

ЛИВШИЦ Дмитрий Ефимович

МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В
БОЛЬШИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2001

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Устинов С.М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Шкодырев В.П.

кандидат технических наук, профессор

Терехов В.А.

Ведущая организация:

"НИИЭлектромаш" (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 13 декабря 2001 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета по адресу:
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 21, 9 корпус, ауд. 535

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ по адресу:
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Автореферат разослан “ ” ноября 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Малыхина Г.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Большие технические системы по мере развития их структуры и роста числа элементов часто приобретают новые динамические свойства, порождающие проблемы, связанные как с построением новых законов управления такими объектами, так и с выбором параметров управления в уже известных законах. Синтез высокоэффективных законов, не требующих серьезных усилий по последующему выбору их параметров, часто затруднен. Это связано как с большими материальными и организационными трудностями при внедрении новых систем управления большими техническими объектами, так и с тем, что для систем с распределенными на большом расстоянии в пространстве элементами сбор полной информации о векторе состояния невозможен или требует создания дорогостоящей и громоздкой системы телеметрии, что не всегда реализуемо на практике.

В связи с указанными выше проблемами решение задачи параметрической оптимизации управления на современном этапе приобретает особую значимость и актуальность. Вместе с тем, эта задача существенно усложняется, с одной стороны, из-за противоречивости управления, выражающейся во встречном движении на комплексной плоскости корней характеристического уравнения матрицы состояния системы при вариации параметров, а, с другой стороны, в связи с крайне трудоемким вычислением целевой функции в моделях высокой размерности. Последнее объясняется тем, что одно вычисление целевой функции на практике часто включает в себя решение полной проблемы собственных значений для матрицы состояния системы, размерность которой в современных задачах управления может составлять сотни и тысячи. Именно поэтому в последние десятилетия наблюдается большой интерес к разработке нового класса методов параметрической оптимизации управления у нас в стране и за рубежом. Эти методы должны быть ориентированы как на уменьшение количества вычислений целевой функции, так и на увеличение степени надежности получаемого решения. Одним из путей снижения объема вычислений в процессе оптимизации является использование различных аппроксимаций целевой функции, в частности, применение аппарата квадратичного и последовательного квадратичного программирования. Здесь, в первую очередь, следует отметить работы Гилла, Мюррея, Денниса, Море, Шиттковски, Конна, Колемана, чьи методы были успешно доведены до формализованных алгоритмов и реализованы как в специализированных вычислительных пакетах (SNOPT, L-BFGS-B, LANCELOT, NLPQL, QPOPT,

SQOPT и др.), так и в больших программных комплексах (MatLab, библиотеки NAG, IMSL и др.). Дальнейшим исследованиям в этом направлении посвящена и настоящая работа.

Актуальность решения отмеченных задач нашла отражение в рамках программы гранта РФФИ 99-02-18088 “Теоретические основы и исследования динамических свойств больших электроэнергетических объединений и решение проблем управления устойчивостью их режимов” и гранта “Синтез законов квазимодального управления устойчивостью больших распределенных динамических систем при ограниченной измеряемой информации” Министерства Образования РФ в области технических наук по направлению “Автоматика и вычислительная техника”.

Важность указанных задач подтверждается также многочисленными исследованиями, проводимыми во многих странах мира.

Цель работы. Целью работы является создание методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения научно-технической проблемы, связанной с параметрической оптимизацией управления в больших динамических системах. Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие задачи:

- формализовать проблему параметрической оптимизации управления в больших динамических системах как задачу последовательного квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами на параметры управления. Обобщить ее на случай получения единой настройки коэффициентов управления, являющейся робастной на всем множестве значений неопределенных параметров объекта управления;
- разработать эффективные методы решения задачи последовательного квадратичного программирования, успешно работающие в условиях некорректной постановки задачи;
- создать алгоритмы и программное обеспечение, реализующие разработанные методы, и оценить их эффективность на примерах решения реальных прикладных задач в областях электроэнергетики и механики.

Методы исследования. В работе использованы математический аппарат и методы параметрической оптимизации, теория линейных систем, теория обыкновенных дифференциальных уравнений, математический аппарат решения задач квадратичного программирования. Для оценки достоверности численного моделирования сопоставлялись результаты расчетов на ЭВМ при использовании качественно различных программных

продуктов, а также проводилось сравнение с результатами моделирования, полученными другими авторами.

Научная новизна.

1. Разработана процедура сведения задач параметрической оптимизации управления в больших динамических системах к проблемам последовательного квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами на параметры управления.
2. Предложена двухэтапная процедура решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами, которая на основе механизма “уступки” заметно повышает надежность решения ценой незначительного уменьшения качества достигнутого управления, а также позволяет получать оптимальные значения параметров в условиях некорректной постановки задачи.
3. Показано, что при решении задачи квадратичного программирования выведение из “активного” множества одновременно двух или более параметров не всегда допустимо и требует дополнительного математического обоснования.
4. Предложен алгоритм пересчета размера доверительной области, представляющей собой область адекватности аппроксимирующей квадратичной функции исходной целевой функции.
5. Разработан метод последовательного квадратичного программирования для решения задач параметрической оптимизации управления, построенный на базе предложенной двухэтапной процедуры решения задачи квадратичного программирования и разработанного алгоритма пересчета доверительной области.

Практическая значимость.

1. Разработанный метод параметрической оптимизации управления доведен до формализованного алгоритма и программного обеспечения, которые могут быть легко адаптированы к любой предметной области, где решается задача параметрической оптимизации в указанной постановке.
2. Предложенный метод параметрической оптимизации управления реализован в рамках отдельной подсистемы вычислительного комплекса “Поиск”, предназначенного для анализа статической устойчивости режимов больших энергообъединений. Данная версия комплекса успешно используется в НИИ “Энергосетьпроект” и ЦДУ ЕЭС России. Проведены доработки предыдущей версии “Поиска”, использовавшейся, в частности, при выполнении ряда международных проектов.
3. Выполненные в диссертации разработки явились составной частью исследований в рамках программы гранта РФФИ 99-02-18088

“Теоретические основы и исследования динамических свойств больших электроэнергетических объединений и решение проблем управления устойчивостью их режимов” и гранта “Синтез законов квазимодального управления устойчивостью больших распределенных динамических систем при ограниченной измеряемой информации” Министерства Образования РФ в области технических наук по направлению “Автоматика и вычислительная техника”.

4. Разработки диссертации включены в курс “Математические модели технических объектов” для специальности 220400.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Процедура сведения проблемы параметрической оптимизации управления к задаче последовательного квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами на параметры управления, обобщенная на случай получения единой эффективной настройки коэффициентов управления, которая является робастной на всем множестве значений неопределенных параметров объекта управления.
2. Двухэтапная процедура решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами, которая на основе механизма “уступки” заметно повышает надежность получаемого результата ценой незначительного уменьшения качества достигнутого управления, а также позволяет получить оптимальные значения параметров в условиях некорректной постановки задачи.
3. Положение о том, что при решении задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами процедура выведения из “активного” множества одновременно двух или более параметров на основе анализа множителей Лагранжа не всегда допустима и требует дополнительного математического обоснования.
4. Метод последовательного квадратичного программирования для решения задачи параметрической оптимизации управления в больших динамических системах. Алгоритм и программная реализация данного метода как для автономного использования, так и в виде подсистемы оптимизации вычислительного комплекса “Поиск”, предназначенного для анализа и управления статической устойчивостью режимов больших энергообъединений.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Молодежной научной конференции “Современные научные школы: перспективы развития” (Санкт-Петербург, 1998 г.); II международной научно-практической конференции “Информационные технологии в моделировании и управлении” (Санкт-Петербург, 2000 г.); Международной

конференции “Информационные и интеллектуальные системы в управлении” (Псков, 2000 г.); Международной научно-технической конференции “Гибридные системы MODEL VISION STUDIUM” (Санкт-Петербург, 2001 г.); V Всероссийской конференции ассоциации технических университетов России и представительств отраслевых академий наук при СПбГТУ по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах” (Санкт-Петербург, 2001 г.); а также на семинарах кафедры “Информационные и управляющие системы” и кафедры “Механика и процессы управления” СПбГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы, включающего 113 наименований. Диссертационная работа изложена на 132 страницах основного текста, содержит 15 рисунков и 30 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, определена ее цель и поставлены задачи исследования.

В **первой главе** содержится развернутая постановка проблемы параметрической оптимизации управления в больших динамических системах. Дается анализ двух основных подходов: программного управления и метода управления с обратной связью. Формулируется математическая модель исходной системы

$$\frac{dx}{dt} = A(K, P)x, \quad (1)$$

где x – вектор фазовых переменных; A – матрица состояния системы; K – вектор параметров, с помощью которых осуществляется управление; P – вектор неопределенных параметров системы. При этом ставится задача обеспечения приемлемого качества демпфирования на всей совокупности значений, которые могут принимать компоненты вектора P . Для решения этой задачи при реализации процедуры выбора значений компонент вектора K часто ориентируются на:

- степень устойчивости, которая характеризуется самым правым на комплексной плоскости корнем характеристического уравнения;
- взаимное расположение собственных значений матрицы состояния замкнутой системы в левой полуплоскости.

Ряд критериев, ориентированных только на степень устойчивости, обладает существенными недостатками, связанными с негладкостью

используемой целевой функции. Для устранения этих недостатков ранее был предложен критерий – функция качества, ориентированная на совокупность корней характеристического уравнения:

$$F = F^{(1)} + F^{(2)} + \dots + F^{(n)} = \sum_{k=1}^n F^{(k)} \quad (2)$$

$$F^{(k)} = \sum_{\alpha_i^{(k)} \leq \alpha_0^{(k)}} (\alpha_i^{(k)} - \alpha_0^{(k)})^v,$$

где $F^{(k)}$ - функция качества для значения вектора неопределенных параметров объекта управления $P = P_k$,

$\alpha_0^{(k)}$ - заданная величина показателя качества для значения вектора $P = P_k$, выделяющая соответствующую группу доминирующих корней,

$\alpha_i^{(k)}$ - вещественные части корней для значения вектора $P = P_k$, взятые с обратным знаком,

n - количество значений вектора неопределенных параметров объекта управления P , для которых необходимо обеспечить совместную настройку компонент вектора K .

Вместе с тем, существенной особенностью рассматриваемой задачи является наличие ограничений на параметры систем управления, которые часто имеют следующий относительно простой вид:

$$a_j \leq k_j \leq b_j, \quad \forall j \in 1, l \quad (3)$$

где k_j - значение j -го параметра. При этом для проведения процедуры оптимизации функции (2) необходимо либо воспользоваться методами условной оптимизации, либо свести проблему к задаче безусловной оптимизации.

Таким образом, требуется построить метод, который должен позволять решать задачу (2) при условии технологических ограничений (3). Необходимо отметить, что количество вычислений целевой функции должно быть сведено к минимуму, поскольку каждое подобное вычисление часто требует решения полной проблемы собственных значений для матрицы достаточно высокого порядка, что очень трудоемко.

Для решения поставленной задачи был проведен анализ широкого класса методов. Следует отметить, что стандартные подходы, в числе которых методы:

- штрафных и барьерных функций;
- приведенных градиентов и проекций градиентов;
- модифицированных функций Лагранжа;

- спроектированного Лагранжиана и др.

не являются удовлетворительными с точки зрения их применения в поставленной задаче. Наряду со специфическими недостатками, присущими каждому из данных классов методов (неопределенность штрафных и барьерных функций во всех точках, овражность минимизируемых функций, плохая сходимость методов, построенных на основе модифицированных функций Лагранжа при неточных оценках множителей Лагранжа и т.д.), все они имеют общий недостаток, связанный с частым вычислением целевой функции, а также отсутствием механизма, позволяющего предпочесть одно решение другому в случае некорректной постановки задачи.

Одним из подходов, который позволяет существенно минимизировать количество вычислений целевой функции в ходе процесса оптимизации, является использование методов последовательного квадратичного программирования.

В диссертации предложено на каждом шаге работы метода данного класса применять следующую двухэтапную процедуру:

$$\begin{aligned} & \| D\Delta k + p - \Delta \alpha \| \rightarrow \min, \\ & p \geq 0, \quad \Delta k_{low} \leq \Delta k \leq \Delta k_{up} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\| \Delta k \| \rightarrow \min, D\Delta k \leq r, \Delta k_{low} \leq \Delta k \leq \Delta k_{up}, r = D\Delta k^*, \quad (5)$$

где матрица D представляет собой матрицу чувствительности собственных значений к вариации параметров, $\Delta \alpha$ - желаемое смещение характеристических корней влево на комплексной плоскости, Δk - вариация вектора параметров управления. Введение вектора p снимает ограничения на смещение влево на комплексной плоскости совокупности доминирующих характеристических корней. Вектор Δk^* является решением задачи первого этапа (4).

В случае некорректной постановки задачи, когда решение проблемы первого этапа (4) не является единственным, предлагается реализовать второй этап (5). Такая двухэтапная процедура позволяет выбрать среди всех решений задачи (4) то, которое обладает наименьшей длиной, а, следовательно, наиболее предпочтительно с точки зрения адекватности линейной модели (4) исходной проблеме. Кроме того, на втором этапе двухэтапной процедуры часто целесообразно вводить механизм “уступки”: ценой незначительного уменьшения качества управления, достигнутого после решения задачи (4), при решении (5) ослабляется неравенство $D\Delta k \leq r$, что позволяет уменьшить длину вектора Δk и существенно увеличивает

надежность получаемого результата. С математической точки зрения механизм “уступки” сводится к следующему:

- если в векторе $\mathbf{r}$ найдется компонента r_i такая, что $r_i < \Delta\alpha_i$, то следует положить $r_i = \Delta\alpha_i$. Это требование разумно, так как ценой несущественной уступки по $\Delta\alpha$ (все равно желаемое изменение демпфирования i -ой составляющей движения обеспечено) возможно удастся снизить $\|\Delta k\|$;
- снизить требования по ряду компонентов достигнутого значения вектора $\Delta\alpha$ после решения задачи (4), что приводит к некоторому ослаблению неравенств при решении задачи (5).

В такой постановке проблемы основная трудоемкость метода ее решения связана с вычислением матрицы D (используется QR алгоритм) при формировании задачи первого этапа (4), а не собственно с решением задачи первого этапа (4) и задачи второго этапа (5).

Для широкого класса практических приложений не требуется значительного количества пересчетов матрицы D при поиске оптимальных настроек параметров систем управления соответствующими техническими объектами. Это связано с достаточно хорошей линеаризуемостью их моделей в силу физической природы самих объектов управления.

Важным моментом является то, что при формулировании задач (4) и (5) следует рассматривать не все собственные значения матрицы состояния системы (1) – необходимо принимать в расчет только собственные значения, опасные с позиции устойчивости. Это приводит к тому, что, как правило, на практике вектор $\Delta\alpha$ имеет небольшую размерность. В качестве параметров управления (вектор $\Delta\mathbf{k}$) также следует рассматривать не все возможные параметры управления, а только те из них, которым соответствуют значимые по модулю коэффициенты чувствительности по отношению к управляемым собственным числам.

Необходимо отметить, что постановка задачи (4) – (5) справедлива как в отсутствии неопределенных параметров объекта управления (вектор $\mathbf{P}$ в системе (1) исключается), так и при их наличии. В последнем случае при решении задач (4) – (5) получается робастная настройка параметров системы управления для всего диапазона изменения неопределенных параметров объекта.

Вторая глава посвящена построению нового метода последовательного квадратичного программирования для решения задач параметрической оптимизации управления в больших динамических

системах. Любой метод последовательного квадратичного программирования может быть разбит на три стадии:

- формирование квадратичной модели исходной нелинейной функции и задание области ее адекватности по отношению к исходной нелинейной целевой функции;
- решение задачи квадратичного программирования;
- расчет значения исходной нелинейной функции в точке, полученной в результате решения задачи второй стадии, возвращение к первой стадии.

Во второй главе содержится обзор стандартных методов решения задач квадратичного программирования и алгоритмов пересчета размера области адекватности квадратичной модели исходной нелинейной целевой функции.

В результате анализа методов квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами выявлено, что их ключевым отличием друг от друга является механизм исключения ограничений из "активного" множества. Показано, что одновременное исключение уже двух ограничений на основе информации о знаках множителей Лагранжа не всегда является возможным и требует дополнительного математического обоснования.

Для выбора алгоритма решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами с целью его использования в предлагаемом методе параметрической оптимизации управления после всестороннего предварительного анализа для дальнейшего детального тестирования были взяты четыре наиболее популярных алгоритма, которые покрывают все многообразие реализаций методов этого класса. Для проведения сравнения с согласия авторов были получены оригинальные программные реализации соответствующих алгоритмов:

- ⇒ алгоритм BVLS;
- ⇒ алгоритм GPCG;
- ⇒ алгоритм QPROG;
- ⇒ алгоритм QP.

Первый из них реализует схему, в которой на каждом шаге решается задача наименьших квадратов, а исключение переменных из "активного" множества осуществляется согласно знаку компонент вектора градиента. Второй отличается тем, что в качестве направления поиска используется не только направление на глобальный оптимум в текущем подпространстве, но и направление вектора антиградиента. Принципиальным отличием третьего алгоритма от рассмотренных выше двух является решение не прямой, а двойственной задачи. И, наконец, четвертый алгоритм реализует

общепринятую базовую схему решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами.

В результате проведенного тестирования было предложено использовать на первом этапе (4) разработанной двухэтапной процедуры алгоритм BVLS, а на втором этапе (5) - алгоритм QR.

Помимо выбора алгоритма решения задачи квадратичного программирования во второй главе подробно рассматриваются вопросы, связанные с пересчетом размера области адекватности квадратичной модели исходной нелинейной целевой функции. Пусть $F(x)$ - минимизируемая функция, а $L_k(w)$ - ее квадратичная модель в точке x_k , тогда

$$L_k(w) = F(x_k) + g(x_k)^T w + \frac{1}{2} w^T H(x_k) w, \quad (6)$$

где $g(x_k)$ и $H(x_k)$ - градиент и матрица Гессе (или приближения к ним) соответственно. Шаг s_k , представляющий собой решение задачи квадратичного программирования, предполагается искать как

$$\min \{L_k(s_k) : \|M_k s_k\| \leq \Delta_k\}, \quad (7)$$

где M_k - масштабирующая матрица, а Δ_k - размер доверительной области. В предложенном методе для решения задачи (7) используется комплекс задач (4) - (5). Вводится характеристика точности квадратичной модели

$$\theta_k = \frac{F(x_k) - F(x_k + s_k)}{L_k(0) - L_k(s_k)}, \quad (8)$$

при этом неравенство $\theta_k \geq 1$ равносильно неравенству

$$F(x_k + s_k) \leq L_k(s_k), \quad (9)$$

что говорит о том, что уменьшение квадратичной модели было пессимистичным прогнозом уменьшения целевой функции. Таким образом, желательно поддерживать значения θ_k близкими к единице. В диссертационной работе использовалась вместо (8) и другая характеристика точности квадратичной модели.

Стандартные алгоритмы пересчета размера доверительной области обладают одним общим недостатком, а именно: эвристическим способом выбора используемых констант и механизма перехода с одной ветви алгоритма на другую.

В связи с невозможностью при решении широкого комплекса практических задач остановиться ни на одном из стандартных алгоритмов, был предложен новый алгоритм пересчета размера доверительной области. Хотя данный алгоритм также построен на основе эвристического выбора констант, связанных с пересчетом размера доверительной области, он

успешно зарекомендовал себя на широком классе практических приложений из различных предметных областей.

Алгоритм пересчета размера доверительной области Δ_k .

Пусть заданы константы μ, η , а также выполняется условие $0 < \mu < \eta < 1$.

Тогда:

$$x_{k+1} = \begin{cases} x_k + s_k, & \theta_k > \mu \\ x_k, & \theta_k \leq \mu \end{cases}$$

- если $\theta_k \leq \mu$, $\Delta_{k+1} = a \|s_k\|$;
- если $\theta_k \in (\mu, \eta)$, $\Delta_{k+1} = \Delta_k$;
- если $\theta_k \geq \eta$, $\Delta_{k+1} = \max \{b \|s_k\|, \Delta_k\}$;

$$\mu \in (0.1; 0.3); \eta \in (0.7; 0.9).$$

Значение параметров алгоритма a и b осуществляется исходя из условия $ab=1$ и, как правило, имеет вид: $(a; b) = (0.5; 2)$.

В **третьей главе** рассматривается алгоритм, построенный на основе предложенного метода параметрической оптимизации управления. Подтверждается его высокая эффективность при решении различных задач электроэнергетики и механики.

Алгоритм параметрической оптимизации управления.

Шаг_1. Выбор стартового вектора в пространстве параметров оптимизации: $k=k_0$, выбор размера начальной доверительной области: $\Delta=\Delta_0$, вычисление собственных значений матрицы состояния системы (1) в стартовой точке при тех значениях вектора неопределенных параметров объекта управления, для которых необходимо получить робастную настройку.

Шаг_2. Вычисление матрицы чувствительности к собственным значениям, демпфирование которых необходимо улучшить.

Шаг_3. Формирование и решение задачи квадратичного программирования первого этапа (4).

Шаг_4. Формирование и решение задачи квадратичного программирования второго этапа (5). Получение желаемого вектора решения Δk .

Шаг_5. Изменение текущего вектора в пространстве параметров оптимизации: $k := k + \Delta k$.

Шаг_6. Вычисление собственных значений матрицы состояния системы (1) в текущей точке k пространства оптимизируемых параметров при тех значениях вектора неопределенных параметров объекта управления,

для которых необходимо получить робастную настройку. Если желаемое демпфирование достигнуто, то завершение работы алгоритма.

Шаг_7. Принятие решения о том, является ли текущее значение вектора параметров оптимизации “лучшим”, чем его предыдущее значение (в случае интерактивного режима решение принимает пользователь, в случае автоматического режима решение принимается на основании сравнения значений функции качества в данной и предыдущей точке, а также степени адекватности квадратичной модели исходной нелинейной функции). Если текущая точка в пространстве параметров оптимизации является “лучше” предыдущей, то осуществляется переход на **шаг_8**, в противном случае - на **шаг_9**.

Шаг_8. Пересчет размера доверительной области. Переход на **шаг_2**.

Шаг_9. Уменьшение размера доверительной области в соответствии с алгоритмом пересчета размера доверительной области. Возвращение к предыдущему значению вектора параметров: $k := k - \Delta k$. Переход на **шаг_3**.

В третьей главе подробно рассмотрено применение данного алгоритма для решения задач из таких предметных областей, как электроэнергетика и механика. В качестве первой электроэнергетической модели рассмотрена тестовая схема *Энергосетьпроекта* (ЭСП), которая близка по характеристикам к фрагменту объединенной энергосистемы стран бывшего СССР. Она включает, в основном, сети 220, 500 и 1150 кВ, имеет 12 эквивалентных генераторов, 8 из которых оснащены автоматическими регуляторами сильного действия. Линия электропередачи 1150 кВ протяженностью 2400 км связывает три объединенные энергосистемы: Урал, Казахстан и Сибирь. Модель (1), построенная на основании данной схемы, содержит более 600 дифференциальных уравнений. В качестве второй электроэнергетической модели рассмотрена стандартная тестовая схема IEEE, которая называется *New England* и является популярной в кругах электроэнергетической общественности мира для демонстрации новых методов в области устойчивости и управления. Для обеих моделей были получены настройки, обеспечивающие статическую устойчивость как для отдельно взятых режимов работы, так и для их совокупностей.

Приведены результаты, свидетельствующие о том, что хотя разработанный алгоритм изначально был ориентирован на решение задач высокой размерности, он успешно зарекомендовал себя и на проблемах, в которых размерность исходной системы невелика. Ярким примером является задача из области механики, связанная с параметрической оптимизацией управления для систем с упругими элементами (общий дифференциальный порядок системы в форме (1) составляет от 6 до 11 уравнений). Одна из

проблем, успешно решенная с помощью разработанного алгоритма, заключается в обеспечении устойчивости системы, состоящей из двух инерционных и одного упругого элемента (*Benchmark System*).

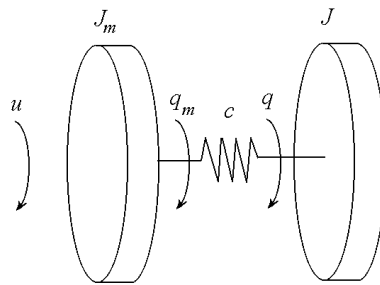


Рис. 1 Benchmark System

Задача состоит в синтезе регулятора по положению - звена, имеющего дробно-рациональную передаточную функцию, обеспечивающего гарантированное качество замкнутой системы на всем диапазоне изменения неопределенных параметров объекта управления. Математическая модель системы имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_m + \xi(q_m - q) &= u & 1 \leq \xi \leq \bar{\xi} \\ \ddot{q} + \mu\xi(q - q_m) &= 0 & \underline{\mu} \leq \mu \leq \bar{\mu} \end{aligned}, \quad (10)$$

где q_m, q - координаты инерционных звеньев; μ и ξ - неопределенные параметры объекта управления, на всем диапазоне изменения которых необходимо обеспечить устойчивость системы; u - приложенное управление:

$$u = -K(p)(q - q^d), \quad K(p) = k \frac{a_2 p^2 + a_1 p + 1}{b_2 p^2 + b_1 p + 1}, \quad (11)$$

где q^d - желаемое значение координаты q ; k, a_1, a_2, b_1, b_2 - параметры регулятора, по которым ведется оптимизация.

Показано, что для аналогичной системы, содержащей три инерционных и два упругих элемента, невозможно обеспечить приемлемую степень устойчивости на всем диапазоне изменения неопределенных параметров объекта управления без введения естественного демпфирования.

По результатам исследований сделан вывод о том, что для задач из обеих предметных областей разработанный метод зарекомендовал себя существенно лучше, чем ранее использовавшиеся методы (градиентный метод, симплекс-метод, различные ньютоновские и квази-ньютоновские методы и т.д.) как с точки зрения надежности получаемого решения, так и с точки зрения вычислительной эффективности процедуры оптимизации. В подтверждение этого факта приведены подробные сравнительные характеристики разработанного алгоритма со стандартно используемыми алгоритмами решения задачи параметрической оптимизации для проблем из данных предметных областей.

Заключение

Работа посвящена разработке новых методов параметрической оптимизации в больших динамических системах. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Проблема параметрической оптимизации управления в больших линейных динамических системах сведена к решению задачи последовательного квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами на параметры управления. Предложенная процедура сведения обобщена на случай получения единой эффективной настройки коэффициентов управления, являющейся робастной на всем множестве значений неопределенных параметров объекта управления.
2. Предложено применять двухэтапную процедуру для решения задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами на каждом шаге работы метода последовательного квадратичного программирования. Данная двухэтапная процедура использует разработанный механизм “уступки”, что позволяет существенно повысить надежность получаемого решения ценой незначительного уменьшения качества достигнутого управления. В случае некорректной постановки задачи предложенная двухэтапная процедура также позволяет существенно повысить надежность получаемого решения.
3. Показано, что главным отличием различных методов квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами является то, какому числу параметров, вышедших на ограничения на предыдущих шагах метода (“активное” множество параметров), разрешается изменение на последующих шагах метода. Доказано, что выведение из “активного” множества одновременно двух или более параметров не всегда допустимо и требует дополнительного математического обоснования. На основе выполненного сравнительного анализа характеристик различных методов квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами сделаны рекомендации по использованию наиболее эффективных из них на каждом шаге предложенной двухэтапной процедуры.
4. Проведен сравнительный анализ методов последовательного квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами и предложен новый метод этого класса, эффективный для решаемой задачи параметрической оптимизации управления в больших

динамических системах. Предложен алгоритм пересчета размера доверительной области (области адекватности аппроксимирующей квадратичной функции исходной целевой функции) в разработанном методе последовательного квадратичного программирования.

5. Разработан алгоритм, реализующий предложенный метод последовательного квадратичного программирования. Данный алгоритм имеет программные реализации как для автономного использования, так и в виде подсистемы оптимизации вычислительного комплекса “Поиск”, предназначенного для анализа и управления статической устойчивостью режимов больших энергообъединений.
6. Оценена эффективность предложенного метода выбора оптимальных значений параметров систем управления на примере моделей реальных энергосистем при решении задач анализа и управления статической устойчивостью больших энергообъединений. Установлен ряд случаев, когда предложенный метод позволил обеспечить высокое качество управления, недостижимое с помощью ранее использовавшихся методов. Сделаны рекомендации по выбору настроек автоматических регуляторов возбуждения в моделях российской и зарубежной энергосистем как для отдельно рассматриваемых режимов работы, так и для их совокупности.
7. Предложенный метод успешно применен при решении задач параметрической оптимизации управления для систем с упругими элементами. Для задачи с двумя инерционными и одним упругим элементом получена настройка, робастная на всем множестве значений неопределенных параметров объекта управления; при этом достигнута более высокая вычислительная эффективность по сравнению с методами, применявшимися ранее для решения этой задачи. Для задачи с тремя инерционными и двумя упругими элементами получено высокое качество управления на определенных подмножествах всего диапазона изменения неопределенных параметров объекта управления. Показана невозможность получения единой робастной настройки на всем множестве значений неопределенных параметров объекта управления при использовании регулятора как третьего, так и более высоких (четвертого и пятого) порядков. Вместе с тем, получена единая робастная настройка для данной модели при условии учета естественного демпфирования.

Публикации по теме диссертации

1. Д.Е.Лившиц, С.М.Устинов Разработка подсистем вычислительного комплекса “ПОИСК” для анализа устойчивости и управления демпферными свойствами режимов больших энергообъединений //Молодежн. научн. конф. “Современные научные школы: перспективы развития”, матер. докл. Ч.2, СПб, СПбГТУ, 1998, с.135-136.
2. Д.Е.Лившиц, С.М.Устинов Метод параметрической оптимизации управления в больших динамических системах// Труды II международной научн.-практич. конф. ”Информационные технологии в моделировании и управлении”, 20-21 июня 2000г., СПб, СПбГТУ, стр. 234-236.
3. Livshits D.E., Ustinov S.M Automated procedure of optimal parameters values selection for control systems dynamic properties of complicated technical objects // Proc. The International Conference “Intelligent Systems and Information in Control” (Pskov, June, 19-23, 2000).-SPb STU, pp.56-59.
4. Д.Е.Лившиц, С.М.Устинов Методика выбора оптимальных значений параметров систем управления устойчивостью режимов больших энергообъединений // Труды СПбГТУ №482 “Вычислительные измерительные и управляющие системы”, 2001, стр.17-22.
5. В.А. Масленников, С.М. Устинов, Д.Е. Лившиц Эффективное изучение проблем статической устойчивости энергосистем на основе вычислительного комплекса “ПОИСК” //Труды междунар. научн.-техн. конф. “Гибридные системы MODEL VISION STUDIUM”, СПб, СПбГТУ, 2001, с.69-71.
6. Д.Е.Лившиц, С.М.Устинов Выбор настроек регуляторов возбуждения для повышения демпферных свойств режимов больших энергообъединений// Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 8-9 июня 2001г., С.-Петербург, СПбГТУ, с.211-212.