

А.В. Сгибнев, П.В. Круглов

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЬНЫХ, ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РАБОТ ПОСЛЕ СБОРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Изложены основные принципы автоматизации операций регулировки, контроля и испытаний автоматических систем (АС). Описаны возможные структурные схемы устройств для автоматической настройки АС. Предложены методы поиска экстремального значения показателя качества АС при ее настройке и регулировке.*

**E-mail: cm12@sm.bmstu.ru**

**Ключевые слова:** регулировка, настройка, испытания, контроль.

Важными этапами производства АС являются сборка и испытания. На этих этапах проводятся операции регулировки, контроля и испытаний. В связи с тем что объем работ на участке регулировки АС обычно определяет общую трудоемкость изготовления системы, повышение производительности труда регулировщика приобретает особое значение. Кроме того, здесь особенно важна объективность исполнителя, а характер работы регулировщика и испытателя при ручных методах работы отличается субъективностью. Наконец, как и в других производствах, автоматизация позволяет получить качественно новые эффекты, которых невозможно достичь при ручном труде. Проблема при этом разделяется на две: на ранней стадии освоения АС данного типа ставится вопрос о механизации и об автоматизации наиболее трудоемких, но достаточно простых операций, затем решается вопрос о комплексной автоматизации всего процесса регулировки или проверки параметров [1].

В первую очередь удастся автоматизировать работы, состоящие из большого числа операций, требования к которым формулируются достаточно просто. Сюда относятся: электрические и климатические (температурные) испытания, проверка параметров, связанных с измерениями в последовательных точках или записью.

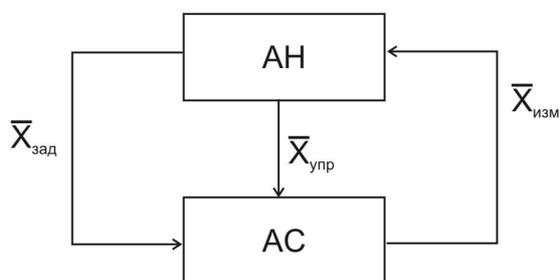
Наиболее распространены автоматы для проведения электрических испытаний. В универсальных автоматах испытуемый прибор подключается специальными кабелями. Каждая выходная цепь идентифицируется с одной из входных цепей автомата испытателя. Информацию о цепях, которые необходимо испытать, о напряжениях, токах и сопротивлениях вводят с помощью того или иного носителя, установку включают, и весь процесс проверки идет автоматически. Результат индицируется или печатается.

Климатические испытания (без измерения параметров или с ограниченными измерениями) также часто автоматизируют. Температуру, влажность и давление изменяют по заданной программе.

Примером параметра, изменение которого удается автоматизировать, служит момент сопротивления. Специальная следящая система создает равномерное медленное вращение оси, момент на которой измеряется электрическим способом. Результат регистрируется с помощью самописца. Проверка одной оси при углах поворота  $\pm 90^\circ$  занимает до 30 мин.

Рассмотрим принципы автоматизации регулировки. Система автоматической регулировки является оптимальной (экстремальной), близкой к самонастраивающейся. Объектом служит настраиваемая АС, а регулятором — автоматический оптимизатор. Отдельную регулировочную операцию автоматизировать нецелесообразно по следующим соображениям. Во-первых, самонастраивающаяся система является достаточно сложной и дорогостоящей, применять ее только для регулировки одного параметра невыгодно, и лучше за счет небольших усложнений организовать комплексную автоматизацию регулировки. Во-вторых, регулировки параметров АС взаимосвязаны, и часто требуется дополнительная регулировка после выполнения последующих операций. В-третьих, пооперационная автоматизация не дает значительного экономического эффекта, поскольку переход от операции к операции связан с большой потерей времени.

Такой подход предполагает, что регулировки, осуществляемые автоматически, всегда являются комплексными в определенном ранее смысле: регулировку проводят при включенной АС и контролируют параметры настраиваемой АС. В простейшем виде структурная схема системы настройки представлена на рис. 1. По отношению к АС  $\bar{X}_{\text{зад}}$  — совокупность управляющих или возмущающих воздействий,  $\bar{X}_{\text{изм}}$  — совокупность выходных величин или фазовых координат АС,  $\bar{X}_{\text{упр}}$  — совокупность регулируемых параметров. Поскольку цель регулировки формулируется как достижение опреде-



**Рис. 1. Структурная схема системы настройки**

ленных свойств АС, систему автоматической настройки (САН) можно считать самонастраивающейся. Если бы автомат-настройщик (АН) был встроенным и считался частью АС, то это была бы самонастройка по определению.

Регулировку можно организовать двумя принципиально разными путями.

1. В связи с тем что регулировка проводится вручную, можно по очереди изменять каждый из регулируемых параметров, добиваясь, чтобы при определенном входном воздействии одна из выходных величин вошла в заданное поле допуска.

2. Контролировать некоторые обобщенные характеристики АС, добиваясь их максимального приближения к заданным значениям, причем последовательность изменения регулируемых параметров выбирается в процессе настройки.

Первый путь неприемлем практически по тем же соображениям, что и пооперационная автоматизация. Второй путь означает в общем случае, что автоматическая настройка должна осуществлять оптимальную регулировку.

Таким образом, САН является оптимальной самонастраивающейся системой. Показатели качества формируются из измеренных величин  $\bar{X}_{\text{изм}}$  и некоторых заданных, например требуемых характеристик. Эти характеристики могут носить простейший, частный характер, например: показатель колебательности, частотная характеристика и т. п. Однако вероятно формирование более общего показателя, в который с определенным значением входят несколько частных показателей.

Возможны два случая настройки: 1) когда известна зависимость между выходными характеристиками АС и регулируемыми параметрами; 2) когда такая зависимость не задана.

В первом случае можно осуществить аналитическую настройку. Например, в число регулируемых входят только параметры корректирующего контура, и требуется обеспечить заданную частотную характеристику. При этом систему можно считать линейной и, следовательно, известна зависимость между параметрами контура и частотной характеристикой. Тогда, сняв экспериментальную частотную характеристику, можно сказать, какие из параметров контура, в каком направлении и насколько необходимо изменить. Строго говоря, такую зависимость на практике нельзя установить из-за невозможности учета влияния всех факторов. Если такая зависимость и существует, то она слишком сложна. Во втором случае для обеспечения настройки необходимо выработать алгоритм поиска минимума или максимума показателя качества.

Рассмотрим аналитическую настройку. В простейшем случае существует взаимно однозначная связь между каждым из регулируемых параметров и одним из показателей качества. При этом САН вырождается в обычную систему — многомерную, но несвязанную. Используются простейшие показатели качества  $Q_i$  — ошибки по координатам  $X_{измi}$  по отношению к заданным величинам  $X_{уст}$  (рис. 2).

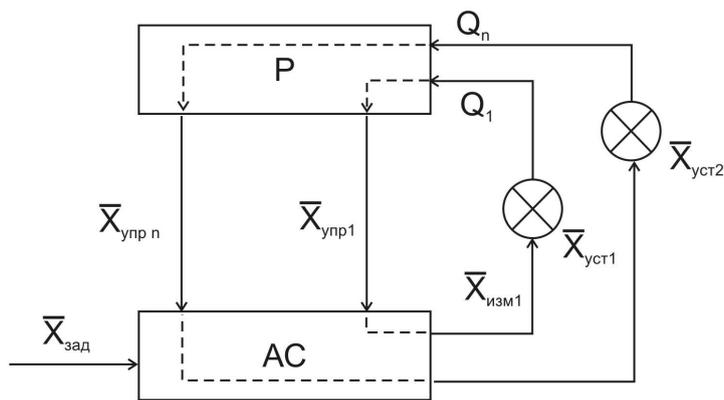


Рис. 2. Структурная схема аналитической системы настройки АС

От системы такого вида не требуется, чтобы она обладала возможностями оптимального управления. На практике этот случай вряд ли может встретиться. Кроме того, что параметры всегда связаны между собой и нельзя систему разделить на  $n$  каналов, показатели качества также не имеют простейшего вида. Обычно качество определяется функционалами, значение которых зависит от нескольких координат.

Простейший показатель качества — это ошибка показателя качества. Он вводится только для несвязанной системы:

$$Q_i = |X_{устi} - X_{измi}| = |\varepsilon_i|.$$

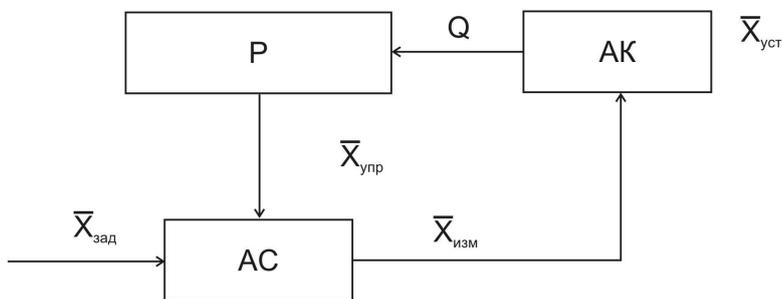
Более сложные показатели качества (дифференциальный и интегральный) определяются формулами

$$Q = \varepsilon + a \frac{d\varepsilon}{dt} + b \frac{d^2\varepsilon}{dt^2};$$

$$Q = \int_0^{\infty} t \varepsilon^2 dt; \quad Q = \bar{\varepsilon}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon^2 dt,$$

где  $\varepsilon$  — ошибка;  $a, b$  — эмпирические коэффициенты;  $t$  — продолжительность испытаний;  $\bar{\varepsilon}$  — интегральный критерий ошибки;  $T$  — длительность жизненного цикла.

На практике САН является многосвязной системой со структурой, представленной на рис. 3, где  $P$  — регулятор; АК — анализатор качества, который формирует обобщенный показатель качества  $Q$  по  $\bar{X}_{\text{изм}}$  и  $\bar{X}_{\text{уст}}$ . Многосвязность определяется не только тем, что нет однозначной зависимости между компонентами векторов  $\bar{X}_{\text{изм}}$  и  $\bar{X}_{\text{упр}}$ , но и тем, что  $Q$  формируется как функционал от всех компонент  $\bar{X}_{\text{изм}}$  и  $\bar{X}_{\text{уст}}$ .



**Рис. 3. Структура системы автоматической настройки АС с анализатором качества**

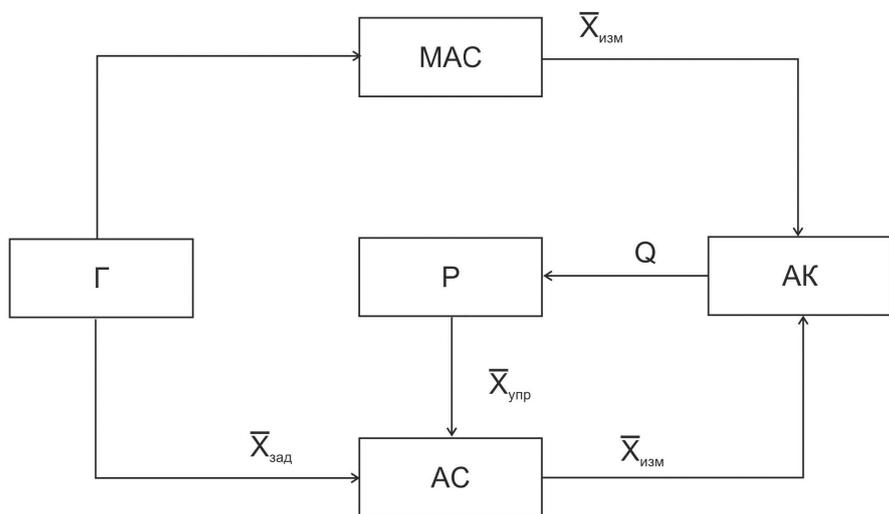
В качестве компонент  $\bar{X}_{\text{уст}}$  могут быть заданы частотные и переходные характеристики, постоянные величины и их комбинации. Регулятор такой системы является автоматическим оптимизатором, который осуществляет управление, минимизирующее показатель качества  $Q$ .

Разделение на два блока — АК и  $P$  — условно. Между ними существует более сложная связь, и они представляют собой части одного устройства.

В еще более общем случае вектор  $\bar{X}_{\text{уст}}$  не задается жестко, а формируется в процессе настройки в устройстве, которое является моделью автоматической системы (МАС). Построенная таким образом САН является наиболее общим случаем систем с аналитической самонастройкой (рис. 4), где  $\Gamma$  — генератор тестов.

Предыдущие схемы можно считать частными случаями.

Показатель качества формируется АК по результатам сравнения  $\bar{X}_{\text{изм}}$  с аналогичной величиной на выходе МАС. Схема также имеет блоки управления и индикации, синхронизатор и др. Модель может быть аналоговой или цифровой и представляет собой динамическое звено, в необходимой степени имитирующее АС. В простейшем случае — это перестраиваемое устройство, которое управляется центральным устройством и имеет обратную связь по результатам

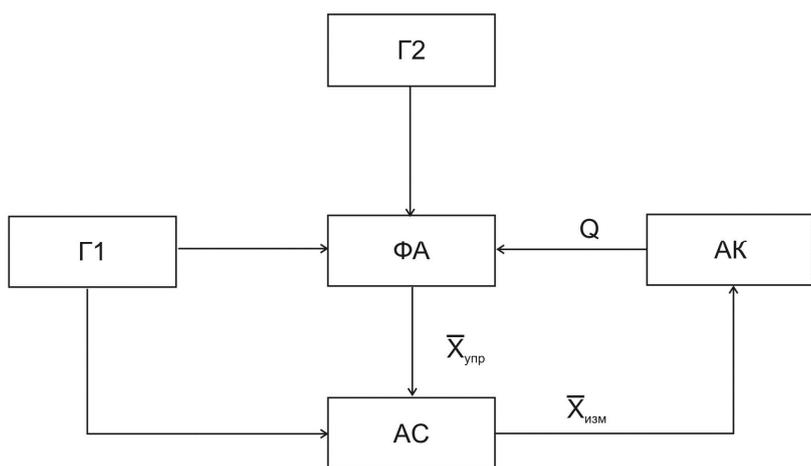


**Рис. 4. Структура системы автоматической настройки АС с аналитической самонастройкой**

управления (настройки), или пассивная цепь. При этом МАС может работать в указанном масштабе времени, «проигрывая» различные варианты управления настройкой.

Если зависимости между показателем качества и настраиваемыми параметрами неизвестны, то взамен аналитической САИ применяют систему с поисковыми алгоритмами (рис. 5). Алгоритмы поиска разрабатывают с учетом того, что показатель качества является функцией настраиваемых параметров:

$$Q = Q(X_{упр1}, X_{упр2}, \dots, X_{упрл}).$$



**Рис. 5. Структура системы автоматической настройки АС с поисковыми алгоритмами**

Варьируя определенным образом значения  $X_{\text{упр}}$ , отыскивают экстремум  $Q$ . Для этого в САН вводится устройство формирования алгоритма (ФА) настройки. Кроме того, в САН наряду с генератором тестов (Г1) вводят генератор поискового сигнала (Г2), который в некоторых случаях содержит генератор случайных сигналов.

Экстремуму показателя качества будет соответствовать равенство нулю частных производных  $Q$  по  $X_i$ :

$$\frac{dQ}{dx_1} = \frac{dQ}{dx_2} = \dots = \frac{dQ}{dx_n} = 0.$$

В пространстве параметров  $X$  можно определить вектор

$$\text{grad } Q = a_1 \frac{dQ}{dx_1} + a_2 \frac{dQ}{dx_2} + \dots + a_n \frac{dQ}{dx_n},$$

где  $a_1, \dots, a_n$  — единичные векторы по соответствующим осям.

Точка экстремума реализуется при  $\text{grad } Q = 0$ .

По значению  $\text{grad } Q$  можно судить о близости точки экстремума. Для ее поиска существует несколько методов — как регулярных, так и статистических. Наиболее часто используют следующие методы.

Метод Гаусса—Зайделя состоит в поочередном отыскании экстремума  $Q$  по одному параметру, когда остальные параметры фиксированы. После отыскания частного экстремума по очередному параметру его значение фиксируется, а варьируется следующий параметр. После первого прохода по всем параметрам процесс повторяется до тех пор, пока не будет найден экстремум.

Метод градиента предусматривает одновременное изменение всех параметров  $X$  со скоростями, пропорциональными частным производным показателя качества по соответствующему параметру:

$$\frac{dX_i}{dt} = b_i \frac{dQ}{dx_i}.$$

Метод сканирования (полного поиска) заключается в последовательном переборе всех допустимых значений  $X_i$ . При этом запоминается наименьшее из полученных значений  $Q$ .

Метод Монте-Карло — один из статистических методов. При поиске вектор  $X_i$  изменяется случайным образом до тех пор, пока не будет найдено допустимое значение  $Q$ .

Генетические алгоритмы используют для поиска глобального экстремума  $Q$  и позволяют его находить, применяя механизмы воспроизведения, скрещивания и мутации [2, 3].

**Выводы.** Показано, что при регулировке АС необходимо применять аналитическую САН, если зависимости между показателем ка-

чества и настраиваемыми параметрами неизвестны. Если такие зависимости известны, то следует использовать систему с поисковыми алгоритмами. В зависимости от вида искомой функции целесообразно применять генетические алгоритмы, методы градиента или сканирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проверка, регулировка и испытания автоматических систем / А.В. Сгибнев, С.С. Корнеев, В.М. Корнеева и др.; Под ред. А.В. Сгибнева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 44 с.
2. Евгенийев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 334 с.
3. Круглов П.В., Цебро Ю.А. Исследование возможностей генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач технологии машиностроения // Актуальные проблемы технологии современного машиностроения: Тез. докл. науч.-техн. конф. – М., 2000. – С. 27–28.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012