

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЛОКАЛЬНО-КОНТУРНЫХ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ**А. Н. Мацкевич (Минск, Беларусь)**

Проблема повышения качества управления динамическими объектами при контролируемых нестационарных возмущениях может быть решена путем использования локально-контурной робастизации управлений, основанных на принципе поглощения. Под нестационарными возмущениями понимаются динамические процессы, обусловленные изменением параметров системы и внешними возмущениями. Локально-контурная робастизация управления предполагает организацию в нестационарной системе локальных контуров робастизирующих обратных связей в целях повышения качества управления.

Использование того или иного способа повышения качества управления зависит от степени информационной неопределенности. Методы и способы коррекции используются для повышения качества работы систем управления при заданных функционально-необходимых элементах в целях удовлетворения определенным требованиям эффективности переходного и установившегося режимов работы. При этом используется последовательная коррекция, если функционально-необходимые элементы являются стационарными по своим параметрам, а конструктивные особенности построения систем допускают реализацию управляющих устройств последовательно с функционально-необходимыми элементами. В противоположных случаях по отношению к условиям стационарности и конструктивным особенностям используется коррекция с искусственной организацией одного или нескольких локальных контуров обратных связей. Инвариантные системы используются, как правило, при стационарных объектах управления и низком уровне возмущающих воздействий.

Решения оптимизационных задач имеют целью определение потенциально достижимого качества функционирования систем при строго определенных условиях и критериях эффективности. Использование методов и способов повышения качества на основе алгоритмов оптимального управления (классическое вариационное исчисление, принцип максимума и динамическое программирование) наиболее соответствует постановкам задач определения видов законов оптимальных управлений. При этом самостоятельной задачей при оптимизации становится конструирование структуры оптимального управляющего устройства, реализующего с той или иной степенью точности закон оптимального управления с учетом заданных ограничений на управляющие воздействия.

Для повышения качества систем управления в условиях неопределенности можно использовать методы идентификации, адаптации и робастизации.

При использовании методов идентификации частично или полностью устраняется неопределенность по отношению к параметрам объекта управления или иным функционально-необходимым устройствам, а также по отношению к структуре системы.

Принципы построения адаптивных систем основаны на использовании текущей информации о состоянии объекта управления в целях обеспечения заданных или оптимальных показателей качества за счет изменения параметров управляющего устройства. В адаптивных системах непосредственно или косвенно оцениваются параметры объекта управления и на основе этой информации определяются параметры управляющего устройства, т.е. адаптивные системы предполагают наличие дополнительных каналов непосредственного или косвенного измерения параметров объекта управления.

В отличие от адаптивного подхода, основанный на нечетких множествах и нечеткой логике, соответствует постановкам задач управления в условиях интервальной неопределенности. Однако теоретически относительно глубоко он разработан для решения статических задач, что делает его использование проблематичным по отношению к

системам с нестационарной динамикой. Получаемые решения с использованием нечеткого подхода также носят нечеткий характер и требуют дополнительной многоэтапной конкретизации и уточнения в целях получения однозначно четких рекомендаций и решений. Теоретические и практические попытки создания интеллектуальных систем управления, информационно поддерживаемых банками данных и базами знаний, на основе нечеткой логики, лингвистической переменной и компьютерной грамматики пока не увенчались успехом.

Указанные недостатки в нестационарных условиях парируются использованием робастного подхода к повышению эффективности управления, основными достоинствами которого являются:

возможность непосредственного учета априорных данных об опыте эксплуатации систем путем структурного включения номинально-эталонной подсистемы по отношению к отработке полезной целевой функции и организации робастного управления "с эталонной моделью" на основе формирования "эталонной невязки";

возможность непосредственного учета априорных данных о средах функционирования систем путем формирования обобщенных возмущений, учитывающих параметрические возмущения (пертурбации) и внешние возмущающие воздействия, обусловленные естественными или искусственными помехами;

возможность использования оптимально-обоснованного принципа компенсации обобщенных возмущений без усложнения структуры системы управления по дополнительным информационно-ресурсным каналам.

В этой связи представляется перспективным развитие методов синтеза робастных систем, обеспечивающих приемлемое качество работы при возмущающих воздействиях и нестабильности параметров объекта управления. Современные подходы к построению робастных систем в большинстве своем ориентированы на задачи робастной устойчивости и, как правило, не рассматривают возможные методы и способы робастизации в целях повышения качества управления, в первую очередь, по критерию точности для высокоточных следящих систем. Исключение составляют работы Я. З. Цыпкина, Б. Т. Поляка, в которых идеологически обосновываются возможные способы построения дискретных робастных систем управления, основанные на принципе поглощения. Задача компенсации возмущений в робастных системах решается не подавлением предварительно измеренного возмущения, а путем включения в управляющее устройство фильтра поглощения, априорно учитывающего информацию о возмущающих воздействиях.

Управляющее устройство робастной системы может содержать модель номинальной системы и фильтр поглощения обобщенного возмущения или устройство предсказания обобщенного возмущения и формирователь обобщенного возмущения, которые включаются в локальный контур цепи обратной связи. Отличие нестационарной системы от номинальной модели заключается в обобщенном возмущении, описываемом в классе регулярных процессов – однородных разностных уравнений. Модель номинальной системы может определяться при номинальных значениях параметров элементов системы, например, в номинальном режиме и при отсутствии возмущений. Фильтр поглощения обобщенного возмущения априорно настроен на определенный закон изменения обобщенного возмущения, его реакция на обобщенное возмущение равна нулю. Обобщенное возмущение в робастных системах определяется суммой параметрического и внешнего возмущений.

В общем случае процессы управления в линейных дискретных системах могут описываться линейными неоднородными разностными уравнениями. Для нахождения общего решения неоднородного уравнения достаточно найти одно какое-нибудь частное решение этого уравнения и прибавить к нему общее решение соответствующего однородно-

го уравнения. Взаимосвязь между неоднородными и однородными непрерывными уравнениями была установлена академиком В. С. Кулебакиным. Для определения коэффициентов полиномов поглощения детерминированных обобщенных возмущений, изменяющихся во времени по линейному, квадратическому, кубическому и иного порядка закону, можно использовать арифметический треугольник Паскаля. Любой коэффициент этого треугольника определяется путем суммирования двух коэффициентов, один из которых находится сверху, а второй – сверху слева относительно искомого. Для этого необходимо: в зависимости от порядка обобщенного возмущения определить коэффициенты треугольника Паскаля до строки, в которой первый член после единицы превышает степень обобщенного возмущения на единицу; в зависимости от порядка обобщенного возмущения записывается выражение для полинома поглощения, учитывая коэффициенты последней строки треугольника Паскаля.

Пусть передаточная функция прямой цепи системы равна

$$K(z) = K_u(z) \frac{z^{-1}P_u(z)}{Q(z)}, \quad (1)$$

где $K_u(z)$ – передаточная функция измерителя рассогласований;

$P_u(z)$, $Q(z)$ – полиномы исполнительного устройства и объекта управления.

Передаточная функция прямой цепи робастной системы имеет вид

$$K(z) = K_u(z) \frac{z^{-1}P_u(z)}{Q(z) - z^{-1}P_u^0(z)Q(z)D_0(z) + z^{-1}P_u(z)Q^0(z)D_0(z)}, \quad (2)$$

где $P_u^0(z)$, $Q^0(z)$ – номинальные полиномы;

$D_0(z)$ – полином предсказания обобщенного возмущения.

Отличие передаточных функций (1) и (2) заключается в наличии в знаменателе выражения (2) слагаемых $-z^{-1}P_u^0(z)Q(z)D_0(z)$ и $+z^{-1}P_u(z)Q^0(z)D_0(z)$.

Предположим, что на систему действуют параметрические возмущения. Вследствие этого изменяются полиномы:

$$Q(z) = Q^0(z) + Q^\delta(z), \quad [-\delta Q^a, +\delta Q^a]; \quad (3)$$

$$P_u(z) = P_u^0(z) + P_u^\delta(z), \quad [-\delta P_u^b, +\delta P_u^b], \quad (4)$$

где $Q^\delta(z)$, $P_u^\delta(z)$ – полиномы, учитывающие законы нестационарных изменений параметров исполнительного устройства и объекта управления;

$\pm \delta Q^a$, $\pm \delta P_u^b$ – интервалы отклонения параметров полиномов $Q(z)$ и $P_u(z)$ относительно номинальных значений.

Условия устойчивости системы, например, с робастным безынерционным ПИ-регулятором

$$K(z, i) = \frac{z^{-1}K_u(K_p^0 + \delta i)}{(1 - z^{-1}) - z^{-1}K_p^0(1 - z^{-1})D_0(z) + z^{-1}(K_p^0 + \delta i)(1 - z^{-1})D_0(z)} \quad (5)$$

в случае изменения параметрического возмущения по линейному закону $K_p^\delta(i) = \delta i$ (где δ – параметр, характеризующий скорость изменения параметрического возмущения; K_p^0 – номинальный коэффициент преобразования регулятора) при полиномах поглощения и предсказания $W(z) = 1 - 2z^{-1} + z^{-2}$; $D_0(z) = 2 - z^{-1}$ и $K_u = 1$ будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \delta i + K_p^0 &> 0; \\ 3\delta i + K_p^0 + 2 &> 0; \\ 3\delta i - K_p^0 + 4 &> 0; \\ -7\delta i - K_p^0 + 2 &> 0; \\ 2\delta^2 i^2 + (K_p^0 + 2)\delta i + 1 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Область устойчивости системы с робастным безынерционным ПИ-регулятором при параметрическом возмущении $K_p^\delta(i) = \delta i$ изображена на рис. 1.

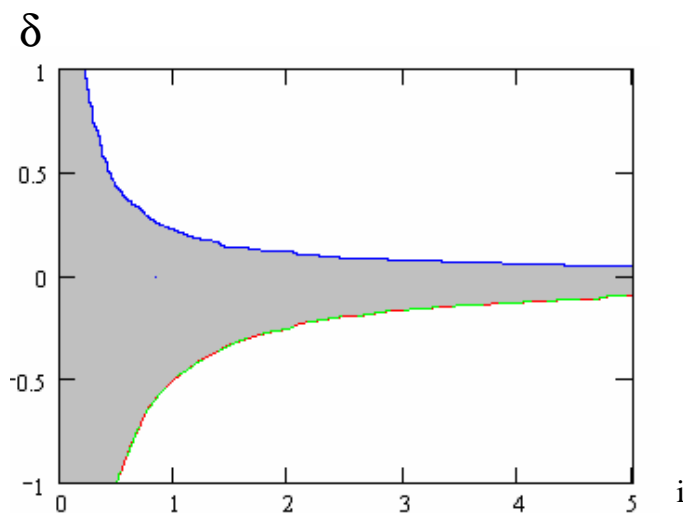


Рис. 1. Область устойчивости системы с робастным регулятором при $K_p^\delta(i) = \delta i$ и $K_p^0 = 0,5$

Зависимости динамических ошибок от времени представлены на рис. 2.

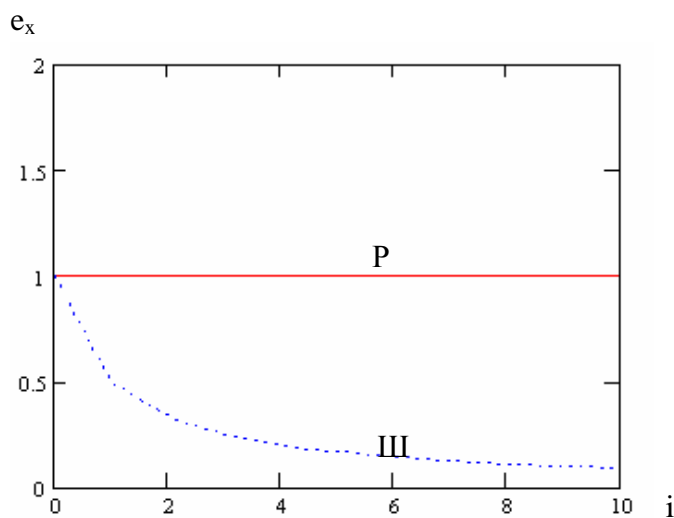


Рис. 2. Зависимости динамических ошибок при $K_p^0 = 1$, $\delta = 1$, $x_1 = 1$ в штатной (III) и робастной (P) системах

Обобщенное возмущение в робастной системе зависит от управляющего воздействия, выходной переменной системы, внешнего возмущения, вариаций полиномов. При высоких порядках уравнения нестационарной системы определить аналитически математическую модель обобщенного возмущения и соответствующие полиномы предсказания и поглощения достаточно сложно. Однако можно легко определить закон изменения обобщенного возмущения с последующей его аппроксимацией типовым нестационарным возмущением путем математического моделирования системы при нестационарных возмущениях.

Формулировка задачи оптимизации робастной системы и формирование алгоритмов ее решения зависят от вида неопределенности в параметрах системы и внешних возмущений. Наличие несколько более полной априорной информации относительно задающих воздействий и возмущений, а также возможность учета этой априорной информации при синтезе управляющего устройства позволяют создать робастно-оптимальные системы управления. Свойства робастно-оптимальных систем определяются выбором критерия оптимальности, моделью номинального объекта и не зависят от внешних нестационарных возмущений.

Синтез робастно-оптимальной системы можно провести в классе нестационарных моделей. В случае нестационарных возмущений в целях обеспечения робастно-оптимальных свойств системы необходимо целенаправленно изменять параметры номинальной модели. Этого можно достичь в случае использования координатно-параметрического подхода при оптимизации номинальной модели, предложенного С. Д. Земляковым и В. Ю. Рутковским. Введение в управляющее устройство системы координатно-параметрического звена позволяет обеспечить настраиваемые свойства оптимальности номинальной модели локально-контурной робастной следящей системы.

В процессе функционирования системы закон изменения пертурбаций и внешних возмущений может изменяться. В этом случае для обеспечения робастных свойств можно предложить локально-контурное со случайной структурой робастное управляющее устройство с идентификатором обобщенного возмущения и блоком фильтров поглощения. Идентификатор обобщенного возмущения подключает тот фильтр поглощения, при котором обеспечиваются в нестационарной системе робастные свойства и заданное качество управления. За счет непредсказуемости изменений параметров системы и внешних возмущений структура робастного управляющего устройства будет изменяться случайным образом. В этом случае можно использовать методы синтеза и анализа систем со случайной структурой, разработанные такими учеными, как И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Ганэ, И. М. Косачев, А. А. Лобатый и др.

При случайных возмущениях и помехах наиболее широкое применение получил критерий минимума среднего значения квадрата ошибки фильтрации. Апостериорное описание вектора фазовых выходных координат в динамических системах со случайной структурой осуществляется системой из взаимосвязанных уравнений. Эта связь проявляется через функции поглощения и восстановления для различных состояний структуры системы. Решение задачи идентификации связано с определением индекса состояния системы и может быть найдено лишь в вероятностном смысле. Значение индекса состояния системы задается дисциплиной разделения времени, свойства которой описываются уравнениями Колмогорова для вероятностей состояний, они же и определяют алгоритм идентификации в робастной системе.

Алгоритму фильтрации соответствует схема, состоящая из канала оценок, блока точности и идентификатора. На выходе канала оценок формируются оценки фильтруемых процессов. На выходе блока точности формируются оценки дисперсий, которые управляют коэффициентами преобразований канала оценок и используются в идентификаторе для формирования вероятностей состояний. Идентификатор управляет рабо-

той канала оценок и блока точности. Апостериорная вероятность формируется идентификатором на основании задающего воздействия, определенных в канале оценок значений первых фазовых координат для каждого состояния и их дисперсий, вырабатываемых в блоке точности. Анализ идентификатора показывает, что его структура не зависит от структуры и параметров самой системы. От структуры и параметров системы зависит структура канала оценок и блока точности. Для анализа локально-контурной робастной системы со случайной структурой необходимо совместное решение уравнений моментов с уравнениями для вероятностей состояний. При анализе нелинейной локально-контурной робастной системы со случайной структурой следует использовать методы статистической линеаризации.

Таким образом, в робастной следящей системе оптимизация номинальной модели позволяет обеспечить оптимальные показатели качества работы по динамической ошибке отработки полезного задающего воздействия, введение в управляющее устройство идентификатора обобщенных возмущений и блока фильтров поглощения – расширить класс компенсируемых неконтролируемых возмущений.