

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОИСКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ САПР ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: Математические поисковые методы, задача параметрической оптимизации мехатронной системы, численно-аналитические методы исследования в многопараметрических задачах.

Необходимость учета множества взаимовлияемых и независимых факторов и многомерность пространства параметров делает задачу параметрической оптимизации мехатронной системы научно интересной и определяет актуальность создания новых методик оптимизации на основе специальных математических методов и моделей. В настоящее время решение каждой задачи оптимального исследования требует индивидуального подхода и связано с применением нескольких методов поиска оптимального решения. Такой подход позволяет осуществлять адаптацию методов поиска к особенностям и трудностям конкретной задачи, и упростить задачу выбора метода оптимального проектирования и исследования.

Keywords: Mathematical search techniques, the problem of parametric optimization of mechatronic systems, numerical and analytical methods for multivariable problems.

It is required to consider multiple interdependent and independent factors and multidimensionality of space of parameters. This fact makes the problem of parametric optimization of mechatronic systems scientifically interesting and determines the relevance of new optimization techniques based on special mathematical methods and models. Currently, the solution of a problem of optimization requires an individual approach and involves the use of several methods of searching for the optimal solution. This approach allows adapting the methods of searching for specific features and constraints of the problem and simplifying the problem of selecting the method of optimal design and research.

Современная элементная “база” полупроводниковой преобразовательной техники позволяет реализовать различные мехатронные схемы (МТС) с асинхронными двигателями (АД) в диапазоне малой, средней и даже большой мощности. МТС с АД используются в качестве привода устройств общей, специальной и, что является чрезвычайно актуальным, бытовой техники [1]. Известна устойчивая тенденция роста доли выпуска МТС с АД в связи с увеличивающейся автоматизацией отраслей производства, повышением требований к надежности и сроку службы, а также по экономическим показателям работы различных технических устройств. Наибольшее применение МТС с АД нашли в электроприводе малой и средней мощности, где регулирование частоты вращения АД необходимо по технологическим причинам или дает значительную экономию энергии и ресурса. В то же время, применение МТС с АД малой мощности в качестве привода устройств бытовой электротехники, ограничено, что связано, прежде всего, с относительно высокой стоимостью таких систем. Однако, учитывая тенденцию постоянного снижения цен на силовую полупроводниковую технику, а так же результаты разработки простых и надежных МТС с оптимально выбранными характеристиками, можно смело прогнозировать их широкое внедрение в различные промышленные, бытовые и сельскохозяйственные устройства.

Одной из главных особенностей современного этапа развития теории МТС является слияние непосредственного электромеханического преобразователя энергии с полупроводниковыми цепями его питания и управления в единую мехатронную систему, параметры и характеристики которой в равной мере

определяются всеми ее звеньями [2, 3]. Создание математической модели и последующее проектирование такой системы значительно усложняются. В связи с невозможностью применения стандартных методик при таком подходе значительно усложняется также и оптимизационное исследование подобных систем. Необходимость учета множества взаимовлияемых и независимых факторов и многомерность пространства параметров делает задачу научно интересной и определяет актуальность создания новых методик оптимизации на основе специальных математических методов и моделей, которые ориентированы на применение современных вычислительных средств и компьютерных технологий исследований. Подобный подход к исследованию позволяет с необходимой точностью учесть все существенные особенности реальных электромагнитных и полупроводниковых устройств, входящих в состав МТС, определить интересующие характеристики системы через динамику процесса электромеханического преобразования энергии с минимальными допущениями [4, 5]. Так же важное значение приобретают вопросы создания математической модели МТС и организации ее эффективного решения на средствах современной вычислительной техники.

Важными в теории МТС являются аналитические и комбинированные, численно-аналитические методы исследования [6, 7]. Как правило, при анализе сложных МТС оказывается невозможным получить точные аналитические решения, и исследования проводятся на основе численных методов, однако это не исключает применение аналитических преобразований на отдельных этапах исследования с целью сокращения доли численной переработки. Подобные

аналитические преобразования эффективны на этапе разработки расчетной электрической схемы МТС, где они преследуют цель снижения порядка системы дифференциальных уравнений и, соответственно, уменьшения времени их решения на ЭВМ.

Применение численных методов анализа позволяет исследовать процессы в нелинейных моделях электрических машин (ЭМ) и отказаться от ряда допущений теории классической электрической машины. Кроме того, при работе электрической машины в составе сложной МТС возрастает число и порядок дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в системе, и их исследование становится возможным только на основе численных методов расчета [4].

Адекватность математической модели на основе теории цепей и реальных электромагнитных процессов в МТС во многом определяется точностью задания величины и законов изменения параметров электрической машины. Важную роль при этом приобретают численные методы расчета и анализа электромагнитных полей, получившие в настоящее время широкое развитие. Эти методы позволяют уточнить расчетные формулы для определения параметров схемы замещения ЭМ в различных режимах ее работы, учесть их нелинейный характер и тенденцию изменения. Зная картину поля в воздушном зазоре машины – пространстве, где сосредоточена энергия магнитного поля, можно определить напряжения, токи, моменты, электрические параметры и другие величины в установившихся и переходных процессах. Однако расчет даже в простых по конструкции ЭМ представляет собой трудную задачу. В тех случаях, когда ЭМ работает в составе МТС со звеном постоянного тока, появляются дополнительные сложности в сопряжении методов теории цепей и методов теории поля при описании процессов в различных частях системы [8].

На сегодняшний день разработано множество эффективных аналитических, численных и комбинированных методов исследования математических моделей, позволяющих учесть специфические условия работы ЭМ в составе МТС. Сложность структуры современных МТС делает практически невозможными теоретические исследования электромеханических процессов без применения на отдельных этапах средств современной вычислительной техники. В то же время недостаточно изучен ряд теоретических вопросов, связанных с проблемой параметрической оптимизации МТС, мощность которых соизмерима с мощностью источника питания, и где не учтено влияние, как параметров элементов предвключенных цепей, так и законов управления силовыми полупроводниковыми вентилями в них.

При автоматизированном проектировании различных технических устройств, в том числе и объектов электромеханики, одной из важнейших является задача принятия оптимальных решений с помощью ЭВМ [9]. Общим для задач принятия оптимальных решений, возникающих на разных

этапах проектирования, является то, что они могут быть сформулированы математически как задача нелинейной оптимизации. В большинстве случаев необходимо для заданной математической модели проектируемого устройства подобрать такие значения варьируемых параметров, чтобы они обеспечивали экстремальное значение (максимум или минимум) одной или нескольких из наиболее важных технико-экономических характеристик при условии, что другие характеристики удовлетворяют заданной совокупности технических требований. К сожалению, среди численных методов поиска оптимальных решений, которые получили название методов оптимального проектирования (методов оптимизации, методов поиска, методов оптимального исследования), не существует единого универсального, который позволял бы эффективно решить любую задачу нелинейной оптимизации [7, 9].

В настоящее время решение каждой задачи оптимального исследования требует индивидуального подхода и связано с применением нескольких методов поиска оптимального решения, и даже в этом случае успех во многом будет зависеть от квалификации и опыта исследователя. В связи с этим в современных разрабатываемых системах и методах оптимального проектирования большое внимание уделяется интерактивности принятия оптимальных решений, когда исследователь имеет возможность оперативно взаимодействовать с ЭВМ на любом этапе решения своей задачи. При этом в результате диалога «человек–ЭВМ» он может менять как число, так и тип варьируемых переменных, выбирать наиболее эффективный в сложившейся ситуации метод поиска, подстраивать численные параметры методов к конкретным особенностям оптимизируемой задачи. Такой подход позволяет осуществлять адаптацию методов поиска к особенностям и трудностям конкретной задачи, и упростить задачу выбора метода оптимального проектирования и исследования [10].

Традиционно задачи принятия оптимального решения разделяют на [11]:

Линейные задачи – целевая функция линейна, а множество допустимых параметров, на котором осуществляется поиск экстремума, задается системой линейных равенств и неравенств.

Нелинейные задачи:

а) выпуклые – целевая функция выпуклая и выпукло множество допустимых параметров;

б) квадратические – целевая функция квадратична, а ограничения являются линейными равенствами и неравенствами.

По области существования оптимальных параметров алгоритмы, решающие задачу оптимизации, классифицируются на:

решающие задачу оптимизации без ограничений на область существования оптимальных параметров (оптимизация унимодального критерия, метод последовательного изменения переменных, метод конфигураций, метод сопряженных направлений и т.д.);

решающие задачу оптимизации с ограничениями в виде равенств и неравенств (метод скользящего спуска, градиентный метод);

решающие задачу оптимизации с ограничениями на дискретность параметров (метод Гомори, метод вектора спада, метод направляющих окрестностей).

По виду применяемого алгоритма и способу представления целевой функции методы оптимизации можно разделить на следующие:

Поисковые методы, в которых направление минимизации определяется на основании последовательных вычислений критерия (оптимизация унимодального критерия, метод последовательного изменения переменных, метод конфигураций, метод скользящего спуска). Здесь не требуется непрерывности целевой функции, а также существования производных. Эти методы наиболее удобны на практике для большинства решаемых задач;

Поисковые методы, использующие факт существования у целевой функции двух производных (метод сопряженных направлений). Сложность при подготовке задачи к решению на ЭВМ компенсируется в задачах нелинейного программирования наибольшей скоростью сходимости;

Параллельные методы поиска, которые можно подразделить на:

а) Метод равномерного распределенного поиска. Испытания проводятся в точках, определяемых алгоритмом, использующим равномерно распределенные последовательности (ЛПт – последовательности), что позволяет определить их на одинаковых гиперкубах пространства параметров. Главным преимуществом метода является отсутствие экспоненциального увеличения количества вычислений при увеличении количества рассматриваемых точек в пространстве параметров;

б) Метод равномерного дихотомического поиска. Испытания проводятся парами, которые равномерно расположены в области пространства параметров. Недостатком метода является отсутствие учета информации о значениях критериев в уже вычисленных точках при выборе следующей пары точек;

в) Метод блочного поиска. Все испытания в области пространства параметров разделяют на блоки, в каждом из которых проводится n_i испытаний. Результаты, полученные в предыдущем блоке, определяют стратегию выбора точек в последующем блоке. Недостатком является необходимость предварительного задания числа блоков.

Так как данные методы поиска широкого применения при исследовании систем электропривода не получили, то рассмотрим подробнее их классификацию в соответствии с решаемой ими задачей:

1. Методы одномерного поиска оптимума унимодальной функции. Хотя унимодальность целевой функции не является характерным

свойством сложных электротехнических систем [12], существует ряд специальных методов, которые позволяют использовать свойство унимодальности на отдельных участках произвольной целевой функции. При наличии априорной информации об унимодальности оптимизируемого критерия появляется возможность построения эффективных методов поиска его экстремума.

Критерием для оценки эффективности этих методов поиска является величина длины неопределенности $Ln = \max \{\ln(xk)\}$, где находится искомый экстремум.

К данному классу методов относят метод дихотомии (половинного деления), метод Фибоначи, метод золотого сечения.

2. Методы поиска локального экстремума многопараметрических функций. Общей задачей данных методов является поиск локального экстремума целевой функции за наименьшее число экспериментов. Причем за один эксперимент необходимо добиться не только хорошей величины критерия, но и получить максимум информации об области, куда следует поместить следующую группу экспериментов.

В зависимости от используемой стратегии движения методы локального поиска можно разделить на методы последовательного исследования и исследования за счет информации от локальных экспериментов [9].

Все методы многомерного поиска рассчитаны на строго унимодальные функции. Данное обстоятельство накладывает ряд ограничений при их использовании для сложных многомерных многоэкстремальных функций, так как в этом случае необходимо приводить задачу к виду, удобному для использования таких методов, что значительно усложняет реализацию на ЭВМ.

3. Методы поиска глобального минимума произвольной многопараметрической функции. Большинство методов глобальной минимизации многопараметрической многоэкстремальной функции являются модификациями или совокупностями методов, решающих задачу одномерного глобального поиска экстремума произвольной многоэкстремальной функции. Среди последних можно выделить следующие [9]:

Метод пассивного поиска.

Методы, основанные на построении аппроксимирующих моделей функции по экспериментально полученным точкам в виде интерполяционного полинома Лагранжа:

Метод многошаговой редукции размерности

Методы, основанные на принципе оптимального покрытия

Метод построения развертки (кривой Пиано).

Метод ЛП-поиска. Главной отличительной особенностью метода с точки зрения математики является систематический просмотр многомерных областей. В качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей. Для этих

целей применяются так называемые ЛПТ последовательности, обладающие наилучшими характеристиками равномерности среди всех известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей [10]. Другим преимуществом метода является оперирование привычными величинами значениями критериев, отсутствие их комбинирования и ограничений на их количество, а также отсутствие требований к гладкости областей, функциональных ограничений, критериев.

4. Методы оптимизации дискретных параметров. Большинство задач оптимизации дискретных параметров можно объединить общей постановкой и свести к задачам целочисленного программирования. Также к задачам целочисленного программирования примыкают более часто встречающиеся задачи частично целочисленного программирования, у которых условие целочисленности относится лишь к одному или нескольким оптимизируемым параметрам.

Применение традиционных методов целочисленного программирования, в задачах многокритериальной многопараметрической оптимизации затруднено следующими факторами [11]:

- Большая мощность (количество элементов) пространства параметров, что не позволяет реализовать процедуру его полного перебора.
- Определенный порядок просмотра переменных при расчете критерия и ограничений, поскольку исходные данные для некоторых подсистем из числа комплектующих всю систему являются выходными характеристиками других подсистем.
- Нерегулярность задачи. В данном контексте это означает, что у функционалов критериев и ограничений отсутствует хорошо выраженная структурность.

- Незначительная априорная информация о структуре функционалов критериев и ограничений.

Среди методов, решающих такие задачи, можно выделить следующие [11]:

Метод рандомизации. Применим в сложных задачах отыскания глобального оптимума при незначительной априорной информации о поведении системы в области параметров.

Метод отсечений. Предназначен для задач линейного целочисленного программирования

Комбинаторные методы. Предназначены для решения задач целочисленного программирования с конечным множеством допустимых значений.

Приближенные методы дискретной оптимизации. Позволяют получить приемлемые для практики результаты в широком диапазоне решаемых задач. Можно выделить методы локальной оптимизации случайного поиска, модификации точных методов и т.д.

Метод вектора спада.

Метод направляющих окрестностей. Предназначен для приближенного решения задачи

целочисленного программирования с помощью локальной оптимизации исходной начальной точки.

Все представленные методы в той или иной мере пригодны для применения в решении задачи параметрической оптимизации силовой структуры асинхронного электропривода малой мощности с полупроводниковым блоком управления. Однако при выборе «оптимального» поискового метода необходимо основываться на критериях эффективности алгоритма: скорости сходимости, устойчивости, универсальности, затратах на подготовку задачи и решение ее на ЭВМ. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- не существует отдельных методов поиска, определенно лучших, чем другие;
- все методы глобального поиска экстремума произвольной функции являются совокупностями методов локального поиска либо их производными;
- не существует определенного алгоритма выбора метода поиска для решения различных задач оптимизации;
- при решении задач оптимизации с частично целочисленными параметрами накладывается дополнительный ряд ограничений на применяемые методы. Требуется приведение исходной задачи оптимизации к задаче, решаемой выбранным методом;
- каждая задача оптимального проектирования требует индивидуального подхода и применения нескольких методов поиска оптимального решения в совокупности с опытом исследователя

При обоснованном выборе и построении поискового алгоритма оптимизации в первую очередь следует учитывать индивидуальные особенности и возможные трудности конкретной задачи. Данное обстоятельство подразумевает необходимость наличия некоторой априорной информации об оптимизируемом объекте, в частности о поведении исследуемых критериев или критерия в области пространства допустимых параметров. Кроме того, рассмотренное выше многообразие методов оптимального проектирования, имеющих потенциальную возможность применения в задаче оптимизации МТС с АД требует их сравнительной оценки и выбора из них наиболее эффективного. В связи с тем, что достаточно полного критерия теоретической оценки методов не существует, их оценка обычно осуществляется на основании эксперимента. Практическая апробация большинства поисковых методов в САПР электромашинных преобразователей [7] позволяет сформулировать основные требования к ним:

- небольшая погрешность и большая вероятность получения глобального оптимума, либо квазиоптимума с учетом принятой точности;
- невысокая чувствительность к функциональным свойствам задачи из-за сложности их изучения;

- малое количество шагов в процессе поиска, обеспечивающее удовлетворительное машинное время;

- малый объем вычислений, простота и наглядность, обеспечивающие быстрое усвоение в инженерной практике без дополнительных теоретических и экспериментальных исследований;

- возможность поиска в сложных ситуациях типа многоэкстремальности, овражности, нахождения оптимума на границе.

Количественно поисковые методы оцениваются по:

- критерию качества – точность, с которой обеспечивается нахождение оптимального решения;

- критерию эффективности – машинное время поиска в целом.

Критерии точности и эффективности получили широкое распространение и, как правило, сравнительный анализ алгоритмов производится по одному из них при заданном значении другого.

Наличие данных предварительно проведенного эксперимента о многоэкстремальном поведении исследуемого критерия еще более сужает количество возможно применимых математических поисковых методов до методов глобального поиска и некоторых комбинированных алгоритмов. Кроме того, выводы, сделанные в [13] по испытанию методов глобального поиска на подобных многоэкстремальных тестовых функциях позволяют оценить как наиболее эффективный метод, основанный на равномерно распределенных псевдослучайных последовательностях. Проведенное в [14] экспериментальное сравнение наиболее распространенных псевдослучайных последовательностей (ЛПТ-последовательностей, последовательностей случайных чисел на основе метода вычетов, последовательностей Коробова) на равномерность путем сопоставления точности вычисления многомерных интегралов на образованных ими сетках, показывает неоспоримое преимущество ЛПТ-последовательностей.

Теоретически обоснованное и экспериментально проверенное в преимущество ЛПТ-поиска по сравнению со случайным поиском, особенно в многопараметрических задачах, когда критерии являются функционалами, зависящими от интегральных кривых дифференциальных уравнений высокого порядка (критерии при этом могут быть недифференцируемыми, нелинейными и многоэкстремальными функциями независимых параметров), позволяет рекомендовать указанный

метод в качестве основного для задачи параметрической оптимизации МТС.

Литература

1. Кочетков В.Д., Козырев С.К. Состояние и тенденции развития автоматизированного электропривода в XXI веке / В.Д. Кочетков, С.К. Козырев // Мат. докл. IV междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2004: сб. - Магнитогорск, 2004. - С. 5-8.
2. Флоренцев С.Н. Силовая электроника начала тысячелетия / С.Н. Флоренцев // Электротехника. - 2003. - №6. - С. 3-9.
3. Беспалов В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Мат. докл. IV междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2004: сб. - Магнитогорск, 2004. - С. 24-31.
4. Макаров В.Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин / В.Г. Макаров, Ю.А. Яковлев // Вестник Казанского технологического университета. Т. 14.- 2011.-№1.-С.134-144.
5. Макаров В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения / В.Г. Макаров // Вестник Казанского технологического университета. Т. 14.- 2011.-№6.-С.79-93.
6. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей / Д.А. Аветисян. - М.: Высшая школа, 1988. - 271 с.
7. Миляшов Н.Ф. Электромехатронная система с асинхронным двигателем и автогенераторным управлением: дис. ... докт. тех. наук: 05.09.03 / Н.Ф. Миляшов – Казань., 1999. - 392 с.
8. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем / Е.Г. Плахтына – Львов: Выща школа, 1986. - 315 с.
9. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования.: Учеб. пособие для вузов / Д.И. Батищев – М.: Радио и связь, 1984. - 248 с.
10. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников – М.: Наука, 1981. - 112 с.
11. Балконин В.Е. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы: Справочник / В.Е. Балконин, П.И. Чинаев – М.: Радио и связь, 1991. - 256 с.
12. Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков – М.: Высшая школа, 2002. - 511 с.
13. Соболев И.М. Испытание ЛПТ-поиска на некоторых тестовых функциях / И.М. Соболев, Р.Б. Статников, М.А. Пронина // Проблемы случайного поиска 2: сб. - Рига, 1973. - С. 213-217
14. Захаров В.В. Экспериментальное сравнение некоторых псевдослучайных последовательностей / В.В. Захаров, В.Г. Смирнова // Проблемы случайного поиска 5: сб. - Рига, 1976. - С. 185-190.