

НАСТРОЙКА ДВУХКОНТУРНЫХ АСР ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ НА ЗАДАННЫЙ ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ

АННОТАЦИЯ

Решается задача поиска оптимальных настроечных параметров двухконтурных каскадных АСР с регуляторами различной структуры численным методом имитационного моделирования с использованием авторской версии модифицированного генетического алгоритма “Optim-MGA”. Для сравнения рассматривается двухконтурная АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором, эквивалентная каскадной АСР с ПИ-алгоритмом корректирующего регулятора и реальным ПД-алгоритмом стабилизирующего регулятора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди систем управления с добавочными переменными состояния объекта регулирования наибольшее распространение получили двухконтурные каскадные АСР с корректирующим (главным) регулятором $W_k(s)$ и стабилизирующим (вспомогательным) регулятором $W_c(s)$ (рис.1).

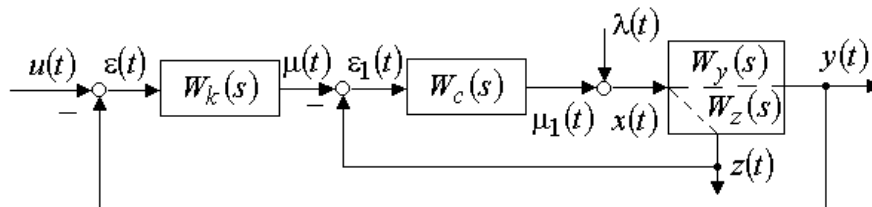


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной каскадной АСР:

$W_y(s), W_z(s)$ – передаточные функции объекта по основной $y(t)$ и добавочной $z(t)$ переменным;
 $u(t), \lambda(t)$ – входные воздействия по заданию и по каналу регулирующего органа

Широко распространенные в практике автоматизации двухконтурные системы с ПИ-регулятором и дифференциатором (РД-звено) приводятся к эквивалентной каскадной АСР, в которой корректирующий регулятор реализует ПИ-закон, а стабилизирующий реализует интегродифференцирующее ИД-звено, фактически являющееся ПД-регулятором с реальным дифференцированием.

Применение численных методов расчета таких систем, в основе которых лежат имитационное моделирование и эволюционные алгоритмы оптимизации, практически не накладывает никаких ограничений на алгоритмы регуляторов и число настроечных параметров.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Аналитические методы расчета двухконтурных АСР, в основе которых лежат как одношаговые, так и многошаговые итерационные процедуры, достаточно подробно изложены в многочисленных публикациях. В качестве получивших наибольшее распространение следует отметить метод с применением итерационной многошаговой процедуры [1] и метод многомерного сканирования [2], практически снимающие ограничения на различие инерционностей основного и вспомогательного каналов объекта регулирования. Названные методы относятся к числу многошаговых процедур и являются достаточно сложными и трудоемкими, особенно в случае применения законов регулирования с большим числом настроечных параметров. В связи с этим численные методы с применением эволюционных алгоритмов многоэкстремальной оптимизации выглядят перспективными.

В последнее время в практике решения многопараметрических и многоэкстремальных оптимизационных задач широкое применение получили генетические алгоритмы.

Для оптимальной настройки двухконтурных АСР использовалась авторская версия модифицированного генетического алгоритма “Optim-MGA”. Алгоритм реализован в виде пользовательской программы для MathCAD [3] и в виде универсальной программы “Optim-MGA” для ЭВМ, зарегистрированной в Российском агентстве по патентам и товарным знакам [4]. Значения целевой функции вычислялись по имитационной модели системы регулирования.

Идея цифровой имитационной модели состоит в замене дифференциальных уравнений на разностные, которые при достаточно малом шаге квантования приближаются к исходным дифференциальным. Моделирование объекта регулирования практически сводится к моделированию аperiodических звеньев, описываемых дифференциальным уравнением первого порядка. В данной работе разностное уравнение А-звена получено методом Рунге-Кутты второго порядка, что в значительной степени повышает точность моделирования, снижая чувствительность модели к выбранному интервалу дискретности.

Моделирование законов регулирования проводилось по структуре ПДД²-звеньев с последующим численным интегрированием. Имитационное моделирование достаточно легко позволяет реализовывать производные практически любого порядка путем замены их разностями соседних дискретных значений, деленных на интервал дискретности.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости использовался частотный показатель колебательности $M_{\text{дон}}$, определяемый в виде максимального значения АЧХ замкнутой АСР на резонансной частоте. Для каскадной АСР требуется, чтобы этот показатель для любой точки её структуры не превышал заданного значения. Выполнение этого условия проверяется в точках, отражающих поведение главного и вспомогательного контуров. При этом, точки размыкания контуров выбираются перед входами в соответствующий регулятор [5].

С учетом эквивалентных объектов, выражение для КЧХ разомкнутой системы с корректирующим регулятором запишется в виде:

$$W_{pc}^y(j\omega) = W_k(j\omega) \cdot \frac{W_c(j\omega) \cdot W_y(j\omega)}{1 + W_c(j\omega) \cdot W_z(j\omega)}, \quad (1)$$

а со стабилизирующим в виде:

$$W_{pc}^z(j\omega) = W_c(j\omega) \cdot [W_y(j\omega) \cdot W_k(j\omega) + W_z(j\omega)]. \quad (2)$$

КЧХ замкнутых систем главного и вспомогательного контуров и соответствующие им АЧХ определяются согласно выражениям:

$$W_{3c}^y(j\omega) = \frac{W_{pc}^y(j\omega)}{1 + W_{pc}^y(j\omega)}; \quad A_{3c}^y(\omega) = |W_{3c}^y(j\omega)|; \quad W_{3c}^z(j\omega) = \frac{W_{pc}^z(j\omega)}{1 + W_{pc}^y(j\omega)}; \quad A_{3c}^z(\omega) = |W_{3c}^z(j\omega)|; \quad (3)$$

При численном методе настройки $\max A_{3c}^y(\omega)$ и $\max A_{3c}^z(\omega)$ не должны превышать заданные допустимые значения соответствующих им показателей колебательности.

Таким образом, контроль $A_{3c}^y(\omega)$ и $A_{3c}^z(\omega)$ позволяет ограничить их максимальные значения и тем самым исключить настройки, приводящие к недопустимой колебательности как в главном, так и во вспомогательном контурах каскадной АСР.

3. КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Для оценки качества регулирования в численной процедуре оптимизации использовался интегральный критерий, как реакция системы на единичное ступенчатое воздействие по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$. К числу наиболее применяемых относят линейный интеграл на

интервале времени переходного процесса t_p $I_{\lambda, \lambda}^y = \int_0^{t_p} y(t) dt$, имеющий аналитическую связь с настроечными параметрами. Однако, с точки зрения численных поисковых процедур, предпоч-

тение отдают интегралу по модулю $I_{\lambda, \lambda}^y = \int_0^{t_p} |y(t)| dt$, поскольку он в отличие от линейного имеет экстремальный характер, что делает процедуру поиска оптимума устойчивой.

Для обеспечения заданного запаса устойчивости в целевой критерий вводится ограничение в виде функции штрафа на допустимую величину показателя колебательности для главного и вспомогательного контуров каскадной АСР. С учетом отмеченного, критерий оптимальности примет вид:

$$F = I_{m,\lambda}^y + a \cdot \left| M_{don}^y - \max A_{3c}^y(\omega) \right| + a \cdot \left| M_{don}^z - \max A_{3c}^z(\omega) \right| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где a – коэффициент штрафа для принятых ограничений.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Изложенные рекомендации иллюстрируются на примере исследования АСР температуры перегретого пара котла БМ-35-РФ с поверхностными охладителем (котел №2 ТЭЦ МЭИ) [6].

Динамика основной и вспомогательной переменных $y(t)$ и $z(t)$ по каналам пароперегревателя представлены передаточными функциями вида:

$$W_y(s) = 0.08 \cdot \frac{e^{-23 \cdot s}}{(54.7 \cdot s + 1) \cdot (9.1 \cdot s + 1)}; \quad W_z(s) = 0.1 \cdot \frac{e^{-10 \cdot s}}{(48.9 \cdot s + 1) \cdot (11.5 \cdot s + 1)}. \quad (5)$$

Последовательно были выполнены процедуры настройки каскадной АСР с различными законами регулирования корректирующего и стабилизирующего регуляторов описанным выше методом. В представленных ниже расчетах минимизировался интеграл по модулю $I_{m,\lambda}^y$ при ограничении на запас устойчивости системы, при котором резонансные пики АЧХ обоих её замкнутых контуров не превышали допустимого значения $M_{don} = 1.55$. Первоначальный расчет с ПИ-законами для корректирующего и стабилизирующего регуляторов показал четкую тенденцию у стабилизирующего регулятора к П-алгоритму.

Как уже отмечалось, исследование проводилось для различных алгоритмов корректирующего $W_k(s)$ и стабилизирующего $W_c(s)$ регуляторов, включая ПИД, ПИ, И-законы для $W_k(s)$ и ПИ, П и ПД-законы для $W_c(s)$. Результаты представлены в табл.1. Там же для сравнения приведены параметры двухконтурной АСР с ПИ-регулятором $W_p(s)$ и дифференциатором $W_d(s)$ (ПИ-РД), а также результаты настройки ПИ- и ПИД-регуляторов в одноконтурной АСР.

Таблица 1

Структура АСР	$W_k(s)$			$W_c(s)$			$I_{m,\lambda}^y$	$I_{l,\lambda}^y$	y_{max}
	К _р	К _и	К _д	К _р	К _и	К _д			
1.ПИ-ПИ	-0.437	0.025	-	67.07	-0.004	-	0.909	0.596	0.0202
2.ПИ-П	-0.438	0.025	-	67.12	-	-	0.909	0.596	0.0202
3.И-П	-	0.047	-	8.11	-	-	4.917	2.678	0.0391
4.И-П	-	0.023	-	30.53	-	-	1.481	1.424	0.0261
5.ПИД-ПД	0.013	0.062	0.262	40.66	-	829.5	0.527	0.397	0.0136
6.ПИ-ПД	0.017	0.061	-	40.98	-	849.6	0.511	0.400	0.0136
7.И-ПД	-	0.060	-	41.96	-	832.6	0.527	0.397	0.0136
8.ПИ	19.64	0.319	-	-	-	-	3.225	3.117	0.0394
9.ПИД	31.05	0.663	411.4	-	-	-	1.616	1.508	0.0299
Структура АСР	$W_p(s)$		$W_d(s)$		$I_{m,\lambda}^y$	$I_{l,\lambda}^y$	y_{max}		
	К _р	К _и	К _д	Т _д					
10.ПИ-РД	62.15	2.076	13.23	1.147	0.501	0.482	0.0144		
11.ПИ-РД	52.07	1.575	8.00	1.816	0.655	0.635	0.0164		

Переходные процессы $y(t)$ и $z(t)$ для $\lambda(t)=1$ и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) каскадной АСР с настройками и структурой соответствующие строкам 2-4, табл.1 представлены на рис.2. Полученные результаты подтверждают вывод о том, что для соизмеримых инерционностей главного и вспомогательного каналов объекта регулирования ПИ-алгоритм стабилизирующего регулятора $W_c(s)$ вырождается в П-закон ($K_{и} \rightarrow 0, T_{и} \rightarrow \infty$). При этом, пропорциональная составляющая корректирующего регулятора $W_k(s)$ уходит в область отри-

пательных значений, что позволяет стабилизирующему регулятору значительно увеличить коэффициент передачи (строка 2, табл.1).

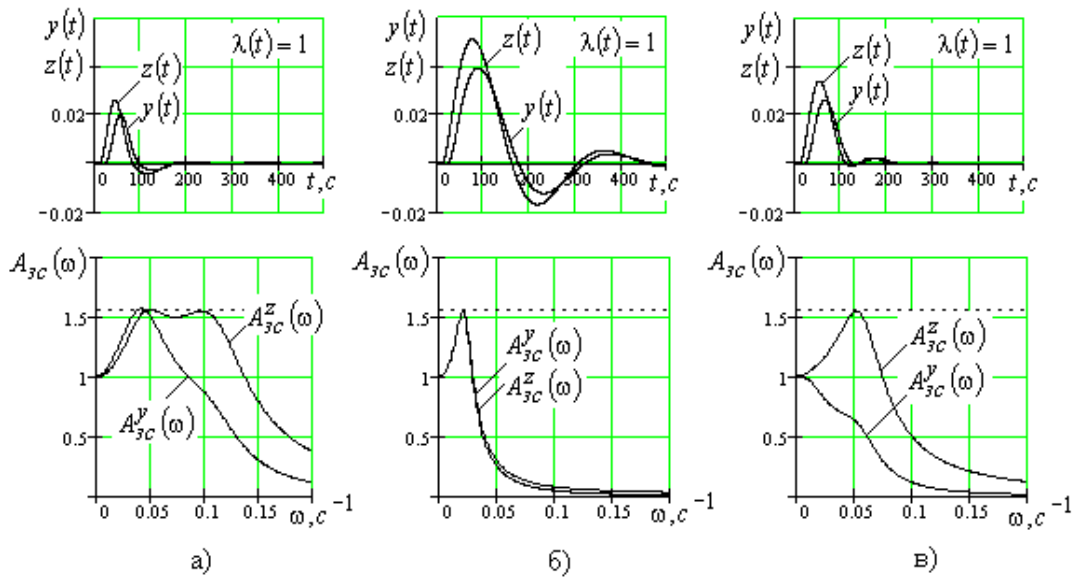


Рис. 2. Переходные процессы и АЧХ:

- а) $W_k(s)$ - ПИ-закон, $W_c(s)$ - П-закон (ограничение на $A_{3C}^y(\omega)$ и $A_{3C}^z(\omega)$); б) $W_k(s)$ - И-закон, $W_c(s)$ - П-закон (ограничение на $A_{3C}^y(\omega)$ и $A_{3C}^z(\omega)$); в) $W_k(s)$ - И-закон, $W_c(s)$ - П-закон (ограничение только на $A_{3C}^z(\omega)$)

Исключение из алгоритма корректирующего регулятора $W_k(s)$ отрицательной пропорциональной части и последующий анализ структуры каскадной АСР с корректирующим И-регулятором и стабилизирующим П-регулятором позволил сделать следующие выводы:

1. Значительное улучшение качества регулирования наблюдается в том случае, если ограничение накладывать лишь на $\max A_{3C}^z(\omega)$ (строка 4, табл.1 и рис. 2,в).
2. Для этого случая интеграл $I_{M,\lambda}^y$ снизился более чем в 3 раза, а динамическая ошибка y_{\max} (величина первой амплитуды) снизилась в 1.5 раза по сравнению с той же структурой, но с ограничением на показатель колебательности обоих контуров (строка 3, табл. 1 и рис. 2, б).

Следует также отметить, что упрощенная структура каскадной АСР (И-П) позволяет добиться качества регулирования, не уступающего одноконтурной АСР с ПИД-регулятором (строка 9, табл.1).

Дальнейшего повышения качества можно добиться, вводя в алгоритм стабилизирующего регулятора дифференциальную составляющую. В табл.1 (строки 5-7) приведены результаты настройки каскадной АСР с ПД-алгоритмом стабилизирующего регулятора и соответственно ПИД-, ПИ- и И-алгоритмами корректирующего регулятора. Качественные показатели проанализированных структур оказались практически одинаковыми. При этом, K_p и K_d для корректирующего регулятора оказались незначительными, а K_I во всех трех рассмотренных структурах близкими друг к другу.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оптимальной структурой для рассматриваемого объекта является структура с И-законом корректирующего и ПД-законом стабилизирующего регуляторов. Оптимальная настройка двухконтурной АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором (ПИ-РД) с аналогичными ограничениями (строка 10, табл.1) дала результаты, близкие к структуре каскадной АСР с ПД-законом стабилизирующего регулятора.

Предлагаемый метод позволяет вводить ограничения и на отдельные настроечные параметры. В качестве примера приводятся результаты настройки АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором с ограничением на коэффициент передачи дифференциатора $K_D = 8$ (строка 11, табл.1)

Переходные процессы для каскадной АСР (структура с ПД-алгоритмом стабилизирующего регулятора) и АСР с дифференциатором (структура ПИ-РД) с соответствующими АЧХ представлены на рис. 3,а и рис. 3,б. На рис. 3,в для сравнения показаны переходные процессы и АЧХ в одноконтурной АСР с ПИ- и ПИД-регуляторами (масштабы переходных процессов на рис. 3,в уменьшены по сравнению с рис. 3 а,б в два раза).

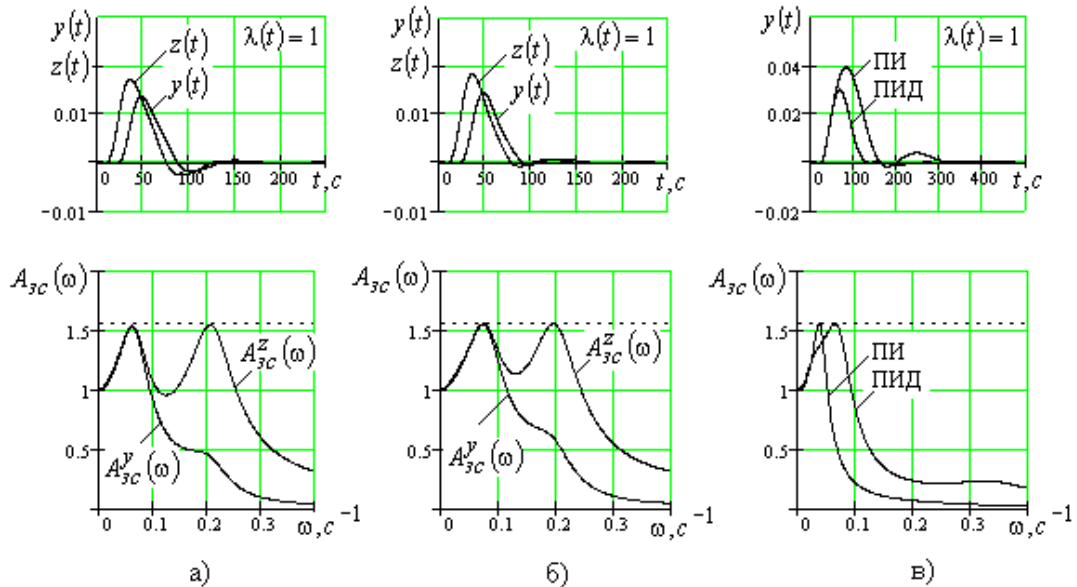


Рис. 3. Переходные процессы и АЧХ:

а) $W_k(s)$ – ПИД, ПИ, И-законы, $W_c(s)$ – ПД-закон; б) АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором; в) одноконтурная АСР с ПИ- и ПИД-регуляторами

На рис. 4 представлены переходные процессы для всех рассмотренных вариантов АСР, которые позволяют провести сравнительный анализ и выбрать оптимальную структуру.

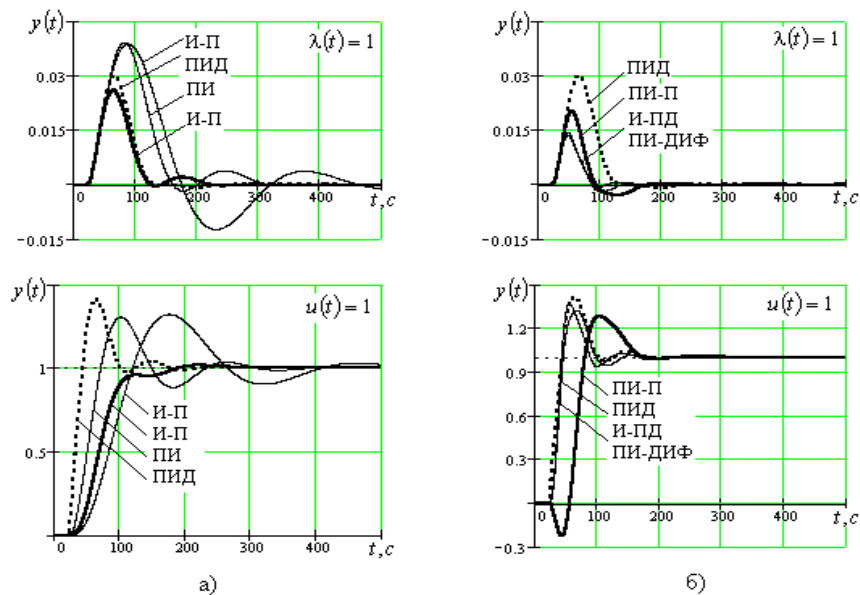


Рис. 4. Переходные процессы в анализируемых АСР

Для повышения наглядности сравнения переходные процессы в одноконтурной АСР с ПИД-регулятором выделены пунктирной линией. Жирной линией на рис. 4,а показаны переходные процессы в каскадной АСР упрощенной структуры И-П с ограничением только на $\max A_{3c}^z(\omega)$, не уступающие по качеству переходным процессам в АСР с ПИД-регулятором, а по отработке управляющего воздействия $u(t)=1$ даже превосходящие.

Переходные процессы в каскадной АСР со структурой (И-ПД) и в АСР с дифференциатором (ПИ-ДИФ), показанные на рис. 4,б, ещё раз достаточно наглядно показывают практически идентичность этих систем регулирования.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достаточно высокие показатели качества обеспечивает сравнительно простая структура каскадной АСР с И-алгоритмом корректирующего регулятора и П-алгоритмом стабилизирующего при ограничении только на резонансный пик АЧХ вспомогательного контура $\max A_{3c}^z(\omega)$.

Добавление дифференциальной составляющей в алгоритм стабилизирующего регулятора позволяет заметно улучшить качество регулирования. Полученная при этом структура каскадной АСР может рассматриваться как альтернатива широко распространенной двухконтурной системе с ПИ-регулятором и дифференциатором, качественные показатели которых практически одинаковые.

В заключение отметим, что предлагаемая методика позволит на стадии проектирования подобных систем регулирования проводить структурный анализ с выдачей рекомендаций как по алгоритмам используемых регуляторов, так и по их оптимальным настройкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биленко В.А., Давыдов Н.И.** Метод расчета на ЭЦВМ оптимальных параметров настройки двухконтурных систем регулирования//Теплоэнергетика. 1977. №1. С. 32-36.
2. **Ротач В.Я.** К расчету систем автоматического регулирования со вспомогательными информационными каналами методом многомерного сканирования//Теплоэнергетика. 2001. №11. С.61-65.
3. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления// Экспонента Про.Математика в приложениях. 2004. №3-4. С.78-85.
4. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862. Российское агентство по патентам и товарным знакам/ (РОСПАТЕНТ). Москва, 8 апреля 2004.
5. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004.
6. **Панько М.А., Харахорин Д.А.** Расчет оптимальных настроек регулятора в автоматической системе регулирования с сигналом по производной // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: Сб. научн. тр. МЭИ. М.: Издательство МЭИ, 1998. С. 61-69.