

6
А-43

Госкомитет по приборостроению,
средствам автоматизации и
системам управления при Госплане СССР

Академия наук СССР

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

На правах рукописи

З.М. Салихов

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Автореферат диссертации, представленной
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор А.Я. Лернер

Москва, 1963 г.

З.М. Салихов

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Экспериментальная часть работы выполнена в Институте автоматике и телемеханики Государственного комитета по приборостроению, средствам автоматизации и системам управления при Госплане СССР и на Октябрьском передающем радиоцентре Московской дирекции радиосвязи.

Москва 1963 г.

При радиосвязи на любой частоте необходимо считаться с фактом наличия определенного уровня помех, и задача всех звеньев радиоканала состоит в том, чтобы в месте приема обеспечить необходимое преобладание уровня полезного сигнала над уровнем помехи. Повышение отношения сигнала к помехе требует повышения мощности, излучаемой радиопередатчиком. Поэтому в данной работе режим передатчика, обеспечивающий максимальное значение отношения сигнал-шум в месте приема, считается оптимальным и берется основным критерием для построения системы автоматического поиска (САП) оптимальных режимов радиопередатчиков. Конечной задачей системы автопоиска является обеспечение такого положения органов настройки выходного каскада (величины переменной индуктивности контура, органа связи с антенной и величины амплитуды возбуждающего напряжения с предыдущего каскада) для конкретных и изменяющихся во времени условий работы, при котором радиопередатчик отдавал бы в антенну максимальную мощность.

При создании САП оптимальных режимов радиопередатчиков необходимо было решить следующие задачи: изучение радиопередатчика как объекта автоматического поиска; выбор величины шага с тем, чтобы рыскания системы были заключены в некоторую \mathcal{E} — подобласть в пространстве режимов; динамику поиска оптимального режима радиопередатчика; динамику самого радиопередатчика, а также рассмотрение помехоустойчивости системы автопоиска, определение времени поиска, сведение к минимуму ложных срабатываний системы от дрейфа, создание простых коммутирующих устройств и т.д.

В первой главе производится анализ систем автоматического управления настройкой, подстройкой и загрузкой колебательных контуров радиопередатчиков.

В соответствии с классификацией систем автоматических настроек колебательных контуров радиопередатчиков по назначению и особенности их работы они делятся на три основные классы:

1. Грубые системы, или системы автоматической настройки контуров в широком диапазоне (САНК).
2. Точные системы, или системы автоматической подстройки контуров (САПК).
3. Грубо-точные системы, или смешанные системы, объединяющие САНК и САПК.

По источнику управляющего воздействия САНК в свою очередь можно разделить на три группы:

- А. САНК, имеющие источником управляющего воздействия один из переменных параметров настраиваемого каскада.
- Б. САНК, имеющие внешний первоисточник управляющего воздействия, характеристика которого не зависит от параметров настраиваемого каскада, но зависит от параметров других высокочастотных контуров.
- В. САНК, имеющие внешний независимый источник управляющего воздействия.

О возможности применения САНК и САПК можно заметить следующее: САПК больше подходят для настройки контуров промежуточных, маломощных каскадов передатчиков, которые не испытывают значительной расстройки за счет реакции нагрузки, изменения температуры ламп, деталей и т.д. САНК на фиксированные волны можно применять и в мощных промежуточных каскадах. Выходной же каскад передатчика, нагруженный антенной системой, параметры которой изменяются в широких пределах не только по

диапазону, но и на данной частоте за счет влияния метеорологических условий, изменения параметров ламп и т.п., очевидно, невозможно настроить САНК без участия САПК. При использовании в необслуживаемом передатчике системы автоматической регулировки загрузки (САРЗ) оконечного каскада также обуславливает применение САПК в этом каскаде, так как в процессе загрузки каскада необходимо поддерживать резонансную настройку его контура.

Затруднения, связанные с получением широкой полосы захвата фазовых дискриминаторов, особенно на высоких частотах, заставляют прибегать в выходных каскадах к использованию системы третьего класса, объединяющей САНК и САПК.

Почти во всех фазовых системах автоматической настройки колебательных контуров основным элементом является фазовый дискриминатор. В качестве примеров проанализированы следующие дискриминаторы:

- 1) балансный фазовый,
- 2) фазовый кольцевой симметричный,
- 3) фазовый кольцевой несимметричный,
- 4) фазовый смеситель на триодах.

Из приведенных суждений и аналитических исследований следует, что с точки зрения комбинационных сигналов значительное преимущество имеют балансные дискриминаторы. В еще большей степени вредные колебания могут быть подавлены в кольцевых схемах фазовых дискриминаторов.

В качестве примеров для систем третьего класса проанализированы следующие системы совместного действия (грубо-точные системы):

- 1) частотно-фазовая система,
- 2) система "сравнения" с фазовым дискриминатором,
- 3) система "направления" с фазовым дискриминатором.

Анализируются системы автоматического выбора связи выходного каскада радиопередатчика с нагрузкой.

Во второй главе работы приводятся свойства и характеристики радиопередатчика как объекта автоматической оптимизации. Выбор критерия оптимальной работы затруднителен ввиду разнообразия возможных режимов, в которых используется радиопередатчик. Так как наилучшая дальность и качество радиопередачи получаются при максимальном соотношении сигнал-шум в месте приема, то почти для всех передатчиков оптимальным считается режим излучения максимальной мощности. При этом на оптимизируемый параметр — полезную мощность передатчика — могут быть наложены ограничения как по тепловым или электрическим показателям работы, так и по качественным показателям передатчиков, работающих в режиме радиовещания. Излучаемая, или колебательная, мощность передатчика в общем случае может быть определена зависимостью:

$$Q = f[\varepsilon, \gamma, \theta, \alpha_c, \alpha_{HK}, \alpha_3, \alpha_{HK}(\alpha_3), t, \dots]$$

Из числа переменных параметров при работе передатчика в определенном режиме, на определенной частоте, гармонике и с определенной отсечкой оптимальные величины ε , γ и θ могут быть выбраны в процессе наладки передатчика и не меняются за радиосеанс. Следовательно, вопрос получения максимальной полезной мощности сводится к вопросу вариации остальных параметров, изменяющихся за радиосеанс. При этом α_c определяет величину амплитуды возбуждающего напряжения, подаваемого с предыдущего каскада, α_{HK} — настроенность колебательного контура; α_3 — загрузка передатчика; $\alpha_{HK}(\alpha_3)$ — настройку колебательного контура с изменением величины загрузки и t определяет изменение всех этих параметров во времени.

Зависимость излучаемой мощности от настройки контура имеет явный экстремум. Принято, что выходная мощность передатчика связана с величиной α_{HK} уравнением второй степени. Хотя характеристики существующих промышленных образцов передатчиков отличаются, как правило, от принятых в данной работе аналитической формой их выражения, они достаточно хорошо приближаются к указанной выше аналитической форме их выражения в зоне работы системы автоматического поиска.

При увеличении амплитуды возбуждающего напряжения возрастает амплитуда анодного тока и, следовательно, излучаемая мощность. Однако дальнейшее увеличение анодного тока приводит к перенапряженному режиму, при котором излучаемая мощность уменьшается. Анализ расчетных кривых и проведенные эксперименты показали, что максимальное значение мощности получается разным для различных значений амплитуды возбуждающего напряжения, т.е. оно сначала растет, а затем падает. Поэтому следующим переменным параметром для системы автоматического поиска была величина возбуждающего напряжения, при котором снимается максимум мощности при оптимальной нагрузке. Предполагается, что связь между полезной мощностью передатчика и следующим переменным параметром α_c — параболическая. Для получения от выходного каскада максимальной мощности необходимо установить определенную величину резонансного сопротивления антенного контура, на которое влияет главным образом величина связи с антенной. Изменяя анодную связь с антенной, можно достигнуть наилучшей согласованности сопротивлений анодного контура и антенны. При этом условие настройки анодного контура в резонанс является обязательным. В работе принято, что полезная мощность передатчика и следующий переменный параметр α_3 связаны параболической зависимостью. Реальное пространство режимов аппроксимировано пространством, у которого

общеполитическое выражение между полезной излучаемой мощностью передатчика Q и переменными α_c , α_{HK} , α_3 , приведенными к новой координатной системе, приобретает вид

$$-2Q = \frac{\alpha_c^2}{z} + \frac{\alpha_{HK}^2}{p} + \frac{\alpha_3^2}{q},$$

где z, p, q - параметры парабол, образующих пространство режимов.

При этом погрешность в аппроксимации вытянутых эллипсов не превышает 10%, а парабол - 1,6%. Таким образом, пространство режимов представляет собой некоторую параболическую поверхность, которая деформируется во времени в зависимости от вида, назначения и режима передатчика, рабочей частоты, метеорологических и других условий.

В работе производится аналитический метод исследования пространства режимов методом сечений.

Сечение пространства режимов плоскостями, параллельными координатным плоскостям, дает уравнение параболы, эллипса, как это было предположено вначале. Экспериментально автором сняты также характеристики радиопередатчика.

При исследованиях предполагалось, исходя из реальных условий, что под действием системы автоматического поиска рабочая точка на плоскости $\alpha_{HK} \alpha_3$ стремится к началу координат до попадания в некоторую, заранее заданную \mathcal{E} - подобласть, включающую начало координат. А сама область \mathcal{E} есть заранее определенная точность установления оптимальной величины основного критерия Q . Дана методика определения уравнения пространства режимов, когда известно одно из сечений этого пространства.

В третьей главе работы решается задача синтеза самонастраивающейся системы управления режимом работы радиопередатчика.

Приводятся блок-схемы управления радиопередатчиком. В этом случае система автоматического поиска автоматически находит и поддерживает оптимальную точку в пространстве режимов путем определения частых экстремумов по каждой переменной. В схеме предусмотрен элемент разрешения коммутации, необходимый для избежания двух неправильных шагов в момент переключения блока оптимизации с одного органа на другой орган настройки. Коммутатор получает импульс для коммутации лишь в том случае, если последний шаг был сделан в правильном направлении. В основном принцип получения максимальной полезной мощности необходим при телеграфном режиме передатчика, и в этом случае на оптимизируемый критерий не накладываются дополнительные ограничения по тепловым или электрическим показателям передатчика.

Выбор принципа построения системы автоматического поиска оптимального режима радиопередатчика основан главным образом на некоторых инженерных соображениях. В соответствии с этими соображениями помехоустойчивость всей системы управления, сложность технической реализации аппаратуры, время и точность поиска кладутся в основу предпосылок по выбору принципа построения системы автопоиска. Как показано в работе, в разработанной системе движение к оптимальному режиму зависит не только от знака частной производной, но и от величины ее. Система является шаговой с переменными интервалами времени между шагами.

При разработке системы автопоиска основное внимание было уделено помехоустойчивости. Диапазон спектра частот помехи, действующей на передатчик, очень широк, так как в него входят как низкочастотные, так и высокочастотные составляющие. Для упрощения наших теоретических выкладок и учитывая ширину диапазона спектра частот помехи, действующей на систему, рассмотрено прохождение через систему автопоиска стационарного белого шума.

Связь между порогом срабатывания интегратора $Q_{срэд}$, спектральной плотностью шума S_0 , постоянной времени интегратора T_u , величиной шага ΔQ и постоянной времени входного инерционного фильтра T_ϕ установлена выражением

$$Q_{срэд} = \frac{\sqrt{S_0}}{T_u} \sqrt{\frac{Q_{срэд} \cdot T_u}{\Delta Q} + 2,5 \frac{Q_{срэд}^2 \cdot T_u^2}{\Delta Q^2 \cdot T_\phi}}$$

Получено выражение для расчета постоянной времени входного инерционного фильтра, когда необходимо добиться существования определенного оптимального соотношения между постоянными времени интегратора и фильтра. Приведены в работе качественное и количественное исследования по определению наилучшей помехоустойчивости системы автопоиска. Количественная оценка сводится к решению уравнения

$$\frac{R T_u}{t} - (\sigma_0 - \sigma_1) e^{-\frac{t}{T_\phi}} - \sigma_1 = 0,$$

определяющего пересечение характеристик интегрирующего звена и шума. Представляя

$t = K_z T_u$, $\sigma_1 = \sqrt{1,6 \frac{S_0}{T_\phi}}$, $T_\phi = \frac{T_u}{\alpha}$, $\sigma_0 = \sigma_0' \cdot z \cdot \sqrt{\alpha}$, $R = R' \sigma_0'$ и представляя полученное уравнение в виде неявной функции, ищем

$$\frac{dK_z}{d\alpha} = 0.$$

Значение K_z можно определить из уравнения

$$K_z^2 2\alpha z (\sqrt{\alpha} \cdot z - R') - K_z [z(1 + \alpha R') - 2\sqrt{\alpha} R'] + zR' = 0.$$

Если большой корень этого уравнения обозначим через $c_1(\alpha)$, то первоначальное уравнение примет вид:

$$\frac{R'}{c_1(\alpha)} - (1 - \sqrt{\alpha} \cdot z) \cdot e^{-\alpha c_1(\alpha)} - \sqrt{\alpha} \cdot z = 0.$$

Из этого выражения определяется величина α . Затем из $\alpha = \frac{T_u}{T_\phi}$ определяется T_ϕ , обеспечивающее наибольшее значение времени интегрирования t , что определяет наилучшую помехозащищенность системы. Приводятся формулы для расчета минимальной постоянной времени управляющей части, когда входной сигнал состоит из белого шума. При этом считается, что среднее значение квадрата выходного сигнала является непосредственным показателем качества работы фильтра. Помехоустойчивость системы автопоиска обеспечивается применением инерционного фильтра на входе, запоминанием емкости отфильтрованного входного сигнала и главным образом применением интегрирующего звена.

В работе приведена электрическая схема системы. Вся система в основном включает в себя следующие, конструктивно отдельно выполненные блоки:

- 1) блок питания;
- 2) блок оптимизации, состоящий из:
 - а) звена запоминания,
 - б) интегрирующего звена,
 - в) звена формирования управляющих сигналов;
- 3) блок коммутатора.

Принципы работы отдельных узлов и блоков описаны в третьей главе работы. Там же приводится несколько разновидностей построения схем коммутаторов.

Выключение некоторых органов настройки по достижению оптимальной точки в пространстве режимов и повторное их включение при изменении режима работы радиопередатчика является важным моментом при разработке системы автоматического поиска оптимальных режимов радиопередатчиков. Автором предложено решение этих задач, изложенное в третьей главе данной работы.

В конце этой же главы приводится подробное описание предлагаемого метода — временного разделения переменных. При приме-

нении этого метода оптимизация функции со многими переменными приводится к оптимизации функции одной переменной и позволяет осуществить оптимизацию одноканальными системами оптимизации, простыми, дешевыми коммутирующими устройствами. Это существенно повышает надежность всей системы управления.

Предлагаемый метод поиска является промежуточным между методами градиента и Гаусса-Зайделя. Вся система управления, все блоки коммутаторов и метод поиска разработаны в ИАТ и опробованы на промышленных экземплярах радиопередатчиков.

В четвертой главе работы исследуется динамика поиска оптимальных режимов радиопередатчиков. Рассматривается траектория переходного процесса на плоскости $\alpha_{HK} \text{ } \partial \alpha_3$. Как известно, из допущенных предположений относительно поверхности

Q в пространстве режимов, подтвержденных экспериментально снятыми линиями равных мощностей на плоскости $\alpha_{HK} \text{ } \partial \alpha_3$, следует, что оси эллипсов на этой плоскости сдвинуты на некоторый угол. Этот угол определяется аналитически, если известны коэффициенты перед членами уравнения, определяющего зависимость между оптимизируемым и рассматриваемым параметрами.

Система автоматического поиска совершает целенаправленное движение до достижения на ней максимальной величины оптимизируемого параметра с заранее заданной точностью через некоторое время. Время и точность поиска, а также помехоустойчивость системы зависят от формы статических характеристик радиопередатчика, его динамических свойств, деформации этих характеристик во времени, величины постоянной времени интегрирующего звена, входного инерционного фильтра, длины шага и других расстраивающих передатчик воздействий.

Переходной процесс, как показано в работе, состоит из определенного числа туров, а каждый тур, в зависимости от метода поиска, может состоять из одного или нескольких шагов. Для срав-

нения подробно рассматриваются переходные процессы на плоскости $\alpha_{HK} \text{ } \partial \alpha_3$ при поиске методами Гаусса-Зайделя, градиента и временного разделения переменных. При этом движение системы при указанных методах начинается из одной и той же начальной точки на плоскости $\alpha_{HK} \text{ } \partial \alpha_3$.

Траектория переходного процесса при поиске методом временного разделения переменных, как это видно из рисунка, приведенного в четвертой главе диссертации, заключена между траекториями по методам Гаусса-Зайделя и градиента. В течение отведенного времени на одну переменную допускается неоднократное изменение знака приращения оптимизируемого критерия, что желательно при оптимизации показателей объектов, на которые воздействуют низкочастотные помехи. Последнее является основным недостатком при поиске методом Гаусса-Зайделя. В этой же главе дано определение и выведена формула для определения времени поиска. Так, например, при поиске оптимальной величины зависимости

$Q = f(\alpha_{HK}, \alpha_3)$ полное время поиска можно подсчитать по формуле:

$$T_0 = \frac{(-R)2}{C} \left[\frac{P}{(\Delta \alpha_{HK})^2} \sum_{n=2}^{\frac{\alpha_{HK} - \alpha_{HK0}}{\Delta \alpha_{HK}}} \frac{1}{2n-1} + \frac{Q}{(\Delta \alpha_3)^2} \sum_{n=1}^{\frac{\alpha_3 - \alpha_{30}}{\Delta \alpha_3}} \frac{1}{2n-1} \right],$$

где R и C — параметры интегрирующего звена,

P и Q — параметры парабол,

$\Delta \alpha_{HK}$, $\Delta \alpha_3$ — величины шагов,

α_{HK0} , α_{30} — начальное и

α_{HK} , α_3 — текущее значение соответствующих переменных,

n — количество шагов,

По выведенным соотношениям можно определить полное время поиска по каждой переменной, а также полное время поиска по всем переменным.

Приведенные соотношения

$$\varepsilon = Q_n(\alpha_{in}) - Q_n(2\Delta\alpha_i)$$

и

$$\Delta Q = \Delta Q_n = Q_n(\alpha_{in}) - Q_n(\Delta\alpha_i)$$

позволяют связать заключенные в интервале двух шагов автоколебания системы с величиной шага $\Delta\alpha_i$ и величиной допустимого отклонения оптимизируемого критерия от экстремума ε , чувствительность блока оптимизации ΔQ - с максимальным значением отклонения приращения в области допустимых значений отклонения от экстремума ΔQ_n . В четвертой главе рассмотрена также динамика объекта автоматического поиска - радиопередатчика. Радиопередатчик представлен последовательным соединением линейной инерционной и нелинейной безынерционной частей. Даются уравнения каждой части. Уравнения нелинейной части определяют статическую характеристику радиопередатчика. Деформация статической характеристики определяется введением некоторого члена $f t$. Имея уравнение линейной части, нелинейной части, инерционного фильтра, учитывая запаздывание и после некоторых математических операций приходим к довольно сложному закону движения объекта, который приводится к виду:

$$K \dot{\psi}(Q_{мвх}) \dot{Q}_{мвх} + Q_{мвх} = 0$$

(если пренебречь инерционностью фильтра).

В этом выражении:

K - коэффициент пропорциональности,

$Q_{мвх}, Q_{мвых}$ - мгновенное входное и выходное значения оптимизируемого параметра.

Для случая инерционного объекта первого порядка и сравнительно малой величины постоянной фильтра приводятся соотношения, по которым непосредственно можно вычислить траекторию переходного процесса.

В пятой главе работы приводятся результаты экспериментального исследования системы автоматического поиска, а также некоторые соображения относительно перспектив использования этой системы.

Разработанная система автоматического поиска оптимальных режимов радиопередатчиков была опробована на передатчиках Октябрьского передающего радиопункта Московской дирекции радиосвязи.

Система предназначалась для поддержания максимальной полезной мощности на выходе передатчика. При всех изменениях условий работы система автопоиска производила непрерывные изменения регулируемых параметров. Опыты показали, что наилучший эффект от использования системы автопоиска с временным разделением переменных получается при коэффициенте бегучести волны фидера передающего тракта, равного половине и выше. В работе сравнивается фазовая система с системой автопоиска. Приводятся преимущества и недостатки каждой.

Разработанная система управления может найти применение также и для автоматизации других видов радиопередатчиков.

С повышением мощности автоматизируемых радиопередатчиков повышается и экономическая эффективность применения системы автопоиска. Выигрыш в мощности, получаемый от автоматизации радиопередатчиков с применением системы автопоиска достигает 25% от номинальной мощности передатчика. Кроме того, высвобождается часть обслуживающего персонала передатчика.

В работе приводятся специальные требования, предъявляемые к системе автопоиска в связи с опробованием ее, и пути выполнения этих требований. Основными среди требований можно выделить требования к дрейфу интегрирующего звена. Даны математические соотношения для выбора сопротивления обратной связи в зависимости от значения предполагаемого дрейфа и постоянной времени интегратора. При выборе

параметров интегрирующего звена в соответствии с этими выражениями ложные срабатывания системы можно свести до минимума. Показано, что рабочие шаги системы автопоиска должны быть непостоянными по всему диапазону.

Приведенные здесь схемы управления исполнительными двигателями опробованы на реальных передатчиках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении можно отметить следующее из исследований, проведенных в диссертации:

1. Произведена классификация существующих систем автоматического управления настройкой, подстройкой и загрузкой радиопередатчиков.
2. Определен критерий оптимальности режимов работы радиопередатчика.
3. Изучены экспериментально и аналитически свойства и характеристики радиопередатчика — объекта автоматической оптимизации. Поверхность φ в пространстве режимов радиопередатчика исследована аналитически.
4. Рассмотрено прохождение через систему автопоиска стационарного белого шума. Получены соотношения, связывающие порог срабатывания интегратора, спектральную плотность, постоянную времени интегратора, величину шага и постоянную времени входного инерционного фильтра. Дана методика выбора наилучшей помехозащищенности системы автопоиска. Приведены формулы для расчета минимальной постоянной времени управляющей части.
5. Предложен метод автоматического поиска, основанный на временном разделении переменных.

6. Исследована динамика поиска оптимальных режимов радиопередатчиков. Рассмотрены траектории переходного процесса при различных методах автоматического поиска. Даны соотношения для определения времени поиска по " ρ " переменным.

7. Приведены соотношения, позволяющие связать автоколебания системы с величиной шага, величиной допустимого отклонения оптимизируемого критерия от экстремума и чувствительности блока оптимизации.

8. Рассмотрена динамика объекта автоматического поиска радиопередатчика. Приводятся соотношения для случая инерционного объекта первого порядка и сравнительно малой величины постоянной времени фильтра, по которым можно непосредственно вычислить траекторию переходного процесса.

9. Разработаны предполагаемые блок-схемы управления радиопередатчиком для телеграфного и телефонного режимов, а также электрическая схема системы автопоиска.

10. Приведены результаты экспериментального исследования, опробования на реальных передатчиках и некоторые соображения относительно перспектив использования разработанной системы. Использование разработанной системы автоматической подстройки радиопередатчика дает выигрыш в мощности радиопередатчиков, достигающий 25% от их номинальной мощности.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. О самонастраивающейся системе управления режимом работы радиопередатчика. Известия АН СССР. Отделение технических наук, Энергетика и автоматика, № 6, 1961 г.
2. Системы автоматического управления настройки радиопередатчиков. Известия АН УзССР, серия технических наук, № 6, 1961 г.

3. Системы автоматического управления подстройкой и загрузкой радиопередатчиков. Известия АН УзССР, серия технических наук, № 1, 1962 г.
4. О возможности использования экстремальной системы для автоподстройки и автозагрузки радиопередатчиков. Известия АН УзССР, серия технических наук, № 2, 1962 г.
5. О принципе построения самонастраивающейся системы управления режимом работы радиопередатчика. Известия АН УзССР, серия технических наук (в печати).
6. Об одном методе автоматического поиска экстремума функции многих переменных. Известия АН УзССР, серия технических наук, № 4, 1963 г.
7. О динамике поиска оптимальных режимов радиопередатчиков, Известия АН УзССР, серия технических наук (в печати).
8. Самонастраивающиеся системы управления и их применение для автоматизации производственных процессов. Издательство АН УзССР (на узбекском языке), 1963 г.