

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

На правах рукописи

ВАН СИНЬ-МИНЬ

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА
НА ЭЛЕМЕНТАХ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель —
*Доктор технических наук,
профессор Я. З. ЦЫПКИН.*

Москва 1960 г.

192354

Центральная научная
библиотека
Академии наук Украинской ССР

ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация и коррекция систем автоматического регулирования являются одними из основных вопросов теории и техники автоматического регулирования.

В последние годы для стабилизации и улучшения динамических качеств систем автоматического регулирования начинает применяться фильтр на элементах запаздывания (ФЭЗ).

ФЭЗ представляет собой линейное устройство, позволяющее запоминать сигналы на некоторые интервалы времени и воспроизводить их в виде суммы этих сигналов в данный момент и в прошедшие моменты с различными весами. Передаточная функция простейшего ФЭЗ выражается в следующем виде:

$$D^*(p) = a_0 + a_1 e^{-pT} + \dots + a_n e^{-npT} \quad (1),$$

где T — время задержки каждого элемента запаздывания, a_0, a_1, \dots, a_n — параметры ФЭЗ и n — порядок фильтра, характеризующий число элементов запаздывания. Для ФЭЗ с обратной связью передаточная функция имеет вид:

$$D^*(p) = \frac{a_0 + a_1 e^{-pT} + \dots + a_n e^{-npT}}{1 + b_1 e^{-pT} + \dots + b_n e^{-npT}} \quad (2),$$

где a_0, a_1, \dots, a_n и b_1, \dots, b_n — параметры ФЭЗ.

По сравнению с обычными корректирующими устройствами ФЭЗ имеет ряд преимуществ: универсальность устройства, гибкость в подборе его параметров и в наладке, удобство синтеза фильтра по заданной импульсной характеристике и т. д. Эти свойства позволяют с помощью ФЭЗ решить ряд задач в технике автоматического регулирования, электросвязи, радиолокации, телевидения, а также в других областях техники.

Эффективное применение ФЭЗ в системах автоматического регулирования требует решения ряда задач, к числу которых относятся следующие:

1. Определение условий применимости ФЭЗ в замкнутых системах автоматического регулирования;

2. Разработка способа коррекции автоматических систем при помощи ФЭЗ и схем его включения, а также расчет параметров ФЭЗ, при которых обеспечиваются заданные показатели качества процесса регулирования.

Этим задачам посвящена данная работа. В работе также приведена экспериментальная проверка разработанных методов коррекции на моделирующей установке.

Работа содержит три главы и приложение.

В первой главе рассматривается применение ФЭЗ в системах автоматического регулирования в качестве последовательно соединенного корректирующего устройства.

Вторая глава посвящена коррекции систем автоматического регулирования с целью получения конечного времени переходного процесса.

В третьей главе рассматривается компенсация влияния запаздывания на процесс регулирования в непрерывных автоматических системах.

В приложении дается краткий обзор принципов и практических схем реализации ФЭЗ на различных элементах запаздывания.

1. Коррекция непрерывных систем автоматического регулирования

В работе рассматривается применение ФЭЗ в качестве последовательно соединенного корректирующего устройства к неизменяемой части системы.

При коррекции систем автоматического регулирования на передаточную функцию корректирующего ФЭЗ следует наложить некоторые ограничения. Ряд ограничений вытекает из требований «грубости» скорректированной системы. Небольшое изменение параметров ФЭЗ или неизменяемой части системы должно вызывать небольшое пропорциональное изменение показателей качества процесса регулирования и не должно приводить к нарушению устойчивости системы. Эти ограничения будем называть условиями применимости ФЭЗ. В работе показано, что система автоматического регулирования, содержащая корректирующий ФЭЗ, будет «грубой» тогда и только тогда, когда удовлетворяются следующие условия применимости:

1. Передаточная функция ФЭЗ должна иметь полюсы только с отрицательной действительной частью;

2. Передаточная функция ФЭЗ не должна иметь ни одного нуля, нейтрализующего в передаточной функции неизменяемой части системы полюс с неотрицательной действительной частью или находящийся близко от мнимой оси.

В работе рассмотрены четыре группы способов расчета параметров корректирующего ФЭЗ:

1. Расчет по способу коррекции разомкнутой системы — неизменяемой части;

2. Расчет по методу Брауде;

3. Графический метод расчета;

4. Расчет по приближению к заданной передаточной функции.

При расчете ФЭЗ по способу коррекции разомкнутой системы параметры ФЭЗ должны быть сначала выбраны так, чтобы в окрестности точки $\omega=0$ удовлетворялось следующее соотношение:

$$|D^*(j\omega) K(j\omega)| \approx 1$$

для статической системы или соотношение

$$|j\omega D(j\omega) K(j\omega)| \approx 1$$

для астатической системы, где $D^*(j\omega)$ и $K(j\omega)$ — амплитудно-фазовые характеристики корректирующего ФЭЗ и неизменяемой части системы. Такой выбор параметров ФЭЗ может быть проведен по частотной характеристике, по временной характеристике или по передаточной функции неизменяемой части системы [1—2]. Затем коэффициент усиления системы должен быть выбран оптимальным по условию наименьшего отклонения амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$ замкнутой системы от значения $A(0)$ в окрестности точки $\omega=0$.

Расчет ФЭЗ по методу Брауде основан на разложении в ряд Тейлора в окрестности точки $\omega=0$ частотной характеристики замкнутой системы автоматического регулирования. В работе рассматривается метод расчета ФЭЗ исходя из того, что амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ скорректированной системы наименьшим образом уклонялась от значения $A(0)$ в области $\omega=0$. Определенные таким образом параметры ФЭЗ соответствуют большей полосе пропускания частот в скорректированной системе и, следовательно, более быстрому процессу регулирования, чем параметры ФЭЗ, определенные по способу коррекции разомкнутой системы.

Графический метод расчета корректирующего ФЭЗ основан на изменении амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы автоматического регулирования при помощи включения ФЭЗ. В работе разработаны специальные круговые диаграммы, при помощи которых можно легко определить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики замкнутой системы регулирования по обратной амплитудно-фазовой характеристике неизменяемой части системы. Применение этих круговых

диаграмм позволяет весьма просто определить параметры ФЭЗ. Следует отметить, что при таком методе расчета ФЭЗ не обязательно знать выражение передаточной функции неизменяемой части системы. Накладывая на круговые диаграммы экспериментально снятую обратную амплитудно-фазовую характеристику неизменяемой части системы, легко определить параметры корректирующего ФЭЗ, которые обеспечивают заданные качества регулирования системы. Поэтому этот метод расчета оказывается наиболее удобным в ряде практических случаев.

Последняя группа метода расчета ФЭЗ основана на приближении передаточной функции. При таком методе расчета параметров ФЭЗ передаточная функция корректирующего устройства должна быть сначала определена каким-то обычным способом в соответствии с заданными техническими качествами. Затем она аппроксимируется при помощи ФЭЗ. В работе рассмотрены два способа аппроксимации передаточной функции: 1) метод совпадения нулей и полюсов, при котором нули и полюса передаточной функции корректирующего ФЭЗ совпадают с нулями и полюсами требуемой передаточной функции в полюсе $-\frac{\pi}{T} < \text{Im } p \leq \frac{\pi}{T}$ плоскости комплексной переменной p , где время задержки T каждого элемента запаздывания ФЭЗ должно быть выбрано достаточно малым; 2) метод разложения передаточной функции в ряд по степеням p , при котором передаточные функции ФЭЗ и требуемого корректирующего устройства имеют одинаковые первые члены в рядах разложения. Этот метод расчета ФЭЗ удобен в том, что он позволяет синтезировать ФЭЗ по таким важным показателям, как время переходного процесса, величина перерегулирования, коэффициенты ошибок и т. д.

Каждый метод расчета иллюстрируется примерами с неизменяемой частью системы до 3-го порядка.

Следует заметить, что при наличии помех во входном сигнале ФЭЗ при надлежащем выборе параметров может обеспечить лучший дифференцирующий эффект, чем идеальное дифференцирующее звено и пассивный дифференцирующий контур, которые имеют большее усиление в области высоких частот, чем ФЭЗ. В работе показано, что если спектор помех концентрируется в окрестности частоты f_1 , то при выполнении условия

$$f_1 T = k, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots,$$

помеха проходит через ФЭЗ с наибольшим затуханием.

Следует также отметить, что при применении ФЭЗ вероятность попадания системы в зону насыщения меньше, чем при применении других дифференцирующих устройств. Это связано с тем, что временная характеристика ФЭЗ имеет меньший

выброс и является менее растянутой во времени, чем характеристика других.

Наконец ФЭЗ отличается от других корректирующих устройств гибкостью в отношении изменения параметров, и наладка системы автоматического регулирования сводится к изменению уставки некоторых потенциометров в ФЭЗ.

2. Получение конечного времени переходного процесса в непрерывных системах автоматического регулирования

Применение ФЭЗ позволяет получить конечное время переходного процесса в непрерывных системах автоматического регулирования. Такой способ коррекции основан на нейтрализации полюсов корректируемой системы нулями ФЭЗ.

В работе показано, что коррекция переходного процесса, вызванного управляющим воздействием, может быть осуществлена последовательным соединением ФЭЗ разомкнутого типа с числом n элементов запаздывания, равным порядку корректируемой системы (при этом предполагается, что разность мнимых частей любых двух полюсов не кратна $2\pi/T$). Параметры ФЭЗ должны быть выбраны так, чтобы его передаточная функция (1) имела нули, нейтрализующие все полюсы системы. При этом, если числитель передаточной функции корректирующей системы равен постоянной величине, то переходный процесс в скорректированной системе при достаточно малом значении T ФЭЗ протекает без перерегулирования и устанавливается за конечный интервал времени nT . Если числитель передаточной функции корректируемой системы представляет собой многочлен по p , то переходный процесс скорректированной системы может иметь перерегулирование, хотя время переходного процесса остается конечным.

Влияние слагаемых в числителе передаточной функции корректируемой системы может быть полностью устранено при помощи последовательно соединенного фильтра с сосредоточенными параметрами, передаточная функция которого имеет полюсы нейтрализующие все нули с отрицательной, действительной частью передаточной функции корректируемой системы. В ряде случаев оказывается удобным использовать ФЭЗ замкнутого типа для нейтрализации нулей передаточной функции корректируемой системы. Следует отметить, что при такой коррекции передаточная функция скорректированной системы будет иметь множество полюсов, которые отличаются от нулей передаточной функции корректируемой системы на величину $j \frac{2k\pi}{T}$, где $k = \pm 1, \pm 2, \dots$. Путем выбора достаточно малого значения T влияние этих множеств полюсов можно сделать

достаточно малым и практически получить конечное время переходного процесса.

Коррекция переходного процесса, вызванного возмущающим воздействием, может быть осуществлена таким же путем, как коррекция процесса, вызванного управляющим воздействием, если последовательное включение ФЭЗ в точке приложения возмущения выполнимо. В противном случае следует внести ФЭЗ внутрь контура регулирования. Внесенный ФЭЗ должен по величинам, характеризующим состояние системы, вычислять и осуществлять корректирующее воздействие в точке приложения возмущения. В работе разработана методика определения структуры и параметров внесенного ФЭЗ, который представляет собой фильтр разомкнуто-замкнутого типа.

В качестве примера рассматривается коррекция колебательной системы второго порядка, безразмерный коэффициент демпфирования которой равен $\xi=0,3$. Переходный процесс в некорректированной системе имеет перерегулирование $\delta=37\%$, а время переходного процесса равно $1,6 T_0$, где T_0 — период колебания переходного процесса. Корректирующий ФЭЗ был определен исходя из условия установления переходного процесса за время $0,5 T_0$ при отсутствии перерегулирования. Экспериментальное исследование на моделирующей установке подтверждает разработанный метод коррекции.

В работе приведены методы расчета корректирующего ФЭЗ при наличии дополнительных требований: заданные значения коэффициентов ошибок скорректированной системы, минимальное значение интегральной квадратической оценки. Рассмотрен также случай, когда система автоматического регулирования находится под влиянием случайных воздействий.

3. Компенсация влияния запаздывания в непрерывных системах автоматического регулирования

В работе рассматривается метод устранения вредного влияния запаздывания на характер процесса регулирования в непрерывных автоматических системах.

Идея метода компенсации состоит во введении в систему автоматического регулирования внутренней цепи, которая по имеющимся величинам, характеризующим состояние системы, формирует дополнительный сигнал обратной связи, равный разности между компенсируемой системой без и с элементом запаздывания. Таким образом, процесс в скомпенсированной системе отличается от процесса в системе без элемента запаздывания лишь смещением по времени на величину, равную времени запаздывания. Такая цепь дополнительной связи состоит из двух частей: минимально-фазовой модели неизменяемой части

системы и ФЭЗ с передаточной функцией $1-e^{-p\tau}$, где τ — время запаздывания системы.

Рассмотрено влияние изменения параметров системы на результат компенсации. Если изменение слишком сильно, то можно осуществить автоматическую подстройку параметров системы. В работе приведена и проверена на моделирующей установке схема подстройки коэффициента усиления системы.

В ряде практических случаев оказывается возможным использовать РС—цепочку аппроксимирующую ФЭЗ, для реализации компенсации влияния запаздывания. Показано, что РС — цепочка с передаточной функцией

$$K_4(p) = \frac{p\tau}{1+0,5p\tau} \quad (3)$$

может быть использована вместо ФЭЗ с передаточной функцией $1-e^{-p\tau}$ для осуществления компенсации в системе, время запаздывания τ которой меньше значения $\frac{1}{\omega_n}$, где ω_n — интервал положительности вещественной разомкнутой характеристики системы без элемента запаздывания. Для $\omega_n\tau \leq 2$ можно использовать РС — цепочку с передаточной функцией:

$$K_4(p) = \frac{12p\tau}{12+6p\tau+p^2\tau^2} \quad (4);$$

а для случая $\omega_n\tau \leq 3$,

$$K_4(p) = \frac{2p\tau(p^2\tau^2+60)}{120+60p\tau+12p^2\tau^2+p^3\tau^3} \quad (5)$$

Разработаны схемы реализации этих функций $K_4(p)$ на РС элементах. Эти схемы могут быть использованы для получения значения τ до нескольких секунд. Для еще большего значения τ удобно использовать пневматические элементы.

Таким образом, компенсацию влияния запаздывания в системах автоматического регулирования можно осуществить следующим образом: провести коррекцию системы без учета запаздывания; определить интервал положительности вещественной характеристики разомкнутой системы и ввести РС — цепочку дополнительной связи, которая состоит из минимально-фазовой модели неизменяемой части системы и части с передаточной функцией $K_4(p)$. Если $\omega_n\tau \leq 1$, то можно выбирать функцию по выражению (3); если $\omega_n\tau \leq 2$, — по выражению (4) и если $\omega_n\tau \leq 3$, — по выражению (5).

При компенсации системы с элементом запаздывания не всегда имеет смысл добиться полного устранения влияния

запаздывания. При надлежащем выборе параметров РС — цепочки процесс в скорректированной системе может быть сделан лучшим, чем процесс в системе без элемента запаздывания. В работе рассмотрены два способа выбора параметров РС — цепочки: 1) метод степени устойчивости, позволяющий ближайшему к мнимой оси корню характеристического уравнения системы обладать наибольшим возможным абсолютным значением вещественной части; 2) метод Брауде, обеспечивающий амплитудно-частотную характеристику замкнутой системы, наименьшим образом уклоняющуюся от единицы в окрестности точки $\omega=0$.

Эксперименты по компенсации влияния запаздывания при помощи РС — цепочки и выбору ее оптимальных параметров, проведенные на моделирующей установке, подтвердили теоретически предсказанную возможность. В работе приведено также сравнение описанного метода компенсации с иными методами в режиме стабилизации. Показано, что данный метод компенсации обещает лучшие качества процесса, чем применение обычных регуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено применение ФЭЗ для улучшения динамических свойств непрерывных систем автоматического регулирования.

Основные полученные результаты сводятся к следующему:

1. Получены условия применимости ФЭЗ в непрерывных системах автоматического регулирования. Для того, чтобы скорректированная система была «грубой», передаточная функция корректирующего ФЭЗ должна иметь полосы только с отрицательной действительной частью и нули, которые не совпадают с полюсами передаточной функции неизменяемой части с неотрицательной действительной частью или находящимися близко от мнимой оси комплексной плоскости.

2. Рассмотрены различные способы расчета параметров ФЭЗ, представляющего собой последовательное корректирующее устройство автоматических систем. Показано, что по сравнению с обычными корректирующими устройствами ФЭЗ является более помехоустойчивым, менее склонен привести систему к насыщению, более удобен при наладке системы и т. д.

3. Изложен способ коррекции систем автоматического регулирования с целью получения конечного времени переходного процесса. Показано, что для коррекции процесса, вызванного управляющим воздействием, достаточно применять последовательно соединенный корректирующий ФЭЗ разомкнутого или замкнутого типа, а для коррекции процесса, вызванного возмущающим воздействием, следует включать внутрь контура регу-

лирования ФЭЗ замкнуто-разомкнутого типа (для случая, где последовательное соединение ФЭЗ на нагрузке невыполнимо). Приведены методы расчета ФЭЗ при наличии дополнительных условий: заданные значения коэффициентов ошибок, минимальное значение интегральной квадратической оценки. Рассмотрен также метод расчета, когда система автоматического регулирования находится под влиянием случайных воздействий.

4. Описан метод компенсации влияния запаздывания в непрерывных системах автоматического регулирования. Показано, что в следящем режиме применение РС — цепочки можно получить полную компенсацию запаздывания или даже лучший переходный процесс, чем в системе без запаздывания. В режиме стабилизации применение РС — цепочки позволяет обеспечить лучшие качества регулирования, чем применение обычных регуляторов. Разработаны методы расчета РС — цепочки.

Результаты работы были опубликованы в статьях [3, 4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ford D. G., Calvert G. F., The application of short-time memory devices to compensator design, Transaction AIEE pt. II, 1954.
2. Гуков В. И., Применение ступенчатых фильтров для коррекции переходных процессов в линейных системах, Радиотехника, № 7, 1957.
3. Ван Синь-минь, Коррекция непрерывной системы автоматического регулирования при помощи фильтра на элементах запаздывания, А и Т, № 4, 1959 г.
4. Ван Синь-минь, Получение конечного времени переходного процесса в непрерывных системах автоматического регулирования, Сборник по автоматике и телемеханике, Издательство АН СССР, Москва, 1960.

Т10535 10/VIII—60 г.

Заказ 207

Тираж 250

3-я типография Изд-ва Академии наук СССР, Москва, Н.-Басманная, 23.