МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО и СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Г.И.ГАТЕВ

На правах рукописи

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

(№ 255 - техническая кибернетика)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1968 г.

Системы управления с использованием ЦВМ становятся одними из наиболее эффективных средств решения сложных задач автоматизации современных производственных процессов. Большинство этих машин осуществляет задачи управления путем изменения заданий аналоговых регуляторов, в соответствии с математическим описанием процесса и критерием управления.

В системах непосредственного цифрового управления / НЦУ /, применение которых намечается в последние годы, аналоговые регуляторы заменяются ЦВМ, выполняющей их функцию.

Использование ЦВМ в системах НЦУ сопряжено с рядом трудностей теоретического и технического характера. Теоретические трудности связаны с определением программ работы управляющей ЦВМ, а технические - с разработкой устройств связи ЦВМ с управляемым процессом.

Получившая существенное развитие за последние годы теория импульсных систем дает новые идеи и методы построения систем НЦУ. Эти методы позволяют решать задачу синтеза оптимальных систем - в ряде случаев на базе простых программ ЦВМ - и, тем самым, обеспечивать значительное повышение качества переходных процессов и эффективности всей системы управления.

Настоящая работа посвящена задачам синтеза и исследованию показателей качества оптимальных систем управления, и обоснованию целесообразности их применения.

Диссертация состоит из введения, шести глав с отдельными выводами по каждой из них, заключения, приложений и библиографии. Работа выполнена на кафедре автоматики и телемеханики Московского ордена Ленина Энергетического института.

В введении описаны главные проблемы и тенденции развития систем НЦУ и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Теория регулирования с помощью ЦВМ развивается на основе теории импульсных систем регулирования. Основными в этом направлении являются работы Я.З.Цыпкина, Джури, Ту, Рагаццини и Франклина, Волгина и др.

Количество работ, обосновывающих выбор законов регулирования, невелико. В работах Е.К.Круг исследовались динамические свойства систем с различными регуляторами непрерывного и дискретного действия. На основании требований максимальной надежности и низкой стоимости, в этих работах рекомендовался "классический" ПИ закон регулирования.

Выбор интервала повторения из условия приближения свойств дискретной системы к свойствам ее непрерывной части и применение ПИ или ПИД закона рекомендуется также Ротачем, и в публикациях Маркса, Кендалла, Ли, Кокса, Кларка и др., посвященных общим принципам построения систем НЦУ. В некоторых более новых работах число используемых законов увеличено добавлением алгоритмов каскадного регулирования и регулирования соотношения, компенсации запаздывания, и адаптивной настройки параметров ПИД закона, в соответствии с изменениями характеристик объектов.

В работах Стрейца и его сотрудников синтезированы алгоритмы, обеспечивающие автономное регулирование и процессы конечной длительности в многопараметровых "гибридных" системах / в которых работа ЦВМ резервируется аналоговыми регуляторами/.

По отношению к машинам, отмечается тенденция к использованию более сложных, даже универсальных ЦВМ с тем, чтобы они могли осуществлять дополнительные функции управления при тех же самых параметрах надежности и при небольшом увеличении стоимости.

В связи с рассмотренными функциями и тенденциями возникают

вопросы:

- нельзя ли использовать вычислительные и логические возможности ЦВМ для осуществления оптимального регулирования управляемых величин, если не всех, то хотя бы части из них?

- что можно ожидать от оптимальных программ по сравнению с классическими?

Исследования и результаты, приведенные ниже, относятся к основной схеме импульсных систем, т.е. к схеме последовательной импульсной коррекции в прямой части системы. В качестве неизменной / заданной / части расматривается приведенная непрерывная часть - ПНЧ, состоящая из формирующего элемента /фиксатор с фиксацией импульсов на полный такт/ и линейной непрерывной части с запаздыванием. Характеристики замкнутой системы и ПНЧ задаются дискретными передаточными функциями $K^*_з(q,0)$ и $K^*(q,0)$ соответственно.

Передаточная функция /программа/ корректирующего устройства $K^*_Д(q,0)$, обеспечивающего оптимальность синтезируемой системы, определяется из соотношения:

$$K^*_Д(q,0) = \frac{K^*_{з.опт}(q,0)}{K^*(q,0)[1-K^*_{з.опт}(q,0)]}, \qquad /1/$$

где $K^*_{з.опт}(q,0)$ - передаточная функция оптимальной замкнутой системы.

Программы, определяемые выражением (1), будем называть оптимальными.

Основные задачи диссертации формулируются следующим образом:

1. Разработка простых методов синтеза оптимальных систем.

2. Синтез оптимальных программ для случаев типовых объектов регулирования первого и второго порядка с запаздыванием.

3. Сравнительная оценка процессов в оптимальных системах и в системах с классическими регуляторами с оптимальной настройкой.

При решении этих задач необходимо удовлетворить требованиям физической реализуемости, устойчивости и грубости.

Описанные выше задачи решаются при следующих предположениях:

I. Амплитудная модуляция величины на выходе формирующего элемента, с фиксацией амплитуды на полный такт.

2. Пренебрежимо малое время квантования по уровню в сравнении с интервалом регулирования Т.

При разработке методов синтеза также предполагается, что интервал регулирования Т не является кратным времени запаздывания. Это предположение расширяет полученные результаты на случай многоканального регулирования, а также позволяет учесть влияние конечного времени вычислений ЦВМ внесением эквивалентного запаздывания в системе.

I

В первой главе рассматриваются методы синтеза систем, оптимальных по быстродействию.

Синтез оптимальной системы, содержащей дискретное корректирующее устройство и ПНЧ с запаздыванием, целесообразно проводить, используя основные соотношения теории оптимальных по быстродействию линейных импульсных систем после необходимых обобщений, вызванных присутствием элемента запаздывания.

К системе предъявляются дополнительно требования астатизма r -го порядка и отсутствия скрытых колебаний.

Задача синтеза оптимальной системы слежения при любом виде ПНЧ сводится к составлению и решению полиномиального уравнения

$$P^*(q,0)M_1^*(q,0)+Q_-^*(q)(e^q-1)^r N_1^*(q,0)=e^{ql}. \qquad /1.I/$$

Степени неизвестных многочленов $M_1^*(q,0)$, $N_1^*(q,0)$ и минимальная длительность процесса определяются соотношениями

$$l_{M1}\geq l_{Q_-}+r-1\ ;\quad l_{N1}\geq l_P+m\ ;\quad l_{min}=r+l_P+m+l_{Q_-}. \qquad /2.I/$$

Учитывая /I/, передаточную функцию корректирующего устройства определяем в виде

$$K_Д^*(q,0)=\frac{e^{qm}Q_+^*(q)M_1^*(q,0)}{(e^q-1)^r N_1^*(q,0)}. \qquad /3.I/$$

Выражение /3.I/ можно рассматривать как программу ЦВМ, корректирующей процесс в замкнутой системе регулирования. При этой программе, управляющее воздействие должно рассчитываться из настоящего и предшествующих значений ошибки и из собственных предшествующих значений. Все эти значения необходимо хранить в ЦВМ.

Дискретное изображение $\mu^*(q,0)$ управляющего воздействия на выходе ЦВМ можно записать также в виде

$$\mu^*(q,0)=\frac{K_{з.опт}^*(q,0)}{K^*(q,0)}F^*(q,0)=K_\mu^*(q,0)F^*(q,0)\ , \qquad /4.I/$$

где $F^*(q,0)$ – дискретное изображение воздействия на входе импульсного элемента.

Передаточную функцию $K_\mu^*(q,0)$ в выражении /4.I/ можно рассматривать как программу вычислительного устройства, корректирующего процесс в разомкнутой системе регулирования. Количество вычислений и запоминающих ячеек при этой программе значительно уменьшается, по сравнению с программой /3.I/.

Задача синтеза оптимальной системы стабилизации при любом виде ПНЧ сводится к составлению и решению полиномиального уравнения

$$P^*(q,0)M_1^*(q,0)+Q_-^*(q)D_F^*(q)N_2^*(q,0)=e^{ql}, \qquad /5.I/$$

где $D_F^*(q)$ – знаменатель дискретного изображения воздействия приведенного ко входу импульсного элемента. Коэффициенты неизвестных многочленов $M_1^*(q,0)$, $N_2^*(q,0)$ и длительность процесса определяются при помощи соотношений

$$l_{M1}\geq l_{Q_-}+l_{DF}-1\ ;\quad l_{N2}=l_P+m\ ;\quad l_{min}=l_P+l_{DF}+m+l_{Q_-}. \qquad /6.I/$$

Оптимальные программы ЦВМ в системах слежения и стабилизации с типовыми объектами при скачкообразном изменении задания приводятся в таблицах. Отмечается предельная простота программ, при помощи которых ЦВМ управляет процессами в разомкнутой системе.

Пользоваться программами управления в разомкнутой системе рекомендуется в случае, если можно пренебречь влиянием возмущений (помех), действующих на объект в интервале времени $t_o-\tau \div t_o+t_{рег}-\tau$ где t_o – момент приложения возмущения по заданию.

Получены также основные соотношения, используемые для построения процессов в этих же системах.

Например, в случае объекта первого порядка, программы ЦВМ в замкнутой и в разомкнутой системе и процессы регулирования определяются соответственно выражениями

$$\mu[n,0]=\frac{1}{K_0(1-d_1)}[\varepsilon[n,0]-d_1\varepsilon[n-1,0]+K_0(1-d_1^{1-\bar{\tau}})\mu[n-m-1,0]+K_0(d_1^{1-\bar{\tau}}-d_1)\mu[n-m-2,0]] \; ; \qquad /7.I/$$

$$\mu[n,0]=\Delta f/(K_0(1-d_1)),\ n=0; \quad \mu[n,0]=\Delta f/K_0,\ n\geq 1; \qquad /8.I/$$

$$z[n,\varepsilon]=0, \qquad n=0,1,\dots m-K;$$
$$z[n,\varepsilon]=(1-d_1^{\varepsilon-\bar{\tau}+K})\Delta f/(1-d_1), \quad n=m+K;$$
$$z[n,\varepsilon]=\Delta f, \qquad n=m+1+K. \qquad /9.I/$$

Если $\varepsilon\leq\bar{\tau}$, то K=I, иначе K=0.

В соотношениях /7.I/ – /9.I/ $\tau/T=m+\bar{\tau}$; $T/T_1=\beta_1$; $e^{-\beta_1}=d_1$; τ, T и K_0 – запаздывание, постоянная времени и коэффициент усиления объекта; Δf – изменение задания.

Рассматривается также задача выбора оптимального управления, при ограничении модуля управляющего воздействия. Предлагается более простой метод синтеза, который отличается от известных методов тем, что отпадает необходимость определения значений импульсной характеристики замкнутой системы $K_з[n,0]$ или регулируемой величины $z[n,0]$. Метод можно применять в случаях, когда изменение регулируемой величины не накладывает ограничения на управляющее воздействие.

Сюда относятся, например, оптимальные системы с объектами, заданными передаточными функциями типовых звеньев, соединений этих же звеньев с интегрирующим элементом и др.

Выбор управляющего воздействия осуществляется следующим образом:

– определяются оптимальные величины $\mu[n,0]$ и проверяется выполнение условия

$$\mu[n,0]\leq\mu_{max} \; ; \qquad /10.I/$$

– если условие /I0.I/ не выполняется, длительность процесса увеличивается на один интервал. Коэффициент при новой степени соответствующего многочлена определяется из условия

$$max\{\mu[n,0]>\mu_{max}\}=\mu_{max} \; ; \qquad /11.I/$$

– если условие /I0.I/ снова не выполняется, длительность процесса увеличивается еще на один интервал и т.д.

В случае объекта первого порядка и изменения задания скачком Δf, условие минимально необходимого продления процесса на n_1 интервалов имеет вид:

$$\frac{\Delta f}{K_0(1-d_1)}\leq\mu_{max}(1+d_1+\dots+d_1^{n_1}), \qquad /12.I/$$

а величины управляющего воздействия определяются формулами

$$\mu[n,0]=\mu_{max}, \qquad n=0,\dots n_1-1;$$
$$\mu[n,0]=\frac{\Delta f}{K_0(1-d_1)}-\mu_{max}(d_1+d_1^2+\dots+d_1^{n_1}), \quad n=n_1; \qquad /13.I/$$
$$\mu[n,0]=\Delta f/K_0, \qquad n\geq n_1+1.$$

Соотношение /I2.I/ положено в основу предложенного алгоритма регулятора с переменной структурой.

В настоящей главе также показано, что оптимальное управление нелинейными объектами, которые аппроксимируются последовательным соединением нелинейного коэффициента усиления и линейных динамических звеньев с запаздыванием можно осуществить на основе результатов линейной теории. Для этого необходимо дополнить оптимальную программу ЦВМ некоторыми логическими и арифметическими операциями, с помощью которых определяются рабочие участки на кусочно-линеаризированной нелинейной характеристике и величины управляющего воздействия $\mu[n,0]$.

В случае, когда величины $\mu[n,0]$ вычисляются в разомкнутой системе, справедливы следующие соотношения для отдельных интервалов регулирования

$$\mu[n,0] = \frac{\Delta f}{K_0} F_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_K), \qquad /14.1/$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_K$ – постоянные времени объекта; F_n – известные числа, зависящие от постоянных времени.

Из соотношения /14.1/ видно, что в каждом интервале на входе объекта формируется такое управляющее воздействие, чтобы выходная величина стремилась к выражению

$$z_{2,Y}[n,0] = z_2[n_0 - l, 0] + \Delta f\, F_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_K), \qquad /15.1/$$

где $z_2[n_0-l,0]$ – установившееся значение выходной величины до момента $n = n_0$; $n \geq n_0$.

Если известна требуемая "установившаяся" величина на выходе, простыми логическими операциями нетрудно найти необходимую величину управляющего воздействия на входе нелинейного объекта.

Подобным образом рассматривается и случай с ограничением по модулю управляющего воздействия.

Рассмотренный подход применим при любых критериях, при которых известны алгоритмы вычисления управляющего воздействия в разомкнутой системе.

II

Во второй главе рассматриваются методы синтеза систем опти-

мальных по суммарной квадратической оценке при отсутствии и наличии ограничения на длительность процесса.

При отсутствии ограничения, минимизируемый функционал имеет вид

$$I(0) = \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon^2[n,0] = \sum_{n=0}^{\infty} (z_0[n,0] - z[n,0])^2, \qquad /1.2/$$

где $z_0[n,0]$ – желаемая величина системы.

В случае устойчивой ПНЧ, задача синтеза сводится к составлению и решению полиномиального уравнения

$$P_-^*(q,0)U_-^*(q)M_1^*(q,0) + B_+^*(q)U_+^*(q)L_1^*(q,0) = V^*(q,0)A_+^*(q,0)\tilde{P}_+^*(q,0)e^{qm}, \qquad /2.2/$$

где $A^*(q,0)$, $B^*(q)$ – числитель и знаменатель изображения $\Psi^*(q,0) = F^*(q,0)F^*(-q,0)$. Для степеней неизвестных многочленов $M_1^*(q,0)$ и $L_1^*(q,0)$ справедливы соотношения

$$l_{M_1} = l_{B_+} + l_{U_+} - 1; \quad l_{L_1} = l_{P_-} + l_{U_-} + m + k, \qquad /3.2/$$

где $k = l_V - l_U$.

Передаточная функция корректирующего устройства имеет вид

$$K_Д^*(q,0) = \frac{e^{qm} Q^*(q) M_1^*(q,0)}{e^{qm} A_+^*(q,0) U_+^*(q) \tilde{P}_+^*(q,0) P_+^*(q,0) - P^*(q,0) M_1^*(q,0)}. \qquad /4.2/$$

В дальнейшем рассматривается случай воспроизведения, для которого $U_+^*(q) = U_-^*(q) = 1$, $V^*(q,0) = 1$, $l_U = l_V = 0$.

При наличии ограничения на длительность процесса, функционал

$$I(0) = \sum_{n=0}^{s-1} \epsilon^2[n,0] \qquad /5.2/$$

достигает минимального значения, и $\epsilon[n,0] \equiv 0$, при $n \geq s$.

В случае устойчивой ПНЧ, задача синтеза сводится к составлению и решению двух полиномиальных уравнений

$$P^*(q,0)M_1^*(q,0) + B_+^*(q)N_1^*(q,0) = e^{qs}, \qquad /6.2/$$

$$L_1^*(q,0)\,e^{q(l_{M1}+l_P+1)}+L_2^*(q,0)+A^*(q,0)\tilde{P}^*(q,0)N_1^*(q,0)=0. \quad /7.2/$$

Степени искомых многочленов должны удовлетворять соотношениям

$$l_{M1}=s-l_P-m-1\,; \quad l_{L_1}=l_Q+m+l_A-l_{B_+}-1\,;$$

$$l_{N1}=s-l_{B_+}\,; \quad l_{L_2}=l_P+l_{B_+}-1\,, \quad /8.2/$$

где $s>s_{min}=l_Q+m$; l_Q – степень знаменателя $K^*(q,0)$, при $m=0$.

При помощи выше изложенных соотношений были получены оптимальные программы ЦВМ в системах с типовыми объектами первого порядка, при скачкообразном изменении задания.

Для этих объектов программы, полученные по критерию минимума суммарной квадратической оценки, совпадают с программами, обеспечивающими оптимальность по быстродействию в случае, когда $\tau/T=m$.

Приводятся также соотношения, при помощи которых строятся процессы в этих же системах.

III.

В третьей главе рассматривается методика синтеза оптимальных систем при наличии случайных воздействий.

Системы слежения исследуются в предположении, что входное воздействие состоит из трех частей: полезной $f(\bar{t})$, представляющей многочлен степени $r-1$ по $\bar{t}$, „полезной случайной" $l(\bar{t})$ и помехи $n(\bar{t})$. Случайные составляющие $l(\bar{t})$ и $n(\bar{t})$ представляют собой стационарные, некоррелированные процессы.

Система должна воспроизвести полезные составляющие, обеспечивая при этом конечную длительность процесса устранения ошибки $\varepsilon_{дин}$, обязанной детерминированной составляющей $f(\bar{t})$ и минимально возможную дисперсию статистической ошибки.

Задача синтеза системы, удовлетворяющей этим требованиям, при любом виде ПНЧ, сводится к составлению и решению двух полиномиальных уравнений

$$P^*(q,0)M_1^*(q,0)+Q_-^*(q)(e^q-1)^r N_1^*(q,0)=e^{qs}, \quad /I.3/$$

$$P^*(q,0)M_1^*(q,0)A_F^*(q,0)\tilde{P}^*(q,0)(e^q-1)^r Q_-^*(q)+B_{F_+}^*(q)\times$$
$$\times N_2^*(q,0)e^{q(l_{M1}+l_P+1)}+B_{F_-}^*(q)N_3^*(q,0)= \quad /2.3/$$
$$=e^{qs}A_L^*(q,0)B_N^*(q)\tilde{P}^*(q,0)(e^q-1)^r\tilde{Q}_-^*(q).$$

Практическое определение многочлена $M_1^*(q,0)$ выполняется в следующем порядке:

– определяется частное – минимальное – решение уравнения /I.3/ $M_{10}^*(q,0)$, $N_{10}^*(q,0)$, s_{min}.

– выбирается число К, на которое увеличивается длительность процесса и задается общее решение уравнения /I.3/ в виде

$$M_1^*(q,0)=M_{10}^*(q,0)e^{Kq}+(e^q-1)^r Q_-^*(q)R^*(q,0), \quad /3.3/$$

где $R^*(q,0)$ – произвольный многочлен степени К-I.

– выражение для $M_1^*(q,0)$ подставляется в /2.3/. Степени неизвестных многочленов $N_2^*(q,0)$ и $N_3^*(q,0)$ определяются из условий

$$l_{N3}=r+l_{Q_-}+l_P+l_{BF_+}-1\,;$$
$$l_{N2}=l_{BF_-}-K-1\,; \quad /4.3/$$
$$l_{N3}\geq l_{BF_+}+l_{M1}+l_P-K\,;$$
$$l_{N2}+l_{N3}\geq 2(l_P+r+l_{Q_-}-1)+l_{AF}\,;$$

– определяются коэффициенты многочлена $R^*(q,0)$ и в результате многочлен $M_1^*(q,0)$.

Предложенный способ определения многочлена $M_1^*(q,0)$ проще и быстрее ведет к цели, чем способ, основанный на составлении системы из трех полиномиальных уравнений.

Системы стабилизации рассматриваются для случая аддитивной случайной помехи на выходе объекта. Динамические свойства канала помехи отличаются от свойств основного канала регулирования.

Ставится задача определить оптимальную передаточную функцию компенсации стационарного случайного воздействия $n[n,0]$ и программу ЦВМ таким образом, чтобы при постоянном входном воздействии $f[n,0]$ было минимальное среднеквадратическое отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Исследование показало, что требование устойчивости возможно удовлетворить в случае, если передаточная функция канала смещения не имеет правых полюсов. Задача синтеза сводится к составлению и решению двух полиномиальных уравнений

$$P_{1-}^{*}(q,0)\,Q_{1-}^{*}(q)\,P_{2-}^{*}(q,0)\,Q_{2}^{*}(q)\,e^{qm_2}M_1^{*}(q,0)+B_{11+}^{*}(q)\,N_1^{*}(q,0)= = P_2^{*}(q,0)\,e^{q(l_G+m_1+m_2)}; \qquad /5.3/$$

$$L_1^{*}(q,0)\,Q_2^{*}(q)\,e^{q(l_{P_{1-}}+l_{Q_{1-}}+l_{P_{2-}}+l_{M_1}+m_2+1)}+L_2^{*}(q,0)+ + N_1^{*}(q,0)+A_n^{*}(q,0)\,\tilde{P}_{1-}^{*}(q,0)\,\tilde{Q}_{1-}^{*}(q)\,\hat{P}_{2-}^{*}(q,0)=0, \qquad /6.3/$$

при помощи соотношений

$$\begin{aligned} l_{M_1} &= l_G-l_{P_{1-}}-l_{Q_{1-}}-l_{P_{2-}}-2;\\ l_{N_1} &= l_G+l_{Q_2}+m_1+m_2-l_{B_+}-1;\\ l_{L_1} &= l_{P_1}+l_{Q_{1-}}+l_{P_{2-}}+l_A+m_1-l_{B_-};\\ l_{L_2} &= l_{P_{1-}}+l_{Q_{1-}}+l_{P_{2-}}+l_{B_+}+l_{Q_2}+m_2-1. \end{aligned} \qquad /7.3/$$

На основании приведенных соотношений была определена оптимальная программа ЦВМ в системе слежения с типовым объектом первого порядка, при помехе в виде "белого" шума.

IY

В четвертой главе рассматриваются основные предпосылки и соотношения, используемые при разработке программ автоматического синтеза алгоритмов корректирующего устройства. Критерий оптимальности выбран таким же, как в гл. III.

Программы были записаны на эталонном языке АЛГОЛ 60 и переводились на код машины "МИНСК-22" при помощи транслятора "МЭИ-2". В приложениях к диссертации они приводятся в виде процедур.

Дискретные передаточные функции ПНЧ определяются с помощью процедур "FRACTION" и "TRANSFORM".

Процедура "FRACTION" осуществляет разложение рациональной функции на простые дроби. Знаменатель рациональной функции, являющейся непрерывным изображением Лапласа ПНЧ, задан произведением двучленов кратности один и два, и трехчленов кратности один, соответствующих комплексным корням знаменателя.

Определение коэффициентов производится по известным формулам разложения.

Процедура дискретного преобразования "TRANSFORM" осуществляет основное преобразование

$$\mathcal{D}\left\{e^{-pT}\frac{1-e^{-pT}}{p}F(p)\right\}=e^{-qm}\frac{P^{*}(q,0)}{Q^{*}(q)} \qquad /1.4/$$

и выделение фактора $Q_-^{*}(q)$, соответствующего правым полюсам непрерывной передаточной функции. В выражении /1.4/ $F(p)$ представлена в виде суммы простых дробей.

В процедуре используются соотношения, полученные на основании теорем $\mathcal{D}$-преобразования.

Процедура определения корреляционных изображений и их факторизации "KORELIM" осуществляет преобразование полезных сигналов и помех, корреляционные функции которых можно записать в виде

$$R[m]=R[0]\,e^{-\alpha|m|}\cos\bar{\omega}m, \qquad /2.4/$$

либо в формах, получающихся из /2.4/ после подстановки $\bar{\omega}$ и /или/ α равными нулю.

Составление и решение необходимых полиномиальных уравнений осуществляется процедурой " POLYEQ ". Она выполняет следующие основные функции:

- нахождение минимальных многочленов $M_{i0}^{*}(q,0)$, $N_{i0}^{*}(q,0)$.
- определение неизвестных коэффициентов многочлена $R^{*}(q,0)$.
- нахождение общего решения $M_1^{*}(q,0)$.
- определение коэффициентов числителя и знаменателя дискретной передаточной функции корректирующего устройства $K_Д^{*}(q,0)$.

Указанные выше функции последовательно выполняются при К=I,2,...ref , где ref – заданная величина.

Для умножения и считывания многочленов заданных степеней составлены процедуры MUL и SUM .

Представленные программы позволяют полностью автоматизировать громоздкие вычисления, связанные с определением дискретных изображений ЛПЧ и случайных воздействий, и решение математических и вычислительных проблем, возникающих при составлении и решении полиномиальных уравнений.

Исследование влияния ограничения управляющего воздействия, интервала регулирования Т и структуры корректирующего устройства на качество процесса существенно облегчается в связи с возможностью получить ряд оптимальных алгоритмов программным путем, предварительным заданием лишь числа вариантов К и интервала Т.

Программы дают возможность решать задачу синтеза практически для систем любого порядка, освобождая от необходимости понижения порядка в целях упрощения расчетов или в целях получения аналитических зависимостей между параметрами объекта и регулятора.

Процедуры имеют также самостоятельное значение для решения соответствующих математических задач.

У

В главе пятой сравнивалось быстродействие систем с классическими регуляторами с быстродействием оптимальных систем.

В работах Е.К.Круг показано, что динамические свойства систем с цифровыми ПИ регуляторами в общем хуже, чем свойства систем с непрерывными ПИ регуляторами, и что предельно достижимые показатели качества в цифровых системах определяются показателями соответствующих непрерывных систем. В этом случае параметры настроек цифровых регуляторов рекомендуется выбирать, исходя из соображений по выбору параметров настроек непрерывных ПИ регуляторов, обеспечивающих минимальное время регулирования при возмущении по нагрузке.

Поэтому свойства оптимальных по быстродействию систем сравнивались главным образом со свойствами систем с непрерывными ПИ регуляторами с оптимальной настройкой. Параметры настроек оптимального ПИ регулятора и соответствующие им показатели качества непрерывных систем заимствованы из выше отмеченных работ.

Для обеспечения минимального времени регулирования необходимо, чтобы полных ход регулирующего органа выбирался с определенным запасом. δ. В случае объекта с самовыравниванием

$$\Delta\mu = \delta \frac{\Delta f m}{K_0}, \qquad /1.5/$$

где Δfm – максимально возможное изменение задания.

Системы слежения исследовались при трех значениях величины запаса δ =I,5 ; δ =2,0 , и

$$\delta \geq C(1+\tau/T_и), \qquad /2.5/$$

где С – постоянная, зависящая от параметров объекта τ/T_1 ; $T_и$ – время изодрома. Выполнение соотношения /2.5/ необходимо для того, чтобы регулирующий орган в системе с ПИ регулятором не достигал крайних положений.

Оптимальные времена регулирования $t_{р.опт} = T + \tau$, соответствующие каждому из трех значений δ, сопоставлялись с временем регулирования $t_{р.пи}$ системы с оптимальным ПИ регулятором. Результаты сравнения, представленные в виде нескольких графиков, сводятся в основном к следующему:

- улучшение быстродействия зависит от величины запаса δ. При относительно небольших значениях δ /1,5 ÷ 2,0/ для широкого класса объектов /$0,1 \le \tau/T_1 \le 10$/ быстродействие увеличивается в 1,8 ÷ 4 раза.

- наличие ограничений в оптимальных системах ухудшает качество регулирования. Тем не менее процессы заканчиваются быстрее, чем в непрерывных системах с оптимальными ПИ регуляторами и в случаях, когда условия в непрерывных системах являются более благоприятными. При равных условиях, если $\tau/T_1 < 1$, время уменьшается в 2 ÷ 4 раза.

Подобным образом для объектов без самовыравнивания было показано, что при равных условиях ограничения быстродействие улучшается в три раза, а при ограничении в два раза более сильном, чем в системе с ПИ регулятором - в два раза.

На основании результатов исследований делается вывод о целесообразности применения оптимальных программ в системах слежения при любых значениях соотношения τ/T_1 и величины запаса δ.

Системы стабилизации исследовались при двух значениях величины запаса - δ =1,5 и δ =2,0. Области допустимых значений интервала T определялись с помощью ЦВМ.

Результаты сравнения представлены в виде таблицы и нескольких графиков. В основном, они сводятся к следующему.

Улучшение быстродействия зависит от величины запаса δ и от сложности программы. В случаях, для которых $0,6 \le \tau/T_1 \le 10$ и

и величина δ =1,5, быстродействие увеличивается в 1,25 ÷ 1,6 раз по отношению к системам с непрерывным оптимальным ПИ регулятором, и в 1,6 ÷ 2,4 раза по отношению к системам с дискретным ПИ регулятором; если же $0,2 \le \tau/T_1 \le 10$ и величина δ =2,0, быстродействие улучшается соответственно в 1,35 ÷ 1,8 раза и в 1,66 ÷ 2,5 раза.

При одних и тех же ограничениях существуют несколько различных по сложности оптимальных программ. Чем сложнее программа, тем быстрее заканчивается процесс.

Эффект от усложнения программ уменьшается с нарастанием τ/T_1. В случаях, когда $\tau/T_1 > 1$ возможно применять более простые или простейшие оптимальные программы без существенного ухудшения качества процесса.

В случае, когда учет квантования по уровню и нестабильности параметров объектов накладывает ограничение $T > 0,25\tau$ верхние оценки улучшения быстродействия можно получить, уменьшив приведенные выше значения при δ =1,5 на 10 ÷ 15%.

В случае объекта без самовыравнивания применение оптимальных программ оправдано, если возможно выбирать несколько увеличенные значения запаса ($\delta > 1,5$). При δ =2,0 быстродействие увеличивается в два и в три раза относительно к непрерывному и к дискретному случаю соответственно.

На основании результатов исследования делается вывод, что применение оптимальных программ тем более целесообразно, чем больше величина δ и соотношение τ/T_1.

VI

Шестая глава посвящена выбору регулятора температуры в зоне реакции колонны синтеза аммиака /КСА/.

Исходя из того, что значения температуры сказываются на производительности и сроке службы колонны, от системы регулирования целесообразно требовать максимальное быстродействие и минимальную динамическую ошибку.

Как объект регулирования КСА представляет собой колебательное звено второго порядка с запаздыванием. С целью определения оптимальных настроек ПИ регулятора и ожидаемого эффекта от оптимальных программ характеристика разгона была аппроксимирована звеном первого порядка с запаздыванием. Ожидаемое улучшение быстродействия оценивалось на 50 – 60% в обоих случаях слежения и стабилизации. Затем моделированием на ЦВМ были получены процессы в непрерывных системах слежения и стабилизации "колебательный объект – оптимальный ПИ регулятор". Эти процессы сопоставлялись с соответствующими процессами в оптимальных системах.

Результаты сравнения выявили высокие показатели качества процессов в оптимальных системах. В оптимальной системе слежения быстродействие повышается более чем в четыре раза, перерегулирование $X_{опт}$ =0. В системе с оптимальным ПИ регулятором $X_{пи}$ =35,2%. В оптимальной системе стабилизации быстродействие улучшается в два раза, а динамическая ошибка уменьшается на 10%.

Оптимальные процессы обеспечиваются при помощи простых программ ЦВМ. При определении программ учитывались реальные ограничения и режимы производства.

Результаты моделирования показали, что аппроксимация характеристики разгона колонны синтеза аммиака звеном первого порядка с запаздыванием является слишком грубой с точки зрения критерия быстродействия. Более точной является аппроксимация колебательным звеном с запаздыванием. При этом "точность" определяется близостью процессов на выходах систем "объект – регулятор", " модель – регулятор".

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные полученные результаты относятся к разработке методов синтеза оптимальных систем и к сравнению некоторых предельных возможностей этих систем с предельными возможностями классических систем регулирования.

Основные результаты сводятся к следующему:

1. Предложены простые методы синтеза оптимальных систем на основе линейной импульсной теории и теории полиномиальных уравнений.

2. При наличии одновременно детерминированных и случайных воздействий задача синтеза при любом виде ПНЧ сводится к составлению и решению системы из двух полиномиальных уравнений.

3. Разработаны оптимальные программы ЦВМ в системах слежения и стабилизации с типовыми объектами регулирования. Результаты распространяются на задачи многоканального регулирования и позволяют учесть влияние конечного времени вычислений ЦВМ.

4. Предложен алгоритм регулятора с переменной структурой в системе с ограничениями по модулю управляющего воздействия.

5. Разработан алгоритм применения оптимальных программ, дополненных логическими и арифметическими операциями, в системах слежения с нелинейными объектами.

6. Разработаны и экспериментально проверены на ЦВМ программы автоматического синтеза оптимальных алгоритмов, позволяющие устранить вычислительные трудности при определении дискретных изображений и математические и вычислительные проблемы, возникающие при составлении и решении систем полиномиальных уравнений.

7. Получены количественные оценки улучшения быстродейст-

вия в оптимальных системах по отношению к системам с непрерывными и дискретными ПИ регуляторами с оптимальной настройкой.

Показано, что в системах стабилизации применение оптимальных программ тем более целесообразео, чем больше величина δ и соотношение τ/T_1 .

В системах слежения оптимальные программы эффективны при любых значениях величины δ и соотношения τ/T_1 .

8. Выбран регулятор температуры в зоне реакции колонны синтеза аммиака. Получены высокие показатели качества оптимальных процессов применением простых оптимальных программ ЦВМ.

По отдельным вопросам диссертации автором сделан доклад на 2-ой Национальной конференции по автоматизации в Варне, 1967 г.

Некоторые результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гатев Г.И. Синтез на програма на цифрова управляваща машина, реализираща процес с крайна продължителност при ограничение на управляващото въздействие. Годишник на Научноизследователския и проектантски институт по автоматика НИПИА, т.I, 1966,София.

2. Гатев Г.И. Подобряване на бързодействието на системи за управление на технологически процеси, чрез използуване на изчислителна машина. Техническа мисъл, №4,1967, София.