

Анализ метода проектирования робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации

В.А. Жмудь, А.Н. Заворин, А.В. Полищук, О.Д. Ядрышников
Novosibirsk State Technical University (NSTU); Novosibirsk State University (NSU),

Аннотация: Решается задача синтеза для объекта с запаздыванием, изменяющим свои параметры приблизительно в 3 раза. Задача решается путем минимизации функционального критерия качества, определения неблагоприятных сочетаний параметров объекта и повторной оптимизации набора систем, включающих объекты с выявленными неблагоприятными параметрами. Метод пояснен примером из практики.

Ключевые слова: синтез регуляторов, робастное управление, численная оптимизация, критерии оптимизации

1. ВВЕДЕНИЕ

Управление динамическими объектами в замкнутом контуре существенно усложняется, если параметры объекта известны недостаточно точно, или изменяются под действием неконтролируемых факторов, хотя и остаются в известном интервале. В этом случае необходимо применение методов робастного управления, обеспечивающих успешное управление объектом при всех возможных вариантах изменения его параметров. В настоящее время широко известны следующие методы робастного регулирования: H_∞ -синтез; H_2 -синтез; LQG -синтез; LQR -синтез [1–4].

Один из методов робастного управления состоит в оптимизации при одновременном моделировании совокупности систем с одинаковыми регуляторами, но разными объектами, описываемыми наиболее характерными моделями из множества возможных моделей этого объекта. Главная идея этого подхода состоит в том, чтобы одинаковыми регуляторами обеспечить устойчивость замкнутых систем не только с объектом с номинальными параметрами, но и с выбранными образцами моделей объекта с измененными параметрами. Если при численной оптимизации регулятора для единственного объекта в качестве критерия оптимальности используется интегральный критерий качества системы, то при численной оптимизации одного регулятора для множества объектов следует

использовать сумму этих критериев.

Примером системы автоматического регулирования (САР) с таким объектом является САР температуры пара в теплоэнергетических установках [5]. Это САР острого пара (температура пара на выходе из энергетического котла) и САР промежуточного перегрева (температура пара на выходе из цилиндра высокого давления турбины). Регулирование температуры пара относится к важнейшим задачам автоматизации теплоэнергетических процессов, поскольку ее решение обеспечивает более долгий срок эффективной эксплуатации оборудования и увеличивает КПД теплоэнергетической установки. В настоящее время настройка таких регуляторов остается большой технической проблемой. Перспективным является решение поставленной задачи на основе исследований численными методами оптимизации. В данной работе исследуется инерционный контур САР температуры пара с параметрами объекта, меняющимися в зависимости от режима работы теплоэнергетической установки.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект управления имеет известную модель в виде передаточной функции $W_0(s)$, например [5]:

$$W_0(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-sT_d}. \quad (1)$$

Параметры этой передаточной функции изменяются в широких пределах. Необходимо рассчитать регулятор, обеспечивающий устойчивое и точное управление объектом не только при номинальном значении передаточной функции, но также и при всех ее возможных изменениях. Качество регулятора оценивается по формальным критериям, таким как перерегулирование, длительность переходного процесса до достижения наперед заданной малой величины ошибки, интеграл от модуля или от квадрата ошибки и так далее.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для обеспечения требуемого качества системы при различных значениях параметров объекта предлагается использовать множество объектов, описываемых соотношением (1) с различными значениями параметров, как показано на рис. 1. Для каждого из таких объектов моделируется идентичный регулятор. Его параметры вычисляются методом оптимизации по критерию, в который входят ошибки всех систем множества.

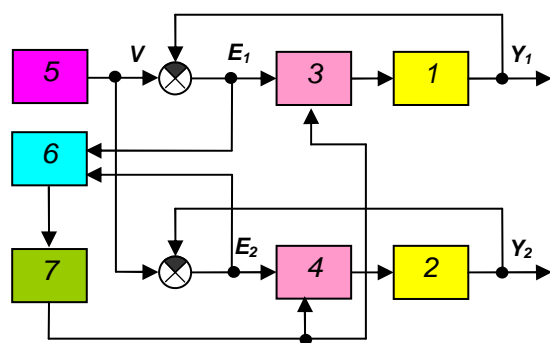


Рис.1. Схема оптимизации регулятора: 1, 2 – модели объекта с разными значениями параметров; 3, 4 – идентичные модели регуляторов; 5 – формирователь тестового воздействия; 6 – анализатор качества систем; 7 – оптимизатор параметров регулятора

Структуру регулятора зададим в виде последовательного корректирующего устройства:

$$W_R(s) = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s, \quad (2)$$

Расчет параметров регулятора (2) при фиксированном значении параметров передаточной функции (1) может быть осуществлен их оптимизацией при моделировании системы в одной из известных программ [5–7]. Для получения робастного регулятора следует оптимизировать его коэффициенты при одновременном использовании такого регулятора в нескольких объектах, отличающихся параметрами. В этом случае регулятор используется для каждой системы один и тот же, а критерий качества вычисляется как сумма критериев каждой системы.

Пусть $e_1(s)$ – ошибка регулирования номинального объекта, $e_2(s)$ – ошибка регулирования возмущенного объекта. Численная оптимизация коэффициентов регулятора (2) осуществляется на основе

интегрального критерия, зависящего от функции переходного процесса на ступенчатое или иное воздействие, например, на вход системы. В этом случае для решения задачи необходимо задать зависимость целевой (стоимостной) функции от ошибки регулирования. Тогда функционалы оценки качества формируем в виде:

1. Интеграл от суммы модулей ошибки:

$$\Psi_1 = \int_0^T [|e_1(t)| + |e_2(t)|] dt, \quad (3)$$

2. Интеграл от суммы модулей ошибки, умноженной на время:

$$\Psi_2 = \int_0^T [|e_1(t)| + |e_2(t)|] t dt, \quad (4)$$

3. Интеграл от суммы функций, зависящих от ошибки и от перерегулирования:

$$\Psi_3 = \int_0^T [|r_1(t)| + |r_2(t)|] t dt, \quad (5)$$

где r_1 и r_2 формируются с помощью соотношений:

$$r_i = |e_i(t)| + 100 \max\{0, [y_i(t) - C]\}. \quad (6)$$

Величина перерегулирования задается константой C : а) $C = 1,0001$; б) $C = 1,05$; в) $C = 1,1$; г) $C = 1,2$. В общем случае $C = 1 + \delta$, где δ – максимально допустимое перерегулирование.

4. ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Для сравнения будем использовать два различных программных средства: *MATLAB* и *VisSim* [9]. В программе *MATLAB* 7.11.0 оптимизация выполняется с помощью блока *Signal Constraint*, принцип действия которого основан на методе Монте-Карло (метод *DO*) [9]. В данном блоке задаются требования к виду переходного процесса, и по этому виду выполняется численная оптимизация параметров регулятора (1).

Начальная схема моделирования данной системы в программе *VisSim* 6.0 представлена на рис.2. Время симуляции взято 250 с (не менее утроенной длительности сумм всех постоянных времени).

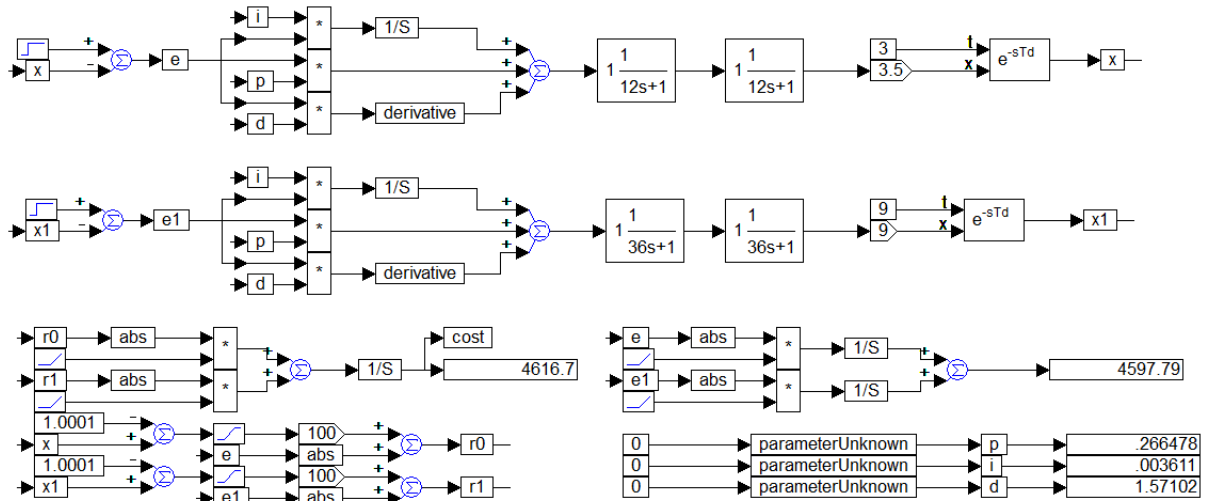


Рис.2. Схема моделирования в ПО VisSim 6.0

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПО ДВУМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ С ДВУМЯ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

Зафиксируем значения $T_1 = T_2 = 24$ с. Также зафиксируем $C = 1.0001$. Осуществим оптимизацию регулятора для двух объектов с крайними значениями параметров: при наименьших значениях коэффициента усиления передаточной функции и постоянной времени звена запаздывания ($k = 3,5; T_d = 3$); при наибольших значениях коэффициента усиления передаточной функции и постоянной времени звена запаздывания ($k = 9; T_d = 9$). Далее, осуществляя девиацию варьируемых параметров в различных направлениях, определим качество переходных процессов с оптимизируемыми регуляторами. Время симуляции взято 200 с (не менее утроенной длительности сумм всех постоянных времени).

На рис. 3–5 представлены переходные процессы с различными регуляторами, рассчитанными в программе VisSim 6.0, а на рис. 6–8 – с регуляторами, рассчитанными в программе MATLAB 7.11.0. На рисунках приняты следующие обозначения: x : $k = 3,5, T_d = 3$; x_1 : $k = 9, T_d = 9$; x_2 : $k = 3,5, T_d = 9$; x_3 : $k = 9, T_d = 3$; x_4 : $k = 6, T_d = 6$, где x_i – выход системы с соответствующими варьируемыми параметрами.

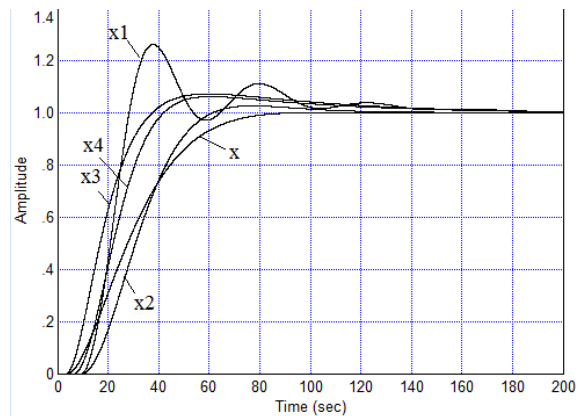


Рис. 3. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным по критерию качества Ψ_1

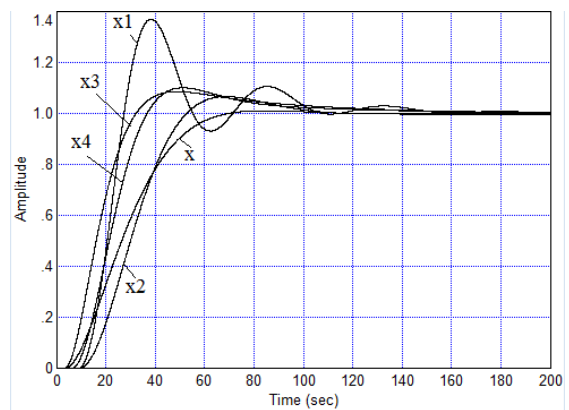


Рис. 4. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным по критерию качества Ψ_2

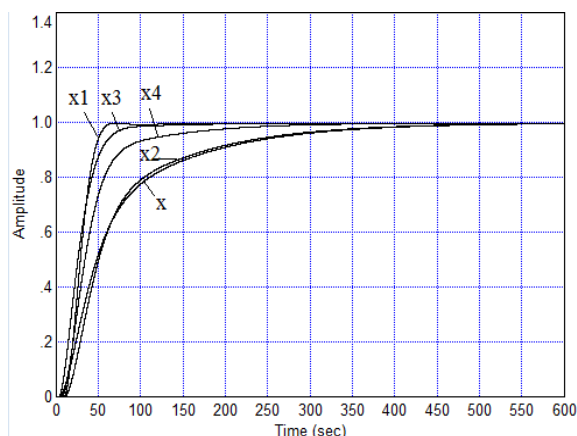


Рис. 5. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным по критерию качества Ψ_3

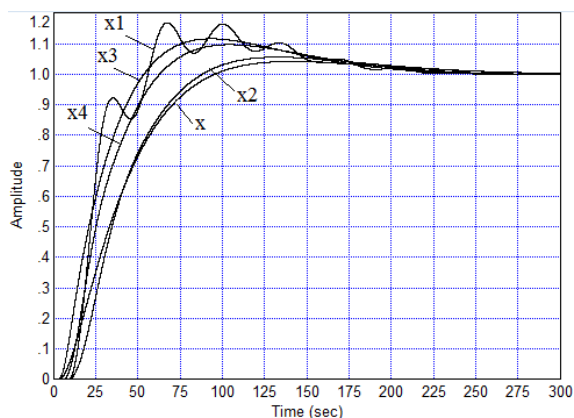


Рис. 6. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным методом **DO-I**

Из рис. 3–8 видно, что во всех рассмотренных случаях управление остается устойчивым. Однако рассмотрены далеко не все варианты значений параметров. При неблагоприятном сочетании параметров объектов переходные процессы могут стать неустойчивыми. Поэтому необходимо рассматривать все возможные сочетания. Поскольку это практически невозможно, следует, как минимум, рассмотреть все крайние значения из области допустимых значений этих параметров, а также их среднее значение.

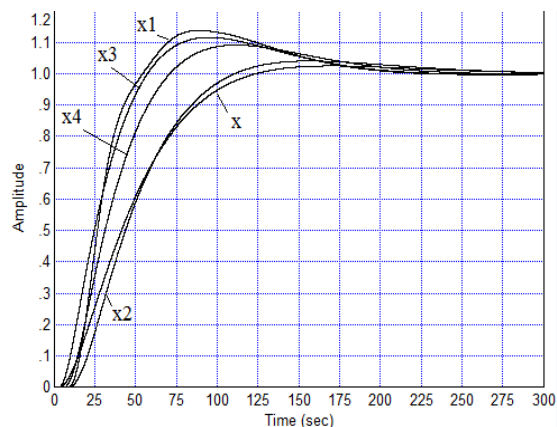


Рис. 7. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным методом **DO-II**

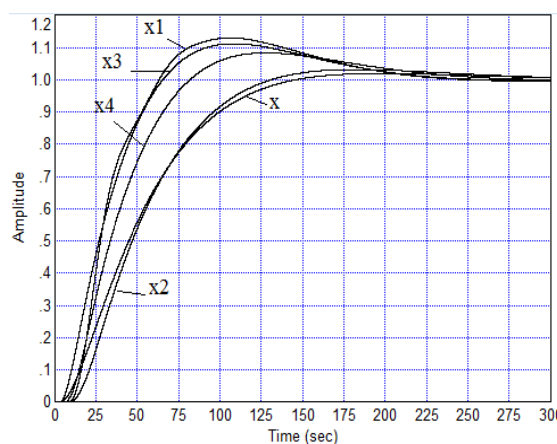


Рис. 8. Переходные процессы объекта (1) с регулятором, настроенным методом **DO-III**

6. РАСШИРЕНИЕ ВАРИАНТОВ СОЧЕТАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим все крайние исследуемые варианты параметров объекта, которые представлены в *Таблице 1*. Для стартовой оптимизации используем значения параметров, представленных вариантами x и x_1 . Кроме того, целесообразно рассмотреть несколько вариантов значений C , соответствующих перерегулированию от 0 до 20%.

Таблица 1. Варианты параметров объекта

	x	x_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	y_4
k	3,5	9	3,5	3,5	9	9	9	3,5	3,5	3,5	9	9	6
T_d	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	9	3	6
T_1	12	36	12	12	12	12	36	36	36	12	12	12	24
T_2	12	36	36	12	12	36	36	36	36	36	12	36	24

Одновременная оптимизация регулятора для всех возможных сочетаний параметров объектов излишне трудоемка. Поэтому предлагается на первом этапе осуществить оптимизацию регулятора для малого числа объектов с крайними значениями параметров. Далее в системе с полученными регуляторами осуществим перебор всех вариантов параметров объектов и выявим те сочетания параметров, которые наиболее отрицательно сказываются на устойчивости системы и качестве переходных процессов. Далее будем использовать эти варианты для следующей итерации совместной оптимизации регулятора.

В Таблице 2 представлены результаты оптимизации параметров ПИД-регулятора. На рис. 3–6 представлены переходные процессы в объектах с параметрами x и x_1 из таблицы 1 и полученными регуляторами, рассчитанными оптимизацией в программе VisSim 6.0.

Таблица 2. Параметры регуляторов

Критерий качества	Параметры ПИД регулятора		
	K_p	K_I	K_D
Ψ_1	1.2098	0.0156	7.8468
Ψ_2	1.0273	0.0157	6.0002
$\Psi_3(a)$	0.2807	0.0025	1.9542
$\Psi_3(б)$	0.8876	0.0043	10.8686
$\Psi_3(в)$	1.0632	0.007	8.552
$\Psi_3(г)$	0.9104	0.0126	7.0024
$\Psi_3(г, б)$	0.293	0.0044	1.563

На рис. 9–14 представлены переходные процессы с различными регуляторами, рассчитанными в программе VisSim 6.0. На рисунках приняты следующие обозначения: x : $k = 3.5$, $T_d = 3$, $T_1 = T_2 = 12$; x_1 : $k = 9$, $T_d = 9$, $T_1 = T_2 = 36$, где x_i – выход системы с соответствующими варьируемыми параметрами. Из рис. 9–14 видно, что система является устойчивой при крайних варьируемых параметрах системы, но чтобы выявить является ли система робастной с рассчитанными регуляторами, необходимо исследовать ее поведение при девиации параметров в соответствии с вышеизложенной схемой. Необходимо только знать, каким требованиям должна удовлетворять система и в соответствии с этими требованиями выбрать одну из систем, переходные процессы которых представлены на рис. 9–14. В случае применения критериев Ψ_1 и Ψ_2 обеспечено высокое быстродействие (время переходного процесса остается в пределах

180 с), но перерегулирование достигает 40%. При использовании критерия $\Psi_3(a)$ перерегулирование остается пренебрежимо малым, но время переходного процесса достигает 700 с. Критерии $\Psi_3(б)$ и $\Psi_3(в)$ существенно не улучшили ситуацию и время переходного процесса соответственно составило 600 с и 400 с. Использование критерия $\Psi_3(г)$ позволило ускорить переходные процессы в системе до 200 с при 20% перерегулировании. Допустим, заявленным требованиям удовлетворяет система с параметрами регулятора, получаемыми оптимизацией по критерию $\Psi_3(г)$. Необходимо дальнейшее исследование системы с целью определения ее робастности.

На рис. 15–18 представлены переходные процессы системы с регулятором, оптимизируемым по критерию $\Psi_3(г)$ при девиации параметров.

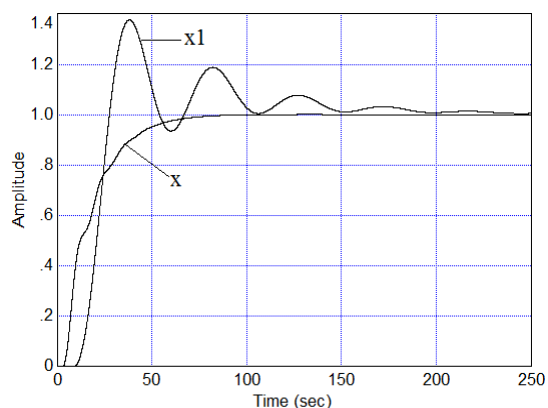


Рис.9. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию Ψ_1

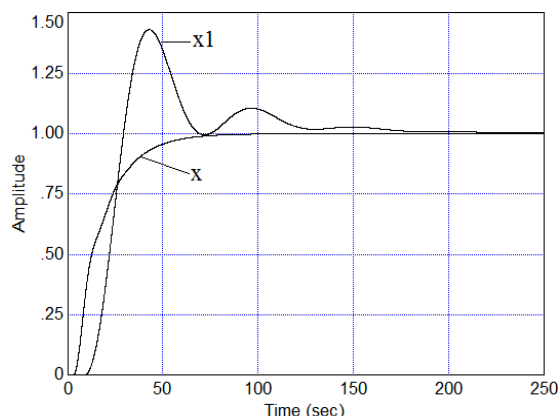


Рис.10. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию Ψ_2

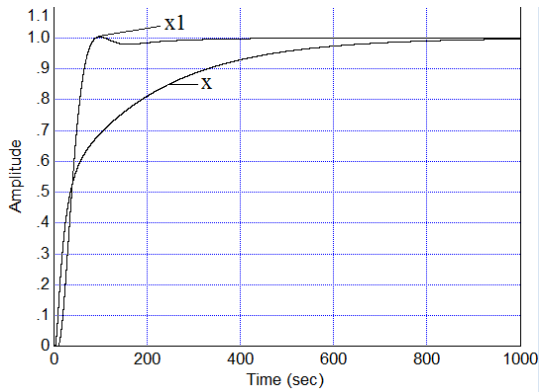


Рис.11. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(a)$

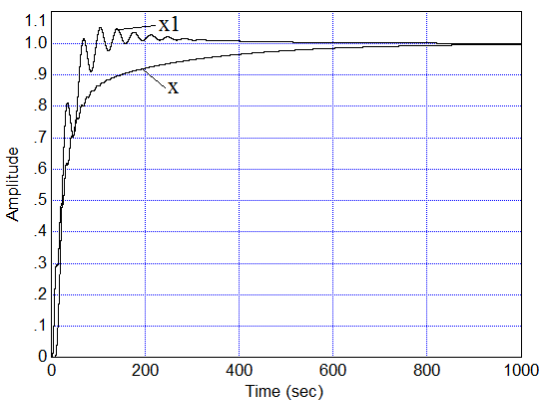


Рис.12. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(b)$

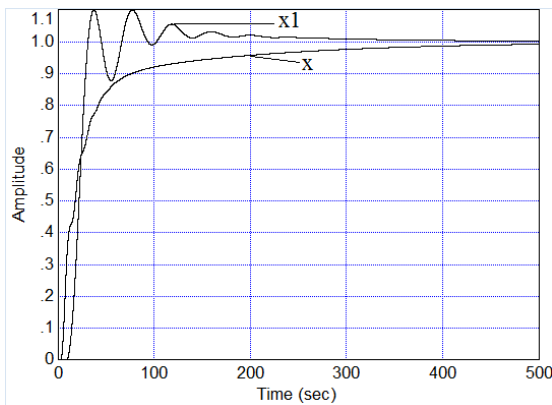


Рис.13. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(b)$

Из рис. 15–17 видно, что система выходит из устойчивого состояния для случаев y_{12} , y_{13} , y_{21} и y_{23} , а значит, данный регулятор не является робастным, поэтому ансамбль объектов следует дополнить моделями с параметрами объектов, которые вывели систему из состояния устойчивости.

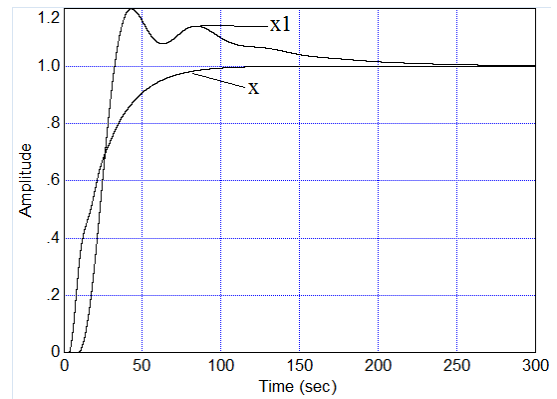


Рис.14. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(\gamma)$

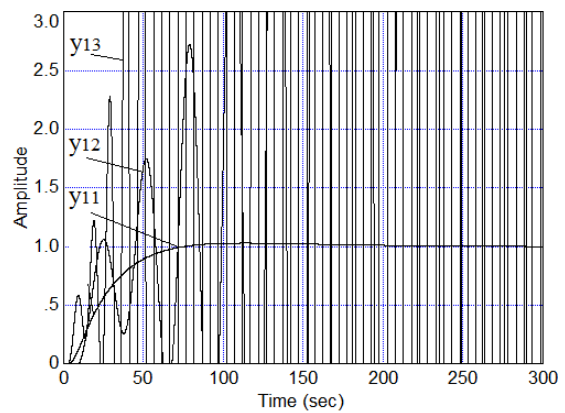


Рис. 15. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(\gamma)$

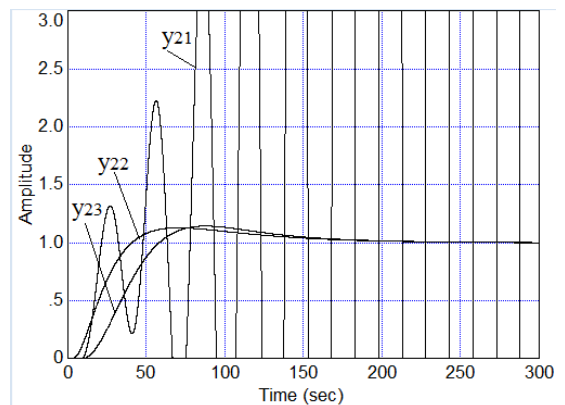


Рис. 16. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(\gamma)$

Дополняя наборную схему моделирования системами с объектами, принимающими эти критические значения, используя критерий $\Psi_3(\gamma, \delta)$, то есть используется критерий с допустимым перерегулированием 20% и моделируется одновременно 6 систем с различными 6

сочетаниями параметров объектов, получим новый результат оптимизации регулятора (см. последнюю строку в Таблице 2). Шесть сочетаний параметров объектов получено добавлением четырех выявленных проблемных сочетаний к исходным двум сочетаниям. На рис. 18 приведены графики переходных процессов с полученным регулятором.

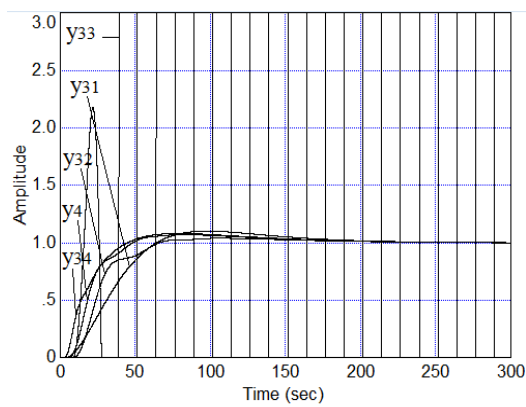


Рис. 17. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(\gamma)$

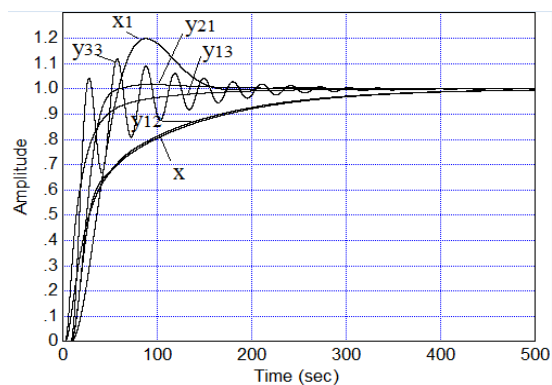


Рис. 18. Переходные процессы объекта с регулятором по критерию $\Psi_3(\gamma)$, уточненному по шести параллельным моделям объекта, т.е. по критерию $\Psi_3(\gamma, \delta)$

7. ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ДАЛЬНЕЙШАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

На рис. 18 представлены переходные процессы только с пятью вариантами сочетаний параметров объекта. На самом деле таких сочетаний гораздо больше. В Таблице 1 дано 13 вариантов, из которых последний представляет собой набор средних значения всех параметров, а первые 12 вариантов – сочетания крайних значений. Целесообразно поставить вопрос о том, насколько полно данная выборка представляет все возможные варианты сочетаний, которых может быть бесконечное

множество. Можно предположить, что конкретные значения постоянных времени минимально-фазовой части модели объекта не столь существенны, как их сумма, то есть вместо рассмотрения в отдельности T_1 и T_2 можно рассмотреть их сумму. Это предположение требует проверки. Также целесообразно решить вопрос, может ли быть понижена величина перерегулирования.

Предлагается следующий метод решения поставленных вопросов.

1. Моделирование систем со всеми вариантами сочетаний крайних значений параметров. Наборы параметров представлены в Таблице 3.

2. К этим вариантам добавим вариант, содержащий средние значения постоянных времени, (колонка Г в Таблице 3) и сравним результат с результатом моделирования при этом же значении их суммы, когда одна из этих величин принимает минимальное значение, а вторая – максимальное значение (колонка С).

3. Для удобства рассмотрения будем объединять графики по четыре, номера соответствующих рисунков даны в строке «Рис» Таблицы 3, соответствие цвета и параметров объекта указаны в колонках таблицы 3 (К – красный, С – синий, Г – голубой, Ч – черный).

4. Результаты моделирования показаны на рис. 19 – 23.

Таблица 3. Параметры объекта к рис. 19 – 26

	К	С	Г	Ч	К	С	Г	Ч
k	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
T_d	3	3	3	3	9	9	9	9
T_1	12	12	24	36	12	12	24	36
T_2	12	36	24	36	12	36	24	36
Рис	19, 23				20, 24			
k	9	9	9	9	9	9	9	9
T_d	3	3	3	3	9	9	9	9
T_1	12	12	24	36	12	12	24	36
T_2	12	36	24	36	12	36	24	36
Рис	21, 25				22, 26			

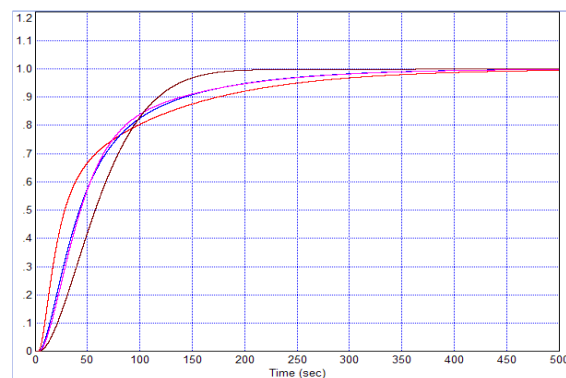


Рис. 19. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\gamma, \delta)$ и параметрами из табл. 3

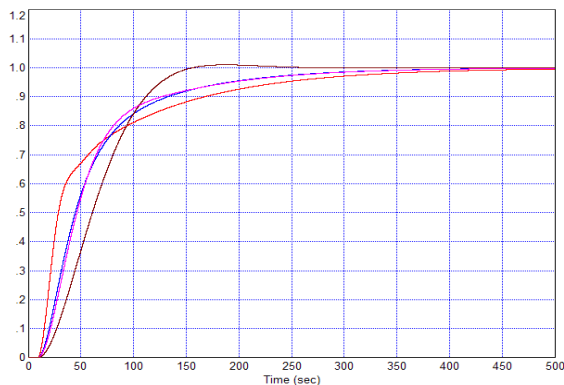


Рис. 20. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\gamma, 6)$ и параметрами из табл. 3

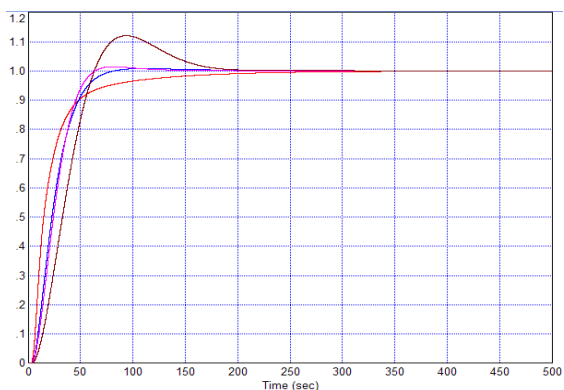


Рис. 21. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\gamma, 6)$ и параметрами из табл. 3

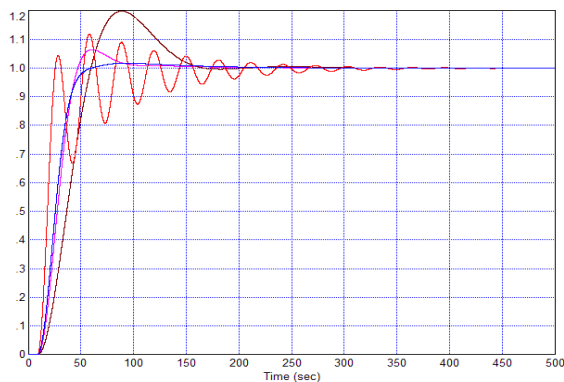


Рис. 22. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\gamma, 6)$ и параметрами из табл. 3

Из анализа рис. 19–22 можно сделать следующие выводы:

1. Предположение, что наиболее важна лишь сумма постоянных времени T_1 и T_2 подтвердилось, соответствующие графики почти везде сливаются, кроме рис. 22, где голубой график характеризуется перерегулированием около 5%, а синий график имеет перерегулирование менее 1%.

2. Наиболее опасными с позиции потери устойчивости являются соотношения параметров, показанные на рис. 22 черным и красным графиками. Эти наборы параметров

характеризуются максимальными значениями запаздывания и коэффициента усиления и крайними значениями суммы постоянных времени минимально-фазовых частей модели объекта. В единственном случае перерегулирование достигает 20% (рис. 22).

3. Наименьшее быстродействие получается при наименьшем значении коэффициента усиления объекта (рис. 19–20).

На этом основании можно предложить попытаться снизить перерегулирование, например, до 5–15%, причем, для окончательного проектирования регулятора применить следующие меры:

1. Задать в критерии (6) соответствующее значение константы $C = 1,05$ или $C = 1,15$.

2. Использовать лишь самые неблагоприятные сочетания параметров объектов, а именно: максимальные значения коэффициента усиления и запаздывания, и крайние значения суммы T_1 и T_2 .

3. Для обеспечения поиска коэффициентов в ограниченной области (и предотвращения фатальной ошибки, вызванной чрезмерным возрастанием какого-либо коэффициента) целесообразно в критерий ввести дополнительный член, принимающий большое значение в случае недопустимого возрастания любого коэффициента регулятора. С этой целью использованы нелинейности типа «зона нечувствительности» с граничными значениями ± 20 , последовательно с ними включенным выпрямителем и сумматором с большим коэффициентом (100), результат добавляется под интеграл, вычисляющий функцию (5), в этом случае получаем новую функцию:

$$\Psi_4 = \int_0^T [|r_1(t)|t + |r_2(t)|t + q] dt \quad (7)$$

$$q = R(k_p) + R(k_I) + R(k_D) \quad (8)$$

$$R(k_N) = 100 \max \{ |k_N| - 100, 0 \} \quad (9)$$

Схема оптимизации в программе *VisSim* показана на рис. 23. Результат окончательной оптимизации регулятора представлен в Таблице 4. Переходные процессы приведены на рис. 24 – 27.

Таблица 4. Итоговые параметры регулятора

Критерий качества	Параметры ПИД регулятора		
	K_p	K_I	K_D
Ψ_4	0.275	0.00374	1.461

По результатам можно сделать следующие выводы:

1. Снижение перерегулирования ниже 15% обеспечено для всех сочетаний крайних значений параметров объекта при использовании регулятора из Таблицы 4.

объектов (после выявления наиболее критических сочетаний параметров) оказалось достаточным для получения надежного результата.

2. Использование только двух моделей

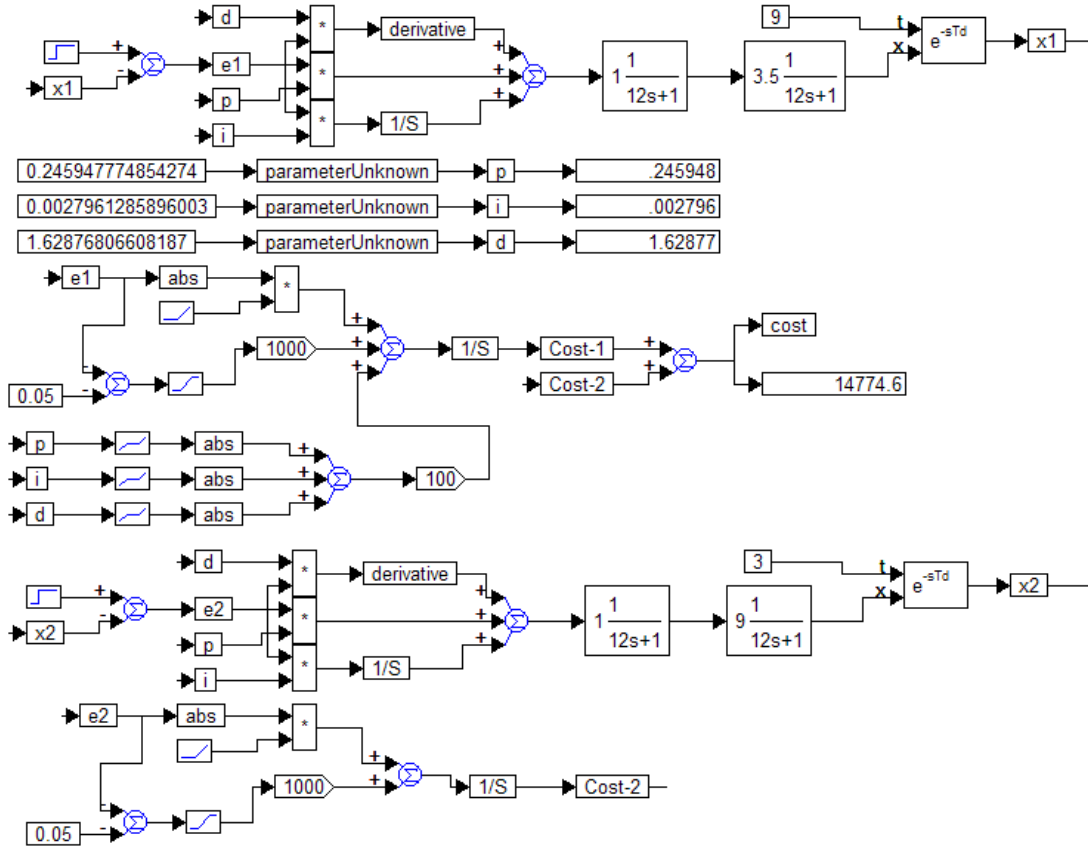


Рис. 23. Схема для численной оптимизации регулятора Ψ_4

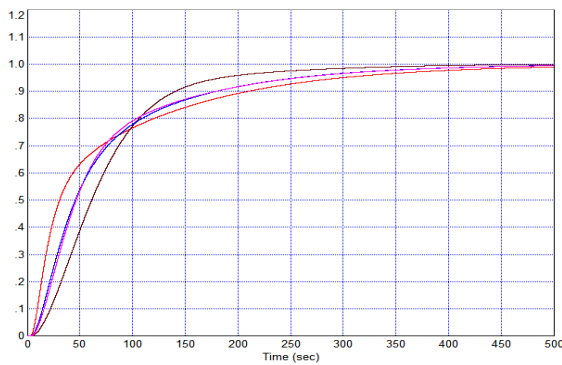


Рис. 24. Переходные процессы объекта с параметрами из табл. 3 и регулятором Ψ_4 (Табл. 4)

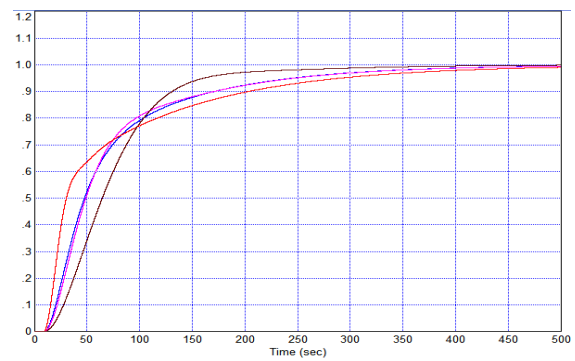


Рис. 25. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\gamma, \delta)$ и параметрами из Табл. 3

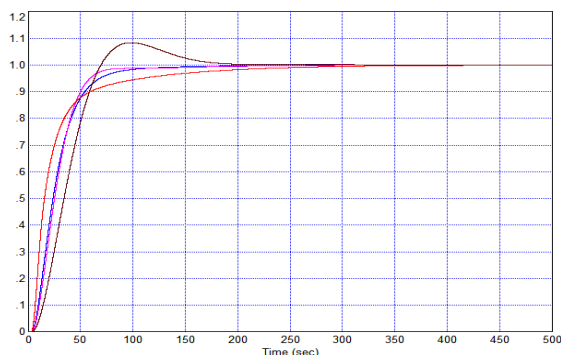


Рис. 26. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\tau, \delta)$ и параметрами из Табл. 3

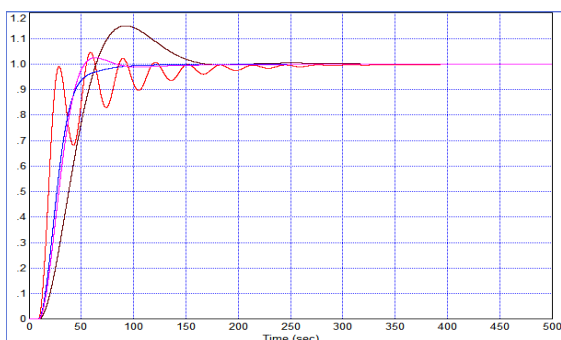


Рис. 27. Переходные процессы объекта с регулятором $\Psi_3(\tau, \delta)$ и параметрами из Табл. 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отыскание критических наборов параметров объекта с включением этих наборов в ансамбль объектов, используемых для оптимизации общего регулятора, дают методiku численной оптимизации для расчета робастного регулятора, обеспечивающего астатическое регулирование с перерегулированием не более 15% и минимальной длительностью переходного процесса в этих условиях (400 с).

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проекты № 7.559.2011 и ГК № П761.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. т. 5. Методы современной теории автоматического управления.
- [2] Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений — СПб: Наука. — 282 с.
- [3] Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления.

[4] Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A. State-space solutions to standart H_2 and H_∞ control problems // IEEE Transactions on Automatic Control AC-34, №8, 1989.

[5] Динамические характеристики энергоблока 180 МВт. Котлоагрегат ТПЕ-214 (Еп-670-13,8-545КТ). Турбина паровая Т-180/210-130. ОАО «НовосибирскЭнерго», Новосибирск, 2001.

[6] V.A. Zhmud, O.D. Yadryshnikov, A.N. Zavorin The study of the influence of high-frequency part of logarithmic frequency response curve to the quality of the feedback controls system // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 97–101.

[7] V. Zhmud, O. Yadryshnikov, A. Zavorin, E. Prokhorenko, R.V. Rao. The Improvement Of The Qualitative Characteristics Of Control Systems With Feedback At Use PI^2D^2 -Regulator // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 280-287.

[8] Воевода А.А., Жмудь В.А. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и запаздыванием. Научный вестник НГТУ, 2007. № 4(29). С. 179 – 184.

[9] Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384с.



Вадим Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: ooo_nips@bk.ru



Олег Ядрышников, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.

E-mail: oleg_yadr@mail.ru



Александр Заворин, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.

E-mail: zavorin@ngs.ru



Александр Полищук, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.

E-mail: aleksandrpolishchuk@gmail.com