ, или напрямую, информация подается на оптимизатор. Включается генератор поиска в зоне "отклика" заданного параметра с одновременным контролем поля состояния регулируемого объекта. Сигнал ошибки найденный оптимизатором преобразуется в управляющий сигнал, который задаёт функцию регулирования уставок датчика.

Синхронизация осуществляется блоком команд, задаваемых операционной логикой через ЭВМ или супервизором х)

Рассмотрим параметрическое поле ускорителя в режиме инжекции и захвата ( см. рис.5)

В общей сложности доступное, пока, измерению поле датчиков содержит 57 параметров, не считая датчиков вакуума, радиации, температурного режима обмоток и режима систем коррекции.

Под двумя параметрами  $\Delta \tilde{z}$  и  $\Delta \tilde{z}$  объединена информация многодатчиковой системы пространственной регистрации равновесной орбиты. Таким образом, действительное поле датчиков будет содержать около 90 информационных массивов. Параметрическая шкала инжекции изображена на рис.6.

---

х) Супервизор - активный оператор, имеющий возможность активно вмешиваться в процесс обработки информации с целью сопровождающей коррекции.

Из рис.6 видно, что общее время регистрации параметров за цикл 3-5 мсек.

При контрольных параметрах  $\bar{J}_\alpha; \bar{J}_\beta; \bar{J}_{уск}$  являются параметрами I-го приоритета, а вспомогательные  $\Delta M; \bar{J}_z/\bar{J}_{100}$  - (потери) - II-го и т.д.

Рассмотрим функциональные связи.

1) Оптимальный захват в синхрофазотронный режим будет определять следующими соотношениями ;

а)  $\bar{Z}_S \approx R_0$

б)  $2\bar{\rho}_{max} = 2\bar{\rho}_{max} + \frac{1}{2}\Delta f \leq \Delta \bar{Z}_{H\text{реал}}$  и  $\frac{1}{2}\Delta f_z < \frac{1}{2}\Delta \bar{Z}_{H\text{реал}}$ .  
 отметим, что

$$\Delta \bar{Z}_{H\text{реал}} = \Delta \bar{Z}_H - [\Delta \bar{Z}(1 + \text{tg} \alpha)]$$

где  $\alpha$  - есть угол перекоса средней плоскости

в)  $\bar{\theta} \approx 3 \bar{\psi}_S$

г)  $\bar{n}(\bar{v}) = 0.67 \pm 0.01$  (при  $\bar{n} \neq 0.5; 0.75; 0.81; 0.63$ ) - нерезонансный случай.

Итак:  $\bar{Z}_S = R_0$  в том случае если : 1) нет искажений в магнитном поле ( $\Delta \bar{Z}_H$  и  $\Delta \bar{Z}_\alpha = 0$ ), т.е. имеет место линейный спад H в радиальном направлении и нет первой гармоники неоднородности магнитного поля в азимутальном направлении.

2) Включение частоты ускоряющего напряжения происходит в момент прохождения центральной равновесной орбиты через геометрический центр камеры.

3) Имеет место симметрия относительно  $R_0$  в  $\Delta \bar{Z}_{H\text{реал}}$  назовем её  $\bar{S}$ .

Далее. Максимальный размер сепаратриссы  $2\bar{\rho}_{max}$  будет определяться  $\bar{V}_0$  и  $\bar{\psi}_0$  т.е.  $\bar{\epsilon}_v = \bar{\epsilon}_0 \cos \bar{\psi}_0$  приростом энергии за оборот.

Известно, что

$$\dot{E} V_0 \cos \bar{\varphi}_0 = k \cdot \dot{H}$$

т.е. прирост энергии за оборот функционально связан со скоростью нарастания магнитного поля. Эти же параметры определяют и азимутальный размер

Заметим, что полосу "отчуждения" в размерах сепаратриссы определяет дисперсия параметров  $V_0, \bar{\omega}_0, \dot{H}$  т.е.

1) Наличие шумовой девиации частоты вызовет пульсацию радиальных границ сепаратриссы.

2) Наличие переменной составляющей в  $\dot{H}$  и  $V_0$  вызовет пульсацию  $\bar{\varphi}_0$ , что приведет к размытию азимутальных границ области устойчивости.

Эти дисперсионные "поправки" обязательно следует учитывать при отыскании оптимальных размеров области устойчивости, которую необходимо "вписать" в реальную магнитную аппаратуру ускорителя. Неравномерности  $\Delta \bar{z}(H)$  могут вызвать изменения " $\bar{n}$ ", что в резонансных случаях приведет к увеличению  $\Delta f$ , а, следовательно, к потере эффективности области захвата и потерям частиц (в случае отсутствия регулировки исходных параметров).

Возмущения  $\Delta \bar{n}(t), \Delta \bar{n}(z)$  приводят к дополнительному расширению полосы "отчуждения" области эффективного захвата. Амплитуда радиально-фазовых колебаний  $\Delta f$  зависит помимо  $V_0$  и  $\bar{\varphi}_0$  еще от  $\Delta M$  и  $\Delta \bar{\omega}$ .

Попробуем построить структурную схему параметрических функциональных связей.

Как видно (см. рис.7) структурная схема достаточно сложна и нуждается в существенном упрощении.

Упрощение структуры может идти за счёт введения обратных связей:

$$1) \bar{K} \frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\Delta R}{R} \quad - \text{стабилизация радиуса}$$

$$2) \frac{\Delta V_0}{V_0} = \bar{K} \frac{\Delta H}{H} \quad - \text{стабилизация } \bar{\varphi}_0, \text{ а, следовательно, } 2\bar{\rho}_{max} \text{ и } \bar{\theta}^0$$

$$3) A_F = f(\Delta M) \rightarrow \Delta M = f(V_{0j}; V_\phi)$$

- эта обратная связь

датчика даёт минимально-возможную амплитуду  $A_F$ . Однако здесь ф-ция  $A_F$  зависит от промежуточной ф-ции  $\Delta M$ , которая в свою очередь зависит от  $V_{0j}$  и  $V_\phi$ . Т.о.  $A_F$  - есть один из объектов оптимизации по трем параметрам, т.е. имеет место двухконтурная оптимизация (рис.8).

При последовательной работе схемы может быть использован один оптимизатор с разделенными ф-циями. Выход на регулирующие элементы и поиск идентичны: оптимизация по трем напряжениям, а поиск минимального значения ф-ции  $A_F$ .

Таким образом, система обратных связей и двухконтурная оптимизация  $A$  приведёт к тому, что остаются "незавязанными" <sup>только</sup> магнитные характеристики фазового объема. [4]

В области магнитной коррекции дело осложняется выбором систем регулирования в условиях малого быстродействия и больших мощностей. Двухконтурная схема оптимизации (рис. 8) идеализирована, так как в нее не заложено данных о ширине магнитной апертуры камеры и её симметрии относительно  $B_0$ .

По этим данным необходима коррекция  $\sum V_0$  с соответствующей поправкой на  $A_F$  (если отсутствует возмущение  $A_f$ ).

Несколько слов в отношении "полосы отчуждения" области захвата за счёт возмущающих факторов. Как мы уже отмечали, характер этих возмущений определяется шумовой девиацией частоты, фоном в  $V_0$



пульсациями магнитного поля. Эти факторы достаточно чётко проявляются при решении фазового уравнения с правой частью.

В случае *рейстрек* фазовое уравнение движения частиц при наличии дисперсии основных энергетических параметров может быть записано следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{E_c}{\omega_a^2 K_c F_c} \dot{\varphi} \right) - \frac{e 2 V_c}{2\pi} \cos \varphi = - \frac{e 2 V_0}{2\pi} \cos \varphi_0 + \bar{E}_{V_0} \frac{e 2 V_0}{2\pi} \cos \varphi - \bar{E}_H \frac{e 2 V_0}{2\pi} \cos \varphi_0 \left[ 1 + \frac{(1-\beta_c^2) + \frac{\gamma}{1-n}}{(1-\beta_a^2)(\beta_a^2 + \frac{n-\gamma}{1-n})} \right] + \frac{E_c}{\omega_a^2 K_c F_c} (\Delta \dot{\omega}_0) \quad (17)$$

Здесь индекс „с“ приписан равносному случаю

$$K F = 1 + \frac{n-\gamma}{\beta^2(1-n)} \quad , \quad \text{где } \bar{\gamma} = \frac{n+1}{n}; \quad n = 1 + \frac{L}{2\pi \zeta_0}$$

$L$  - сумма длин всех промежутков ,

$$\frac{e 2 V_0}{2\pi} \cos \varphi_0 = \frac{H_a e \zeta_0^2}{c} (1-\beta_a^2) \pi ;$$

$$\bar{\omega}_a = \frac{1}{\pi} \frac{e H_a c}{E_c}; \quad E_c \beta_a = e H_p \zeta_0 ;$$

Обозначим  $\bar{m} = \frac{E_c}{\omega_a^2 K_c F_c}$  ;  $2 V_c = V_0$  . Тогда :

$$\dot{\varphi} + \frac{\bar{m}}{m} \ddot{\varphi} - \frac{e V_0}{2\pi \bar{m}} \cos \varphi = - \frac{e V_0}{2\pi \bar{m}} \cos \varphi_0 + \bar{E}_{V_0} \frac{e V_0}{2\pi \bar{m}} \cos \varphi - \bar{E}_H \frac{e V_0}{2\pi \bar{m}} \cos \varphi_0 \left[ 1 + \frac{(1-\beta_c^2) + \frac{\gamma}{1-n}}{(1-\beta_a^2)(\beta_a^2 + \frac{n-\gamma}{1-n})} \right] + \Delta \dot{\omega}_0 \quad (18)$$

где :

$$\bar{E}_{V_0} = \frac{\Delta V_0}{V_0}; \quad \bar{E}_H = \frac{\Delta H}{H}; \quad \bar{E}_{\Delta \dot{\omega}_0} = \frac{\Delta \dot{\omega}_0}{\omega_0} .$$

В случае слежения частоты за магнитным полем  $[ ] = 1$

Пусть

$$\bar{E}_{V_0} = \frac{\Delta V_0}{V_0} = W_{V_0} \sin(\omega t + \gamma_{V_0}) \quad (19)$$

$$\bar{E}_H = \frac{\Delta H}{H} = W_H \sin(\omega t + \gamma_H) \quad (20)$$

$$\bar{E}_{\Delta \dot{\omega}_0} = \frac{\Delta \dot{\omega}_0}{\omega_0} = W_{\dot{\omega}_0} \cos(\omega t + \gamma_{\dot{\omega}_0}) \quad (21)$$

Тогда  $\Delta \bar{\omega}_0 = \bar{\omega}_0 W_{\bar{\omega}_0} \cos(\bar{\omega} t + \gamma_{\bar{\omega}_0})$   
 $\Delta \dot{\bar{\omega}}_0 = \bar{\omega}_0 \bar{\omega} W_{\dot{\bar{\omega}}_0} \sin(\bar{\omega} t + \gamma_{\dot{\bar{\omega}}_0})$

И окончательно:

$$\ddot{\varphi} + \frac{m}{m} \dot{\varphi} - \frac{eV_0}{2\pi m} \cos \varphi = -\frac{eV_0}{2\pi m} \cos \varphi_0 + [W_{V_0} \sin(\bar{\omega} t + \gamma_{V_0})] \frac{eV_0}{2\pi m} \cos \varphi - [W_{\dot{V}_0} \sin(\bar{\omega} t + \gamma_{\dot{V}_0})] \frac{eV_0}{2\pi m} \cdot F \cos \varphi_0 - [W_{\bar{\omega}_0} \sin(\bar{\omega} t + \gamma_{\bar{\omega}_0})] \bar{\omega}_0 \bar{\omega} \quad * (22)$$

Задав программу решения такого ур-ния ЭВМ можно выявить эффективное влияние каждого отдельного члена [4] на характер движения равновесной частицы, что может быть использовано для построения программ для оптимизаторов. Однако, следует оговорить, что применимость этого метода <sup>при</sup> построения программ оптимизатора ограничена адиабатикой движения частиц в ускорителе и резонансными явлениями, при которых необходимо искать решение ур-ния в условиях сильной нелинейности.

Можно выбрать несколько иной путь отыскания оптимального значения функции захвата, несколько облегчающий процесс математического моделирования и трансформацию в аналоговую форму<sup>[3], [8]</sup>. Кроме того способ описываемый ниже позволяет гибко использовать математическое описание процесса захвата в случае реализации данных из поля неучтенных параметров. Очень кратко сообщим об этом.

Поле состояния режима захвата можно задать совокупностью интегралов с переменными пределами. Конечным контролируемым объектом является величина захваченного заряда, в функции многих переменных

$$\int_{\bar{\omega}_0 - \Delta \bar{\omega}}^{\bar{\omega}_0 + \Delta \bar{\omega}} \int_{V_0 - \Delta V_0}^{V_0 + \Delta V_0} \int_{A_F}^{A_F + \Delta A_F} \int_{A_f}^{A_f + \Delta A_f} \int_{\Delta M_0 - \Delta M}^{\Delta M_0 + \Delta M} \int_{t_f - \Delta t}^{t_f + \Delta t} Q(\bar{\omega}, V_0, A_F, \beta_f, \Delta t; \Delta M) d\bar{\omega} dM_0 dV_0 dt \quad (23)$$

Решение такой совокупности интегралов на ЭВМ может быть осуществлено последовательным моделированием интегралов с переменными

$$* F = \left\{ \left[ 1 + \frac{(1 - \beta_a^2) + \frac{\gamma}{1 - \beta}}{(1 - \beta_a)(\beta_a^2 + \frac{\eta - \gamma}{1 - \beta})} \right] - \text{в случае "не следует"} \bar{\omega}_0 \rightarrow \eta \right.$$

- в случае "следит"

пределами, которые будут являться входом системы.

Решение одиночного интеграла с переменными пределами выглядят следующим образом. Для удобства в общем виде найдем решение для производной интеграла

$$\frac{d}{dt} \int_{\bar{x}_1(t)}^{\bar{x}_2(t)} f(\bar{x}, t) dx = \int_{\bar{x}_1(t)}^{\bar{x}_2(t)} \frac{\partial f(\bar{x}, t)}{\partial t} dt + f(\bar{x}_2, t) \frac{d\bar{x}_2}{dt} - f(\bar{x}_1, t) \frac{d\bar{x}_1}{dt} \quad (24)$$

для конкретного случая

$$\frac{d}{dt} \int_{\bar{x}_1(t)}^{\bar{x}_2(t)} f(x) dx = f(\bar{x}_2) \frac{d\bar{x}_2}{dt} - f(\bar{x}_1) \frac{d\bar{x}_1}{dt} \quad (25)$$

Схема логики решения такого интеграла на АВМ будет выглядеть так, как это изображено на рис.9.

При многократном интегрировании организуется программа работы логики приведенной выше. Имея в виду, что первый результат становится последующей подинтегральной функцией с новыми переменными, то организовать такую схему можно было бы следующим образом. ( см. рис.10).



где  $\bar{m}$  и  $\bar{n}$  - индексы параметров, " К " - коммутатор входа, задающего пределы интегрирования; КФ - коммутатор функций, S - синхронизатор; КВ - коммутатор выхода.

Видимо, схема удобна при слабой взаимно зависимости ф-ций определяющих состояние объекта.

В нашем случае положение осложняется тем, что, скажем,

$$\int_{\underline{A}_F}^{\overline{A}_F + dA_F} Q(\underline{A}_F) d\underline{A}_F = \Phi(\int_{\underline{\Delta M}}^{\overline{\Delta M}}; \int_{\underline{\Delta V_0}}^{\overline{\Delta V_0}}; \int_{\underline{\Delta \omega}}^{\overline{\Delta \omega}}; \int_{\underline{\Delta z}}^{\overline{\Delta z}}) \quad , \text{ а в свою очередь (26)}$$

$$\int_{\underline{\Delta M} - \underline{\Delta \bar{m}}}^{\overline{\Delta M} + \overline{\Delta \bar{m}}} Q(\underline{\Delta M}) d\underline{\Delta \bar{m}} = \Psi \quad (\text{от параметров инъекции})$$

Следовательно, нам придется иметь дело с двойными и прочими многомерными интегралами и это в сильной степени затрудняет построение логики. В качестве иллюстрации приведем схему логики для решения двойного интеграла (рис. II).

Мы имеем дело с внутренней функциональной зависимостью и это, естественно, осложняет анализ состояния объекта.

Заметим ещё, что последовательный опрос параметрической зависимости занимает время и делает систему оптимизации практически статической, что неприемлемо в реальных условиях.

Следовательно, как выход из положения, помимо системы прямого функционального анализа на поиск экстремума многопараметрической функции, должна действовать система стабилизации задающих начальных условий, которая бы осуществляла непрерывный контроль в заданной полосе допуска. Если имеет место уход начального уровня уставки параметра, то только в этом случае открывается зона поиска экстремального значения функции состояния по одному "подозрительному" параметру. Это существенным образом уменьшит время обработки информации. Причем, контроль параметрических уставок может осуществляться в подготовительный период между рабочими циклами ускорителя.

Особый случай представляет возникновение нелинейности функциональной связи в резонансных случаях. В этом режиме, когда трудно уловить преобладающее влияние того или иного параметра должна быть разработана программа приоритетного поиска, связанная с

решением уравнения движения частиц при заданных параметрах  $\underline{H}$  и  $v/c$ .

Можно попытаться построить функциональную схему синхрофазотрона в самом общем виде ( см. рис.12).

На рис. 12  $\vec{X}_A$  - вектор управляющих параметров, образующий параметрическую гиперплоскость,  $\vec{y}$  - векторное поле выходных параметров,  $\vec{z}$  - поле неучтённых параметров,  $\vec{w}$  - поле дисперсии начальных условий.

Нетрудно видеть насколько затруднен поиск в такой структурной схеме оптимизации. Переход к беспойсковой системе возможен только через " обучение" оптимизатора на основе анализа, творчества оператора и по мере накопления в " памяти" оптимизатора вероятностных случаев.  $[x_1, [s], [c], [G]]$

Приведенные примеры и соображения по выбору систем оптимизации очень упрощены и по сути дела являются лишь иллюстрацией к некоторым предложениям по осуществлению программы работ по автоматической оптимизации режимов управления электрофизическими установками.

Однако даже такой упрощенный анализ указывает на важность и сложность задач, которые стоят перед разработчиками таких систем. Одновременно с этим была проиллюстрирована реальная возможность осуществления таких систем, которые в самое ближайшее время займут достойное место в организации работы сложнейших ускорительных комплексов, решающих исследовательские задачи экспериментальной физики.

#### 4. Проект организации работ.

Все работы, связанные с автоматизацией управления и оптимизацией режимов на ускорителе, могут быть объединены под условным названием: Проект: "КОРСАР" ~~(КОРСАР)~~

(конструирование оптимизаторов режимов и систем авторегулирования).

Программа "КОРСАР(а)" должна содержать пять разделов, которые должны составлять вполне самостоятельные темы:

I. Тема: "РОСТ" - Разработка Обратных связей и систем стабилизации

II. Тема: "РИСК" - Разработка Информационных систем контроля

III. Тема: "СЕРП" - Система единой регистрации параметров

IV. Тема: "РОСА" - Разработка Оптимизирующих систем авторегулирования

V. Тема: "ПОЛК" - Программа обратных связей на линию с компьютером.

Раскроем содержание каждой темы:

I. "РОСТ". Тема включает в себя объем работ, которые необходимо провести в процессе подготовки к осуществлению проекта "КОРСАР". Она органически примыкает к темам "РИСК" и "СЕРП". Прежде чем решать вопрос о выборе поля параметров для "СЕРП", необходимо провести тщательный анализ функционального состояния действующего оборудования ускорителя, обслуживающих его установок и узлов.

Завершение анализа должно быть представлено конкретным перечнем работ по стабилизации эксплуатационных характеристик синхрофазотрона. Подлежат стабилизации:

1. Источники питания
2. Температурные режимы технологических узлов оперативных схем.
3. Режимы управления: там где возможно применение обратных связей с линейной характеристикой и постоянными параметрами.

В первую очередь подлежат стабилизации, так называемые, служебные параметры в системах внутреннего контроля. Каждому функционально-ограниченному оборудованию должна быть присвоена параметрическая карта со шкалой допусков. Дополнительно разрабатывается карта оперативных параметров, контроль за которыми осуществляет "СЕРП". Это параметры внешних цепей управления, где они являются аргументами функции управления общим ускорительным комплексом в режиме оптимизации. В процессе работ по стабилизации характеристик оборудования необходимо выявить структуру датчикового поля для системы "РИСК". Для этого надлежит составить "биографию" каждого параметра:

1. Наименование параметра ( н.п.)
2. Место "отклика" ( м.о.)
3. Вид функции ( В.Ф.)
4. Динамика (Д)
5. Исходный номинал величины ( И.Н.В.)
6. Реакция на внешний регистратор ( РНВР)
7. Временные, частотные и амплитудные (ВЧАХ) характеристики
8. Возможности передачи и преобразования (ВПП)
9. Примечание (Прим)

Например:

1. Н.П. - частота ускоряющего напряжения

2. М.О. - закон связи "f" и "H";  $t_{вкл} = f(H)$

3. В.Ф. -  $U = V_0 \sin [(\omega(t) \underline{t} + \bar{\varphi})]$

4. Д. -  $f = \frac{\alpha H}{\sqrt{\beta + H^2}}$

5. ИНВ. -  $V = 0,7$

6. РНВР - съём сигнала через катодный повторитель. Соплассование кабеля.

7. ВЧАХ - длительность в/ч пачки 3,3 сек,  $f_{0-0,4сек} = 5$  мггц сек;

$f_{0,4-3,3сек} = 7$  кггц/сек;  $f_{нач} = 150$  кггц -  $f_{кон} = 1,5$  мггц;

клирфактор - 5%.

8. ВПП - передача в/ч кабелем (РК-5В; РКТЗ -150). Преобразование:

а) счёт фаз  $\rightarrow$  число; б)  $\underline{U} = \varphi(\omega)$

9. Прим - регистрация в любой точке  $t_{к}$  от 0 до 3,3 сек.

Такие "биографические" карты" должны составлять временную библиотеку оперативных параметров.

Общий каталог такой временной библиотеки позволит провести унификацию параметрического поля ускорителя и составить карту приведённых параметров.

2. "РИСК". Исследование карты приведенных параметров, связано с отысканием законов динамики параметрического поля ускорителя и внутренних функциональных связей между отдельными параметрами, задающими состояние регулируемого объекта (пучка ускоряемых частиц).



Результатом исследования должна явиться построение общей функциональной схемы синхрофазотрона с разбивкой по частным задачам физического эксперимента. Например: настройка на максимальную интенсивность, настройка минимальной интенсивности в режиме облучения, программа внутреннего взаимодействия пучка частиц в комбинированном режиме, программа внешнего вывода и распределение пучков частиц в месте регистрации и т.д.

Отработанная функциональная схема синхрофазотрона в различных режимах позволит определить объем необходимой информации и её приоритетность в обработке. На основании результатов, проделанной выше работы, организуется информационная система контроля и осуществления разработки и издания необходимого датчикового поля ускорителя и режимов физического эксперимента.

3. "СЕРП". Создание системы единой регистрации оперативных параметров является ответственной задачей, завершающей, по сути дела, первую часть программы "КОРСАР".

Разработка системы должна предусматривать:

1. Наглядность параметрической информации (осциллографический метод, цифровые табло, запись на самописец, запись на магнитную ленту, фотоскопию).

2. Возможность хранения информации в библиотеках и архивах оперативного регистратора.

3. Создание программ: непрерывной регистрации, выборочной, индивидуально-селективной, функционально-зависимой и оперативных команд.

4. Систему опроса и обращения в памяти.

5. Систему синхронизации отбора "параметрических лентек".

6. Звуковую и световую сигнализацию указателя поля аварийного режима с вызовом "криминальных" параметров.

4. "РОСА". Располагая параметрическим полем ускорителя и схемами функциональной параметрической связи, возможно осуществление работ по созданию систем регулирования и оптимизирующих устройств.

Разработка авторегулирующих систем с обратной связью через оптимизатор должна предусматривать:

1. Разработку режимов оптимизации по отклонению регулируемой величины.
2. Разработку режимов поиска экстремального значения функции.
3. Создание многоканальных систем программного поиска оптимального значения функции при многопараметрическом входе.
4. Создание самонастраивающихся систем с программным обучением и логикой "сомнения".
5. Разработку селективных и широкополосных систем регулирования.
6. <sup>Создание</sup> Логик управления и анализа состояния управляющих систем.
7. Программной фильтрации данных в условиях дисперсии и помех.
8. Разработку дешифраторов кодированных сигналов и преобразователей кодов в управляющие сигналы.
9. Построение схем многоступенчатой оптимизации.

5. "ПОЛК" - Располагая приведенными массивами информации, представленными в виде пульсирующего параметрического поля выходных параметров, которое может быть описано условной гиперплоскостью, дифференцируемой в каждой точке и не имеющей разрывов, возможно осуществить математизацию динамики функционального состояния "поверхности" информационных массивов в амплитудном и временном масштабе.

Объём работы этой темы должен включать в себя:

1. Математизацию физических процессов сопровождающих ускорение частиц, управление пучком во время ускорения и при выводе.
2. Математическое моделирование функциональных связей и трансформирование их в аналоговую форму.
3. Построение радиоэлектронных моделей по аналоговым картам.
4. Выявление закономерностей в параметрических функциональных связях.
5. Построение компенсирующего изображения пульсирующей поверхности поля выходных параметров.
6. Разработку *ЯЗЫКОВЫХ* форм для программного общения с ЭВМ.
7. Разработка систем сопряжения ЭВМ с выходными устройствами информационных систем в режиме оптимизации.
8. Разработка систем прерывания при многопрограммном использовании ЭВМ.
9. Разработка систем распознавания приоритетности информационных массивов.
10. Создание программных каталогов режима работы ускорителей.

В программе "КОРСАР" предусмотрен раздел математического и технической обеспечения, который представлен группами ГРИП и ГРИМ.

ГРИП - ( группа расчётчиков и программистов) - включает в себя специалистов: теоретиков ускорительщиков и физиков экспериментаторов, обеспечивающих теоретические предпосылки тех или иных режимов работы ускорителя в зависимости от

требований эксперимента, а так же программистов, обладающих навыками кодирования и математического преобразования физических явлений.

ГРИМ - ( группа радиоконструирования и монтажа). Этот участок обеспечивает проект конструкторскими и монтажными разработками на основе данных остальных групп-заказчиков. Ведает материальным снабжением.


В этом разделе описания проекта приведены, в основном, самые общие соображения по объему и организации работ. В последующем изложении темы будут раскрыты более подробно с конкретными намётками в решении задач, стоящих перед каждой группой разработчиков.

Заметим, что реальное осуществление проекта "КОРСАР" должно начаться с осуществления первой части программы, завершающейся выводом необходимого объема информации на регистрирующие устройства ( "СЕРП").

Эта часть программы потребует затрат меньше чем вторая часть и может быть укомплектована в большинстве за счёт внутренних резервов кадров.

Кроме того, часть работ по теме "РОСТ" может проводиться без нарушения кадровой структуры лаборатории - в порядке производственного задания ( создание внутренних параметрических карт и параметрических "биографий", а так же ряд работ по стабилизации внутренних параметров).

2. Дубна 1968 г

  
/ Казанский Г.С. /

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления. М. "Машиностроение" 1965 г.
2. Земляков С.А. " Выбор схем и анализ *безпоисковой* самонастраивающейся системы с эталонной моделью. "Техническая кибернетика", 1963 г. № 2.
3. О применении АВМ для ЛУ по оптимизации параметров. Автореферат диссертации МИФИ, 1967.
4. И.М.Витенберг,  
Оптимизация линейного ускорителя У всесоюзная конференция по теории и математическому моделированию. М.1966г.
5. Расстригин Л.А.: " Случайный поиск", "Знание", Рига,1965г.
6. *J.S. Levin. Conf on Automatic Acquisition and Reduction of Nuclear Data Proc EANDC Karlsruhe 1964*
7. *R.J. Spinrad. Science V158 №3797, 10, 1967*
8. Цыганков В.В. Диссертация. Томский ПТИ,1968.
9. Основы автоматического управления под ред. В.С.Пугачёва. Изд." наук" Гл.ред. физико-математической литературы 1968г.
10. Казакевич В.В. " Применение метода Галёркина для исследования экстремального регулирования. Технический отчёт ЦИАМ,1948.
11. Автоматическая оптимизации управляемых систем изд."ИЛ" Москва, 1960 г.
12. Кибернетический сборник № 3 Изд. "МИР", Москва,1968г.

## Приложение

### Соображения по штатам

Минимальный штат проектной группы "КОРСАР" должен состоять из 53 единиц. Из них:

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 1. Руководителей групп          | - 7 |
| 2. Теоретиков (ускорительщиков) | - 2 |
| 3. Программистов                | - 2 |
| 4. Старших инженеров            | - 8 |
| 5. Инженеров                    | - 2 |
| 6. Ст.техников                  | -10 |
| 7. Техников                     | - 5 |
| 8. Конструкторов                | - 2 |
| 9. Копировщик                   | - 1 |
| 10. Радиомонтажники У-УП раз.   | -12 |
| 11. Руководитель проекта        | - 1 |
| 12. Зам. по науке               | - 1 |

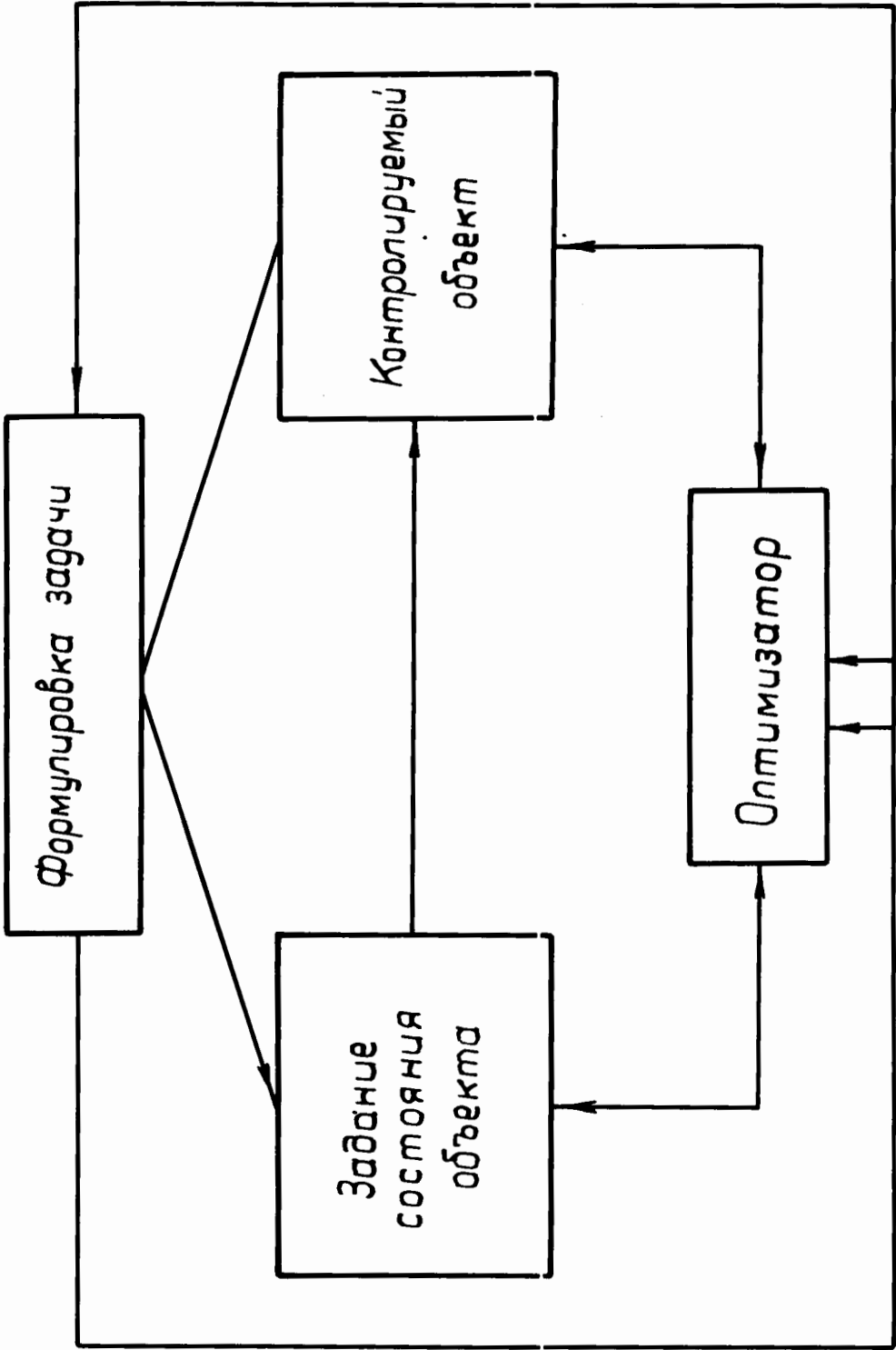


Рис.1

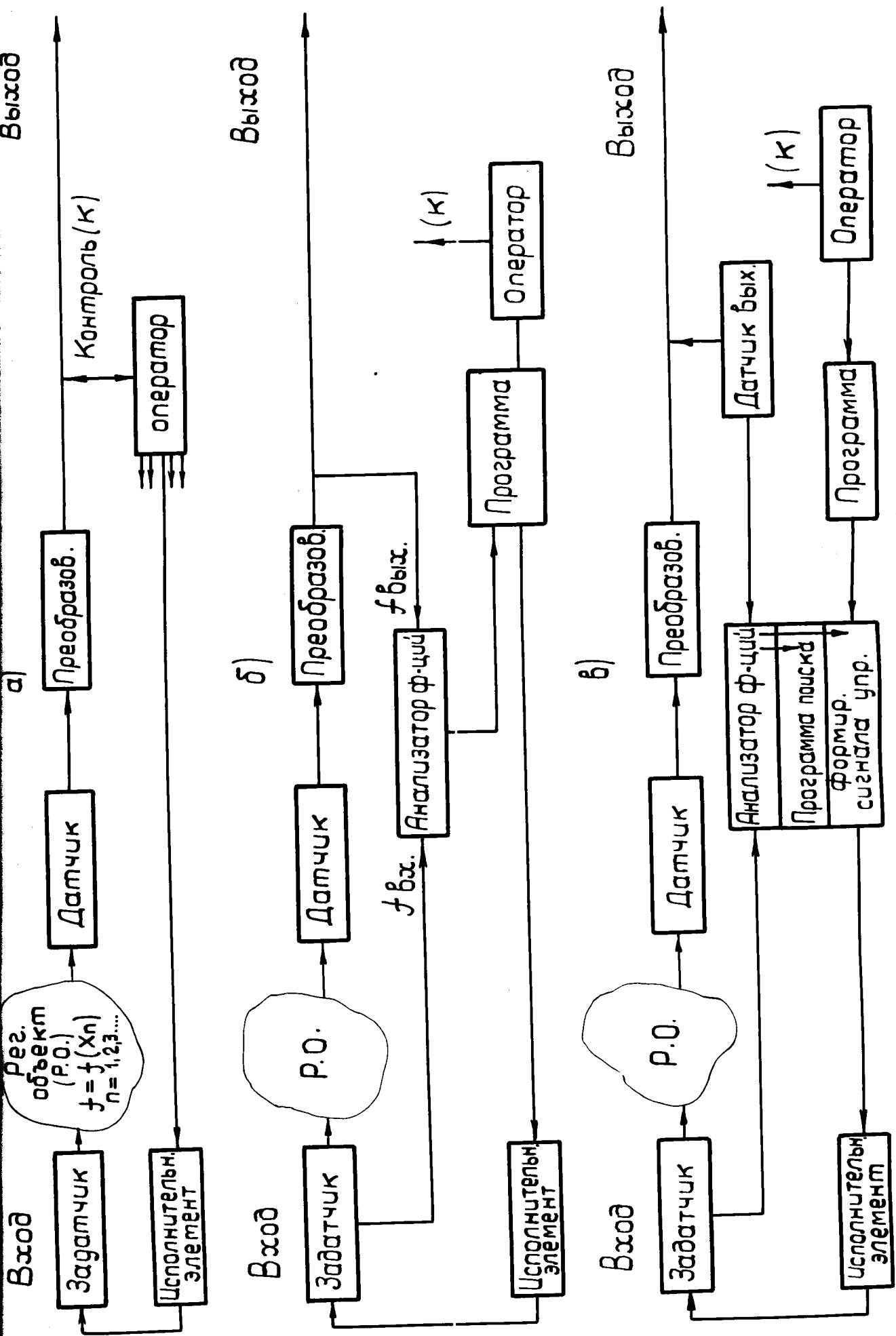
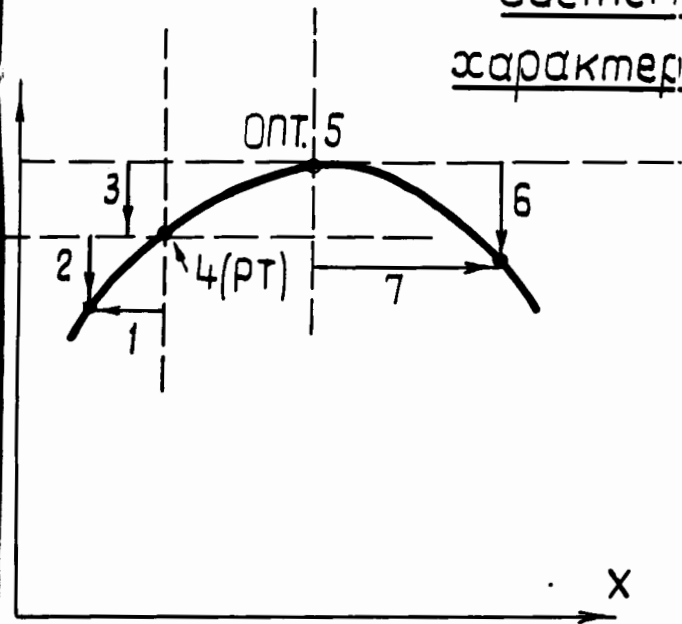


Рис. 2



# Системы координат характеристики объекта.



1. Отклонение входа от РТ- $\Delta x_{\text{раб}}$ .
2. Отклонение выхода от РТ- $\Delta y_{\text{раб}}$ .
3. Отклонение РТ(вых.) от ОПТ- $\Delta y_{\text{раб.опт}}$
4. Рабочая точка РТ.
5. Точка оптимума ОПТ
6. Отклонение выхода от точки ОПТ  $\Delta y_{\text{опт}}$
7. Отклонение входа от точки ОПТ  $-\Delta x_{\text{опт}}$
- 8 —  $\Delta y_{\text{раб}}$
- 9 —  $\Delta y_{\text{раб.опт}}$ .

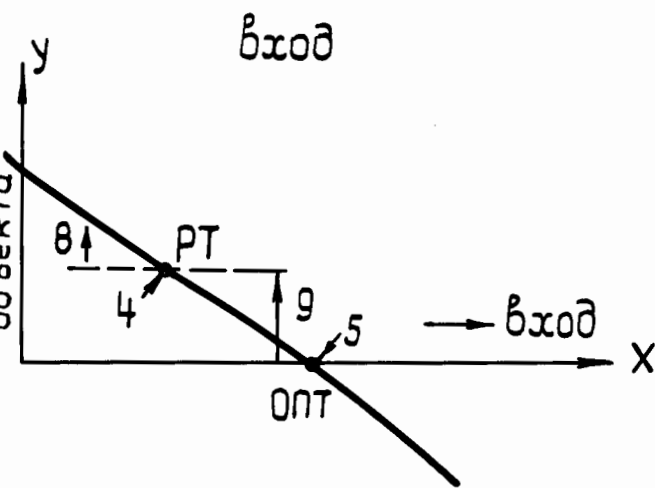


Таблица I

| Система координат / Точки | с началом в произвольн. точке          | с началом в точке оптимума                                  | с началом в рабочей точке  |
|---------------------------|--|---|--|
| Оптимальная               | $y_{\text{опт}}$<br>$x_{\text{опт}}$   | 0<br>0  | $\Delta y_{\text{опт.раб}} = -\Delta y_{\text{раб.опт.}}$<br>$\Delta x_{\text{опт.раб}} = -\Delta x_{\text{раб.опт.}}$ |
| Рабочая                   | $y_{\text{раб.}}$<br>$x_{\text{раб.}}$ | $\Delta y_{\text{раб.опт}}$<br>$\Delta x_{\text{раб.опт.}}$ | 0<br>0   |
| Произвольная              | $y$<br>$x$                             | $\Delta y_{\text{опт}}$<br>$\Delta x_{\text{опт}}$          | $\Delta y_{\text{раб.}}$<br>$\Delta x_{\text{раб.}}$   |

Рис.3

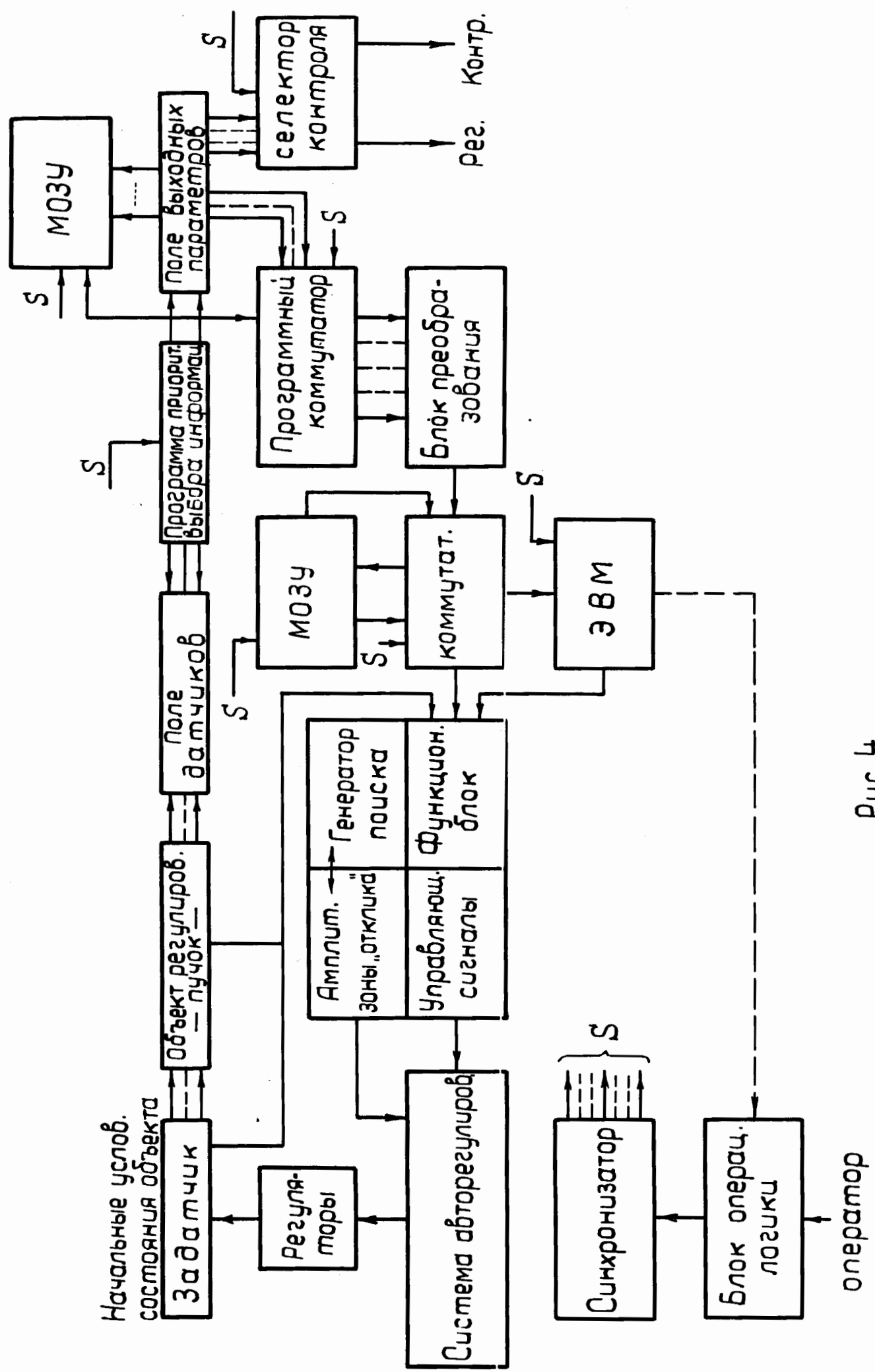


Рис. 4

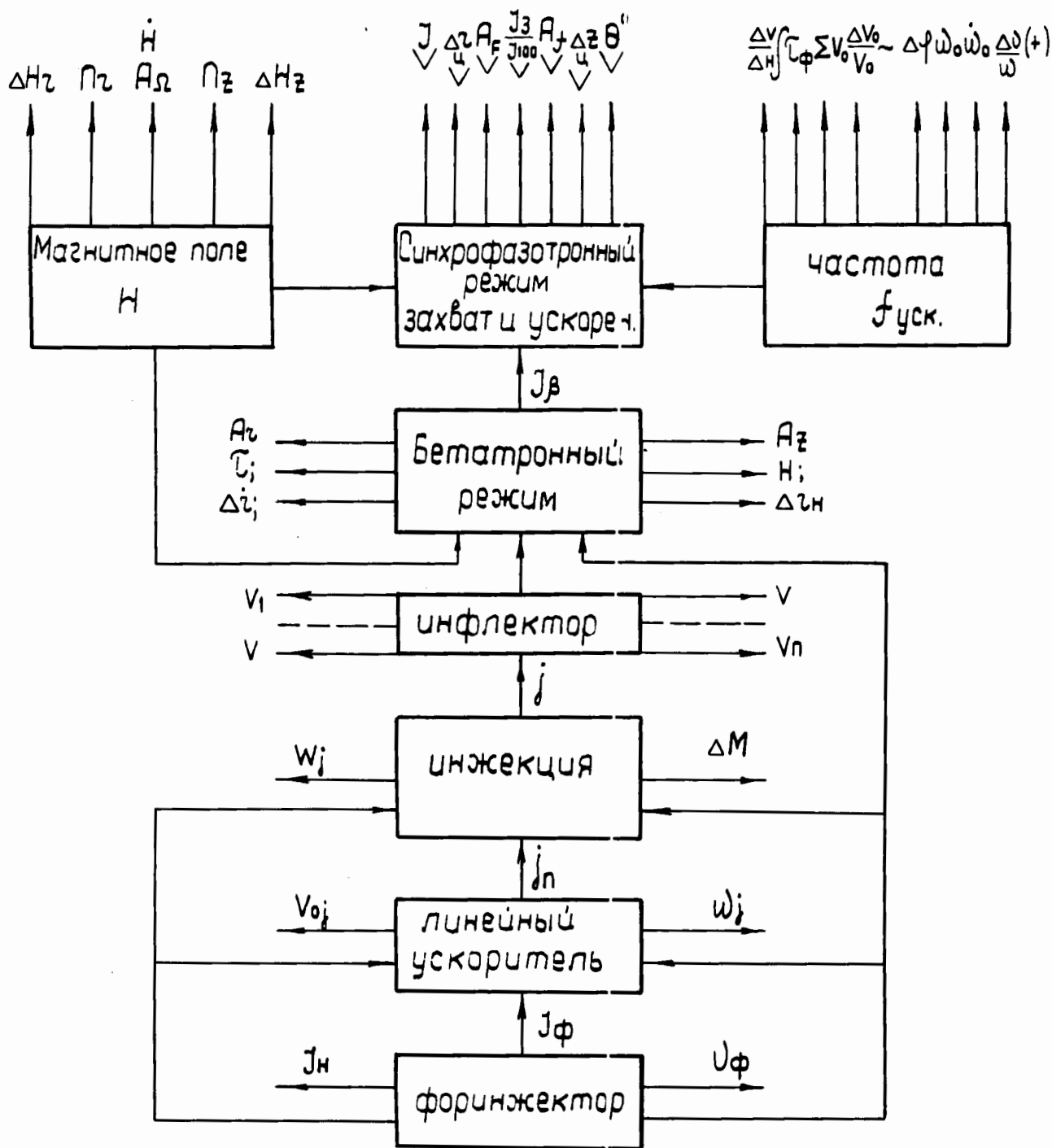
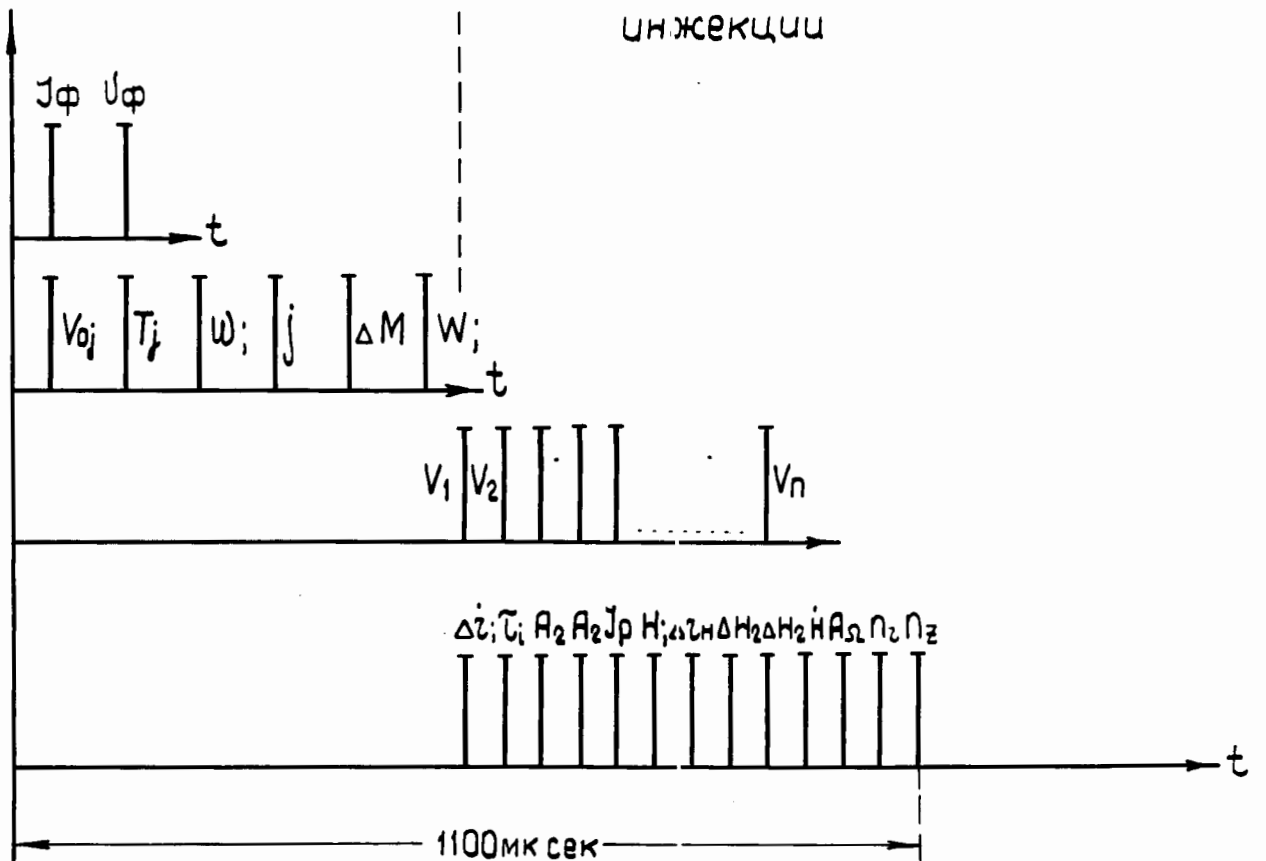


Рис. 5

Параметрическое поле режима инжекции и захвата в синхροфазотронный режим.

Параметрическая шкала первого этапа  
инъекции



Параметрическая шкала второго этапа  
инъекции

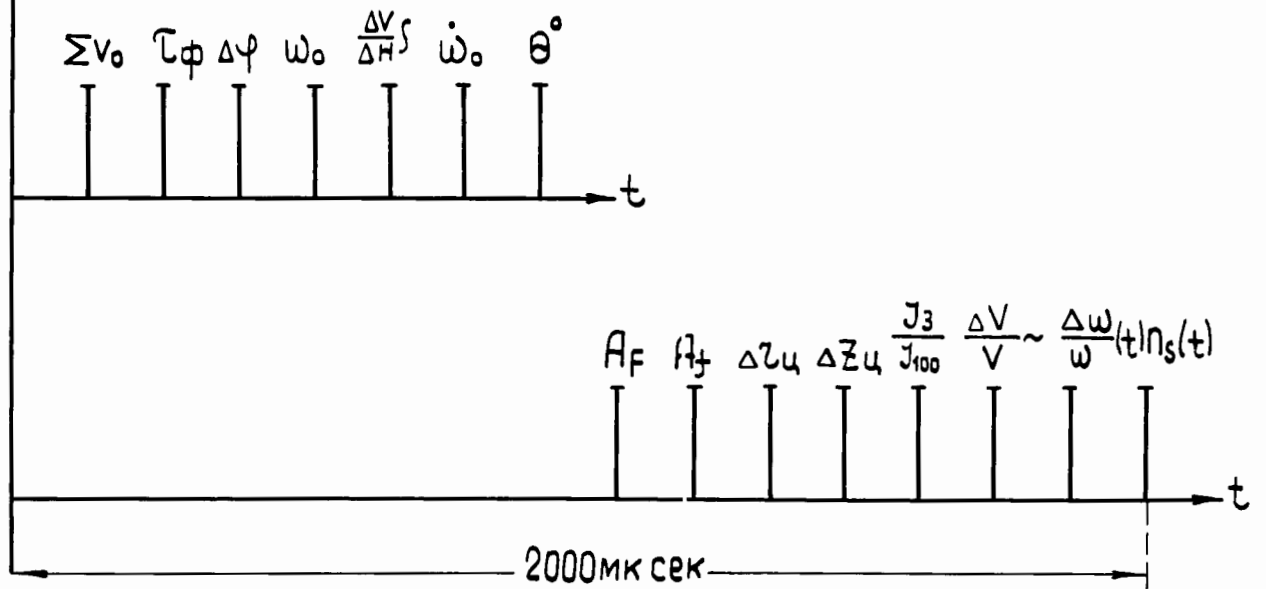
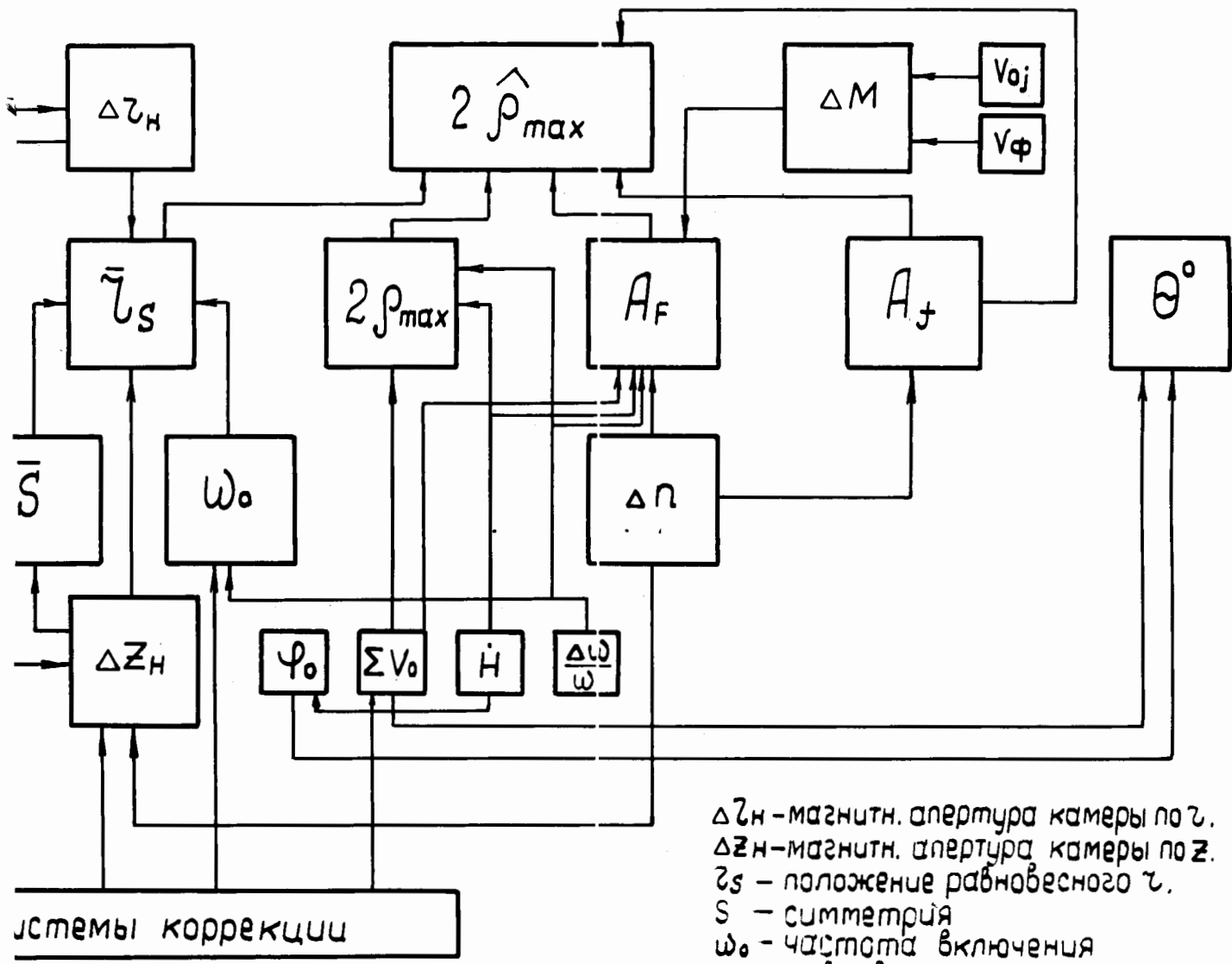


Рис. 6



$\Delta z_H$  - магнитн. апертура камеры по  $z$ .  
 $\Delta z_N$  - магнитн. апертура камеры по  $z$ .  
 $z_s$  - положение равновесного  $z$ .  
 $S$  - симметрия  
 $\omega_0$  - частота включения  
 $\varphi_0$  - равновесная фаза

$\Sigma$  - суммарное напряжение;  $\dot{H}$  - скорость изменения магнитн. поля  $\frac{\Delta\omega}{\omega}$  - девиация томы  $\Delta n$  - изменение показателя преломления;  $A_F$  - амплитуда  $p$ - $\varphi$  колебаний;  $A_\varphi$  - амплитуда свободных колебаний;  $2\rho_{max}$  - радиальный размер сепаратрисы.  $2\rho'_{max}$  - азимутальный размер сепаратрисы.  $2\hat{\rho}_{max} = 2\rho_{max} + \text{возмущ. факторы}$ .  $\Delta n$  - ширина энергетического спектра,  $V_{oj}$  - амплитуда  $\sqrt{4}$  ЛЧ;  $V_\varphi$  - напряжение форинж.

Рис. 7

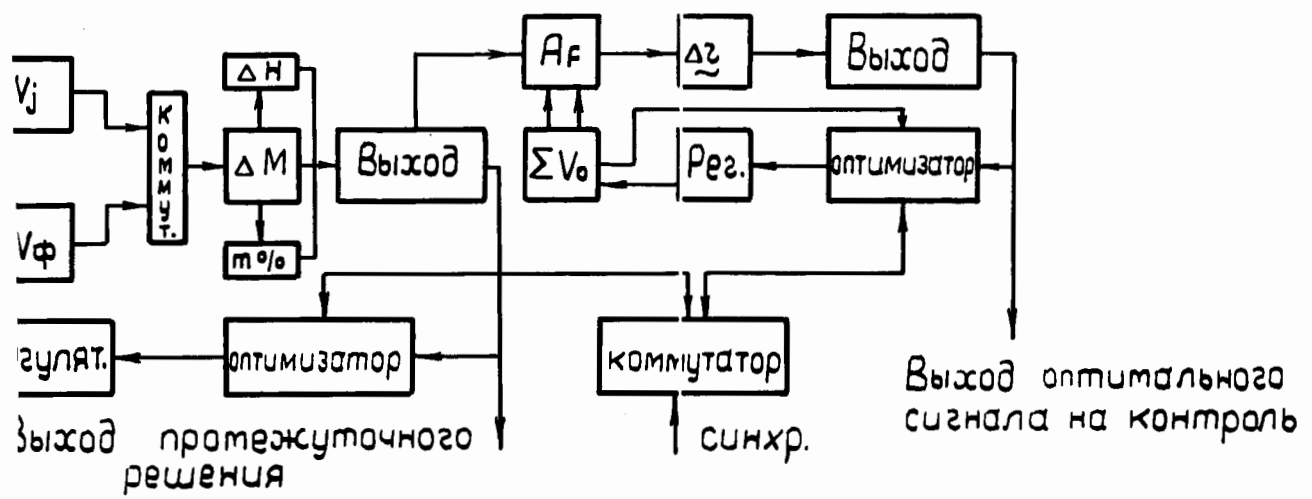


Рис. 8

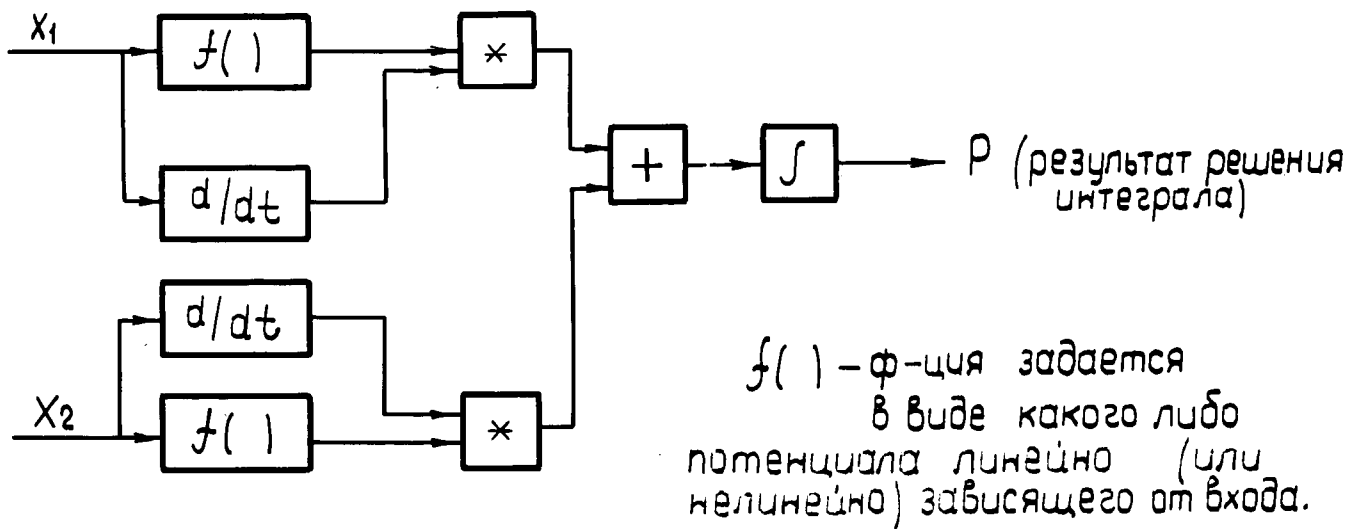
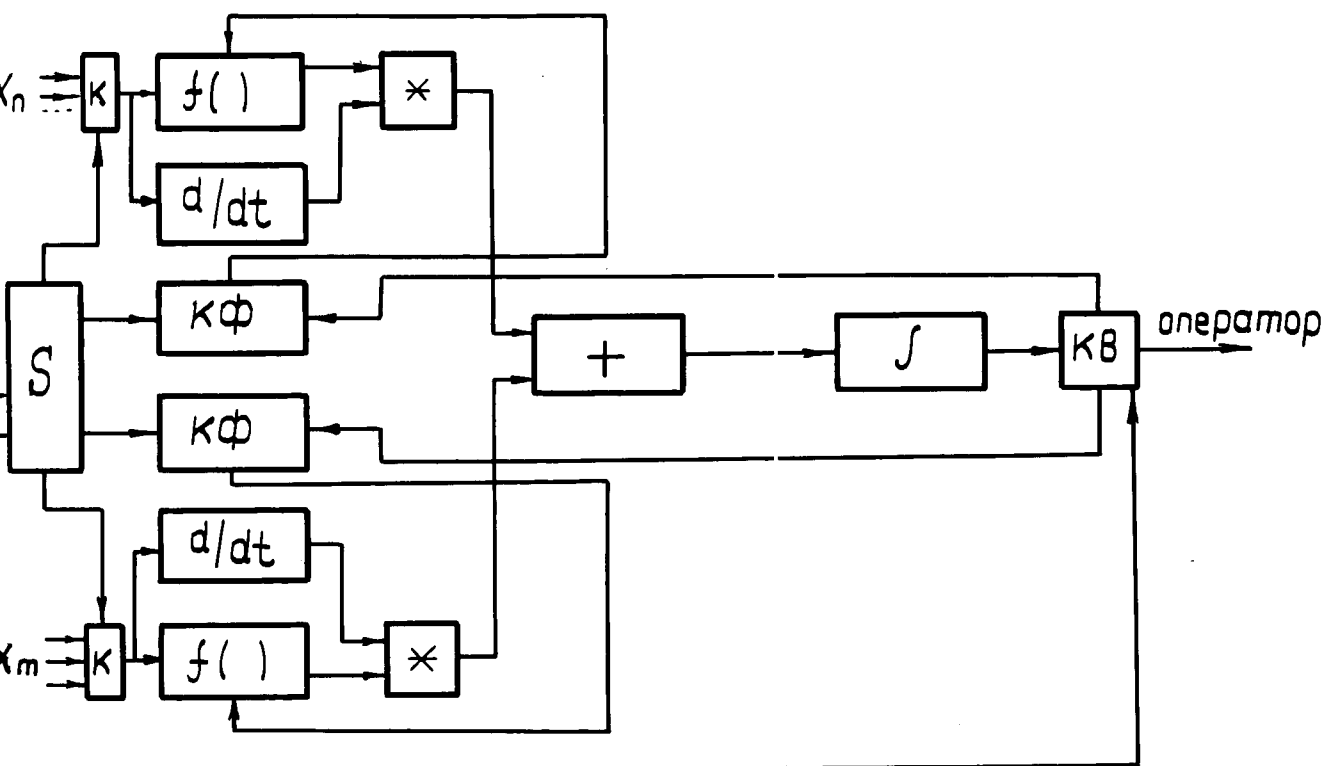


Рис.9



- К - коммутатор входа
- КФ - коммутатор функций
- КВ - коммутатор выхода
- S - синхронизатор

Рис.10

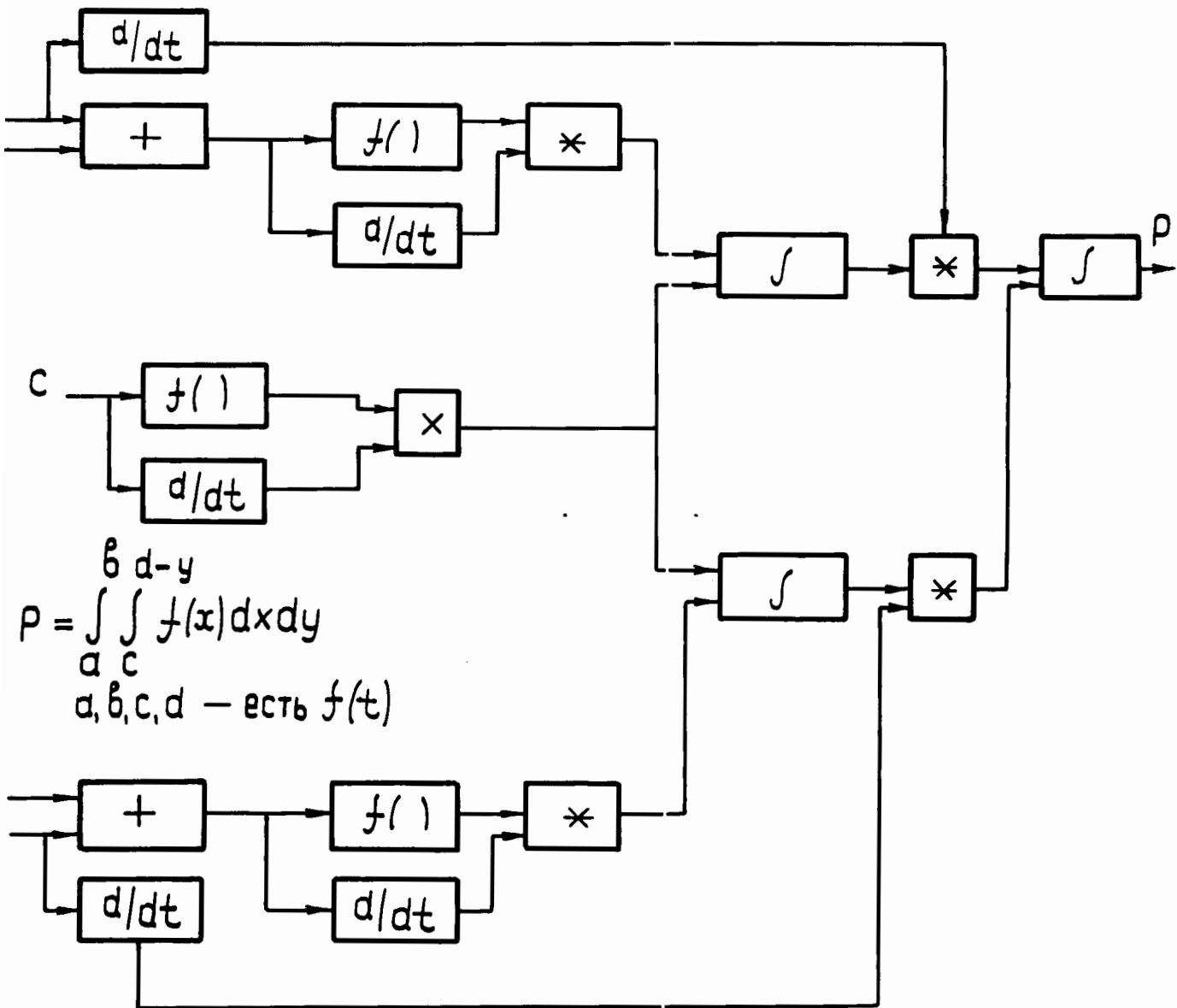


Рис. 11

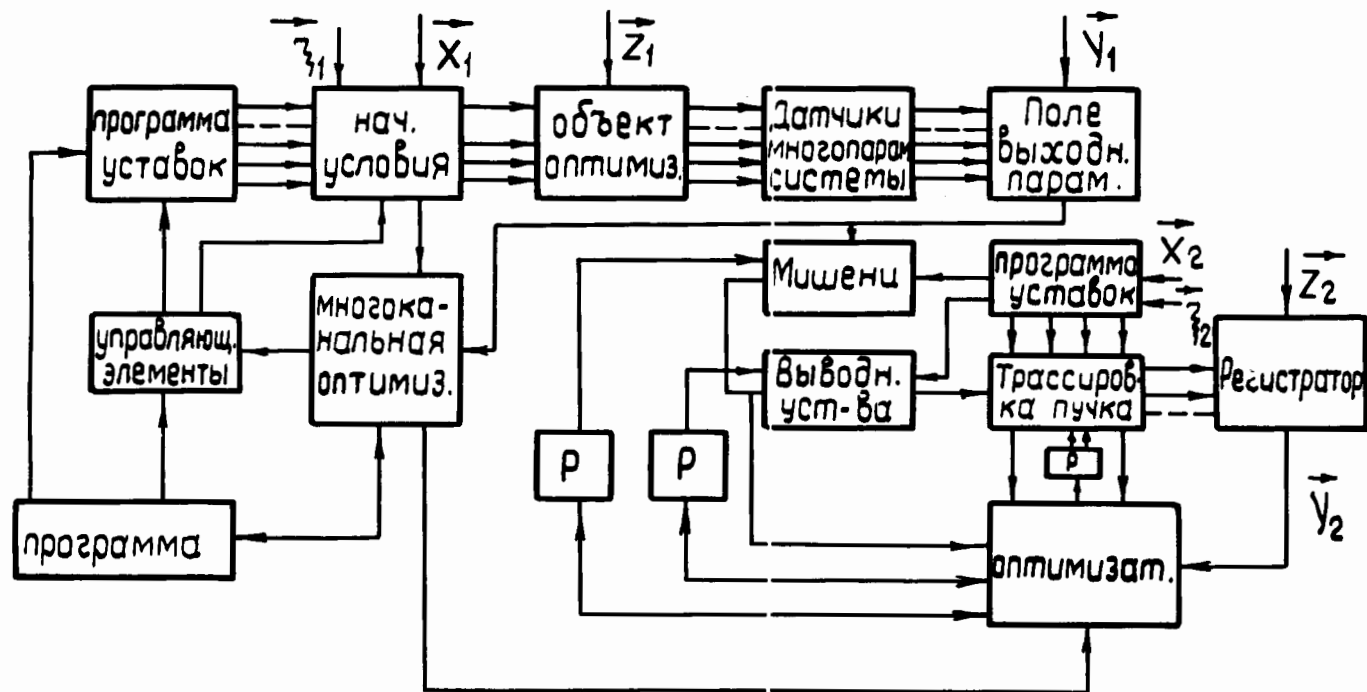


Рис. 12