НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Н.Н. Гущинский, Г.М. Левин, А.Б. Долгий

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСМИССИЙ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Объединенный институт проблем информатики

Н.Н. Гущинский, Г.М. Левин, А.Б. Долгий

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСМИССИЙ

Минск
«Белорусская наука»
2006

УДК 621-235:004:519.8

Гущинский, Н. Н. Поддержка принятия решений при проектировании силовых трансмиссий / Н. Н. Гущинский, Г. М. Левин, А. Б. Долгий. – Минск: Белорус. наука, 2006. – 262 с. – ISBN 985-08-0755-5.

Рассматриваются вопросы построения систем поддержки принятия проектных решений (СППР) на начальных этапах проектирования силовых многозвенных трансмиссий сложной структуры. Основное внимание уделяется разработке математических моделей и методов поиска рациональных значений основных проектных параметров трансмиссии как единой многоэлементной системы для заданных условий ее эксплуатации. Дается описание разработанной авторами СППР, в которой реализованы предлагаемые подходы, модели и методы. Рассматриваются функциональные возможности системы, ее архитектура, схема функционирования и интерфейс пользователя. Приводятся результаты численных экспериментов на реальных проектных задачах различной сложности.

Предназначена для научных сотрудников и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и применением информационных технологий для проектирования сложных технических систем. Она может быть также полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в этой области.

Ил. 68. Табл. 45. Библиогр.: 70 назв.

Рецензенты:

доктор технических наук С. В. Медведев,
кандидат технических наук, доцент В. Т. Придухо

Guschinsky, N. N. Decision-making support in power transmission system design / N. N. Guschinsky, G. M. Levin, A. B. Dolgui. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2006. – 262 p. – ISBN 985-08-0755-5.

This book addresses the key issues in creation of decision-making support systems (DMSS) that can be deployed effectively in the early design phase of complex power transmission systems.

The main focus is on mathematical models and optimisation methods for finding appropriate values of design parameters for a transmission system under specified loading conditions. A DMSS developed by the authors is described. The approaches, models and methods are detailed as well as the system architecture, the functionality of its components, and its user interface. Results of computational experiments on real-life design problems of different complexity are presented.

This reference is intended for researchers and engineers who are developing and applying information technology in design of complex technical systems. It should also be of interest to students and post-graduates specialised in computer science.

ISBN 985-08-0755-5

© Гущинский Н. Н., Левин Г. М., Долгий А. Б., 2006
© Оформление. РУП «Издательский дом «Белорусская наука», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Силовые передачи (трансмиссии) относятся к важнейшим системам многих машиностроительных объектов различного назначения. Проектирование трансмиссий и их элементов является одной из типовых задач при разработке таких объектов. Эта задача достаточно сложна, трудоемка, многопланова и требует для своего решения специалистов высокой квалификации.

Проблемам автоматизации отдельных аспектов проектирования трансмиссий традиционно уделяется большое внимание. Большинство работ в этой области ([24, 25, 33, 38, 40] и др.) посвящено автоматизации проектных и проверочных расчетов (прочностных, геометрических, надежностных и т. п.) основных элементов трансмиссий. В ряде работ рассматриваются вопросы автоматизации проектирования отдельных узлов трансмиссий ([31, 37, 47, 52] и др.).

В данной работе мы концентрируемся на вопросах построения системы поддержки принятия проектных решений (СППР) на начальном этапе проектирования силовых многозвенных трансмиссий сложной структуры. Основное внимание уделяется проблеме поиска рациональных значений основных проектных параметров трансмиссии для заданных условий ее эксплуатации и проектирования.

Начальный этап проектирования является, пожалуй, наиболее сложным и ответственным, поскольку он во многом предопределяет проектные решения, развиваемые на последующих этапах, а тем самым и технико-экономические характеристики будущего изделия. Этот этап достаточно сложен и с точки зрения формализации процессов принятия

проектных решений, чем во многом объясняется сравнительно малое количество публикаций по проблеме.

Материал в книге структурирован следующим образом. Первая глава является вводной. В ней дается общая информация о системах поддержки принятия решений и операционном моделировании как одном из основных инструментов, используемых в работе. Приводится краткая информация об основных подходах к принятию решений в условиях многокритериальности, а также о декомпозиционных методах решения сложных оптимизационных задач.

Во второй главе приводится укрупненная схема общего процесса проектирования трансмиссий, выделяется рассматриваемый в работе этап этого процесса и кратко характеризуется изучаемый объект. Далее строится операционная модель рассматриваемой проектной задачи. Основное внимание уделяется ключевым компонентам модели: представлению схемы трансмиссии, кинематическим, прочностным и надежностным факторам. Развиваемая общая декомпозиционная процедура поиска рациональных значений основных проектных параметров на начальной стадии проектирования многозвенных трансмиссий описывается в конце этой главы. В последующих главах эта процедура детализируется.

Третья глава посвящена моделям и методам предварительного кинематического расчета трансмиссии, основной задачей которого является определение ближайшего к желаемому ряда общих передаточных отношений трансмиссии, который может быть реализован в рамках заданных кинематических и структурных ограничений.

Модели и методы поиска рациональных значений искомых проектных параметров с учетом основных функциональных, кинематических, прочностных и надежностных факторов рассматриваются в главе 4. При этом предполагается, что реализуемый ряд общих передаточных отношений трансмиссии уже определен и прочностные характеристики материалов элементов трансмиссии заданы.

В главе 5 эта задача рассматривается для случая, когда прочностные характеристики материалов носят неопреде-

ленный характер. Предлагаются методы ее решения для наиболее общепринятых способов оценки вероятности невыхода из строя трансмиссии в целом в зависимости от вероятности работоспособности ее элементов.

В главе 6 дается описание разработанной в Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси системы поддержки принятия решений на ранних этапах проектирования многозвенных трансмиссий, которая опирается на описанные ранее подходы, модели и методы. Основное внимание при этом уделяется функциональным возможностям системы, ее архитектуре и схеме функционирования.

Авторы выражают искреннюю признательность специалистам Головного специального конструкторского бюро ПО «Минский тракторный завод», и прежде всего М. Г. Мелешко, И. Н. Жуковскому и В. П. Дудовцову, за неизменную многолетнюю поддержку, советы и критические замечания при проведении описываемых исследований, а также С. В. Медведеву и В. Т. Придухо за их большой труд по рецензированию этой работы и высказанные при этом ценные замечания и советы, способствовавшие ее улучшению. Авторы с благодарностью отмечают, что описываемая СППР разрабатывалась при частичной финансовой поддержке ISTC и INTAS в рамках совместных проектов специалистов Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси и Высшей национальной горной школы г. Сент-Этьена Франции.

Глава 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Процесс проектирования сложных технических систем является по существу творческим процессом преобразования данных технического задания и базовой нормативно-справочной информации в требуемую техническую документацию на проектируемый объект. Это преобразование производится в соответствии с принципами, методами и приемами, накопленными в соответствующей предметной области, а также знаниями, опытом и интуицией, а в ряде случаев и творческой фантазией проектантов. Вместе с тем исходная информация на проектирование обычно не определяет однозначно возможные проектные решения. Существует, как правило, множество различных вариантов решений исходной проектной задачи, отличающихся друг от друга принципами построения и функционирования объекта, набором функциональных блоков и их параметрами и т. п. Естественным является стремление спроектировать объект по возможности наилучший по своим технико-экономическим характеристикам.

Необходимость развития теоретических основ решения этой важной проблемы, а также основанных на них специальных методов и средств поиска наилучших решений стала особенно актуальной в связи с интенсивно проводимыми работами по созданию систем автоматизированного проектирования (САПР) различного назначения, базирующихся на современных информационных технологиях. В интеллектуально развитых САПР обычно имеются специальные компоненты, обеспечивающие процессы приня-

тия проектных решений, которые в настоящее время принято называть системами поддержки принятия проектных решений (СППР).

Данная работа посвящена вопросам построения специализированной СППР для проектирования многозвенных механических трансмиссий сложной структуры. Эта глава носит, в основном, справочный характер. В первом параграфе приводится краткая информация о СППР и основных проблемах, возникающих при их создании. Второй параграф посвящен основным понятиям операционного моделирования как основному инструменту, используемому в рассматриваемой СППР. Основные подходы к принятию решений в многокритериальных задачах приводятся в третьем параграфе. Заключительный параграф этой главы посвящен в основном наиболее часто применяемым декомпозиционным подходам к решению сложных оптимизационных задач.

1.1. Системы поддержки принятия решений

Системы поддержки принятия решений являются одной из важнейших компонент интеллектуально развитых автоматизированных систем проектирования, планирования и управления. Анализ СППР (в основном применительно к проблемам управления в организационных системах) и некоторые вопросы их построения рассмотрены в [18].

Основная функция СППР в САПР – выработка обоснованных рекомендаций по рациональным проектным решениям (или их фрагментам) на различных стадиях процесса проектирования в конкретных проблемных ситуациях на базе соответствующих моделей и методов. При этом может выполняться и ряд следующих вспомогательных функций:

сбор и первичный анализ информации, необходимой для принятия решений в конкретной проектной ситуации;

представление этой информации в удобном для проектанта виде;

анализ проектных ситуаций, включая (при необходимости) генерацию дерева проектных подзадач, которые долж-

ны быть решены в процессе решения исходной проектной задачи;

генерация возможных вариантов проектных решений по каждой из выделенных подзадач или по исходной задаче в целом;

анализ отобранных вариантов проектных решений по совокупности принятых критериев (как правило технико-экономического характера).

Решение каждой из этих задач сопряжено со своими трудностями, требует своих специфических подходов и методов. В то же время ключевой, принципиально наиболее сложной является, как правило, задача выработки рекомендаций. Ее решение связано обычно с необходимостью формализации процессов принятия проектных решений.

Сформировалось несколько различных направлений в решении этих вопросов. Среди наиболее развитых из них можно отметить такие, как:

моделирование действий высококвалифицированного специалиста при традиционной технологии «ручного» решения проблемы;

ситуационное моделирование типа «вход-выход» с использованием специальных языковых средств [21], в частности различного рода табличные методы принятия решений [6, 46];

операционное моделирование на базе идей исследования операций с использованием различного рода оптимизационных моделей и методов [7, 10];

имитационное моделирование как средство анализа различных вариантов проектных решений [19, 42];

экспертные системы с использованием различных баз знаний [17, 57].

Каждое из этих направлений имеет свои потенциальные возможности, обладает определенными преимуществами и недостатками. При проектировании сложных объектов использование отдельных подходов к формализации процессов принятия решений обычно недостаточно. Наиболее целесообразным является их комплексное применение, по-

зволяющее этим подходам взаимно дополнять друг друга. В описываемой СППР основным инструментом для выработки рекомендаций относительно наиболее целесообразных проектных решений на выделенных этапах проектирования рассматриваемого класса трансмиссий является операционное моделирование.

Системы поддержки принятия решений условно могут быть разделены на два класса:

универсальные (методо-ориентированные), предназначенные для решения широкого класса задач принятия решений и не имеющие определенной предметной ориентации;

специализированные (предметно-ориентированные), ориентированные на классы задач принятия решений в конкретных предметных областях.

Основными компонентами универсальных СППР обычно являются:

некоторый набор «стандартных» математических моделей задач, возникающих в процессах анализа и принятия решений;

набор программных средств, реализующих достаточно универсальные, апробированные методы решения указанных задач;

комплекс средств, позволяющих специалисту: формулировать возникающие задачи анализа и принятия решений в терминах, предусмотренных в системе формальных моделей; решать сформулированные математические задачи с использованием имеющихся в системе средств.

Наряду с высокой универсальностью и гибкостью эти системы обладают и рядом существенных недостатков, среди которых можно выделить следующие.

1. Необходимость выбора самим проектантом подходящей модели для описания проектной ситуации, неоднозначность этого выбора и, как следствие, высокие требования к квалификации проектанта в области моделирования.

2. Сложность и трудоемкость достаточно адекватного представления многих реальных проектных задач в предусмотренной моделью формальной форме.

3. Необходимость самостоятельного определения проектантом общей схемы решения сложной задачи, управления реализацией этой схемы и обеспечения (хотя бы частично) интерфейса между компонентами схемы в ходе реализации. Это также предъявляет высокие требования к квалификации проектанта в несвойственной ему области.

4. Необходимость самостоятельного формирования проектантом параметров выбранных моделей на основании имеющейся первичной информации, а также интерпретации результатов решения математических задач в предметных терминах.

5. Неэффективность, а в ряде случаев и невозможность решения многих сложных проектных задач универсальными методами и средствами в приемлемое время на имеющейся технике.

Специализированные СППР лишены в той или иной мере отмеченных недостатков за счет включения в их состав компонент, автоматизирующих соответствующие этапы моделирования. Они содержат:

формализованную схему человеко-машинного решения типовых (для данной предметной области) проектных задач;

набор используемых при этом предметно-ориентированных моделей основных подзадач;

набор методов и программных средств получения рациональных решений на базе каждой модели, отличающихся быстродействием и точностью;

средства автоматизации формирования параметров моделей исходя из описания проектных задач в терминах соответствующей предметной области и получаемых с помощью других моделей промежуточных результатов;

средства документирования полученных результатов в терминах предметной области в удобной для проектанта форме.

Следует отметить, что в узко специализированных СППР заложенные в них модели и методы могут быть и недоступны рядовому пользователю для непосредственного ис-

пользования при решении других аналогичных (в математическом смысле) задач.

Предметная ориентация специализированных СППР позволяет при разработке схем решения конкретных классов проектных задач использовать комплекс приемов и методов, учитывающих как математическую специфику этих задач, так и их предметное содержание. Разумное сочетание строгих математических методов и разнообразных эвристических приемов, отражающих опыт и тенденции проектирования, позволяет достигать желаемых результатов при сравнительно небольших затратах на разработку и реализацию соответствующих алгоритмов и программ.

С целью повышения универсальности в эти системы иногда включают специальные средства развития системы, как то:

средства построения и анализа новых моделей типовых задач проектирования;

средства разработки специальных методов и реализующих их вычислительных схем для работы с этими моделями.

Универсальные СППР обычно используются при проектировании уникальных объектов, когда типовые проектные задачи практически не возникают либо когда такие задачи возникают в уникальной взаимосвязи (в том числе с «нетиповыми» задачами). Специализированные СППР целесообразны в САПР объектов, при проектировании которых типовые проектные задачи возникают систематически, поэтому такие СППР должны стать основными в большинстве интеллектуализированных САПР объектов машиностроения.

Отмеченные особенности универсальных и специализированных СППР предопределили в основном выбор последнего типа для разработки СППР в САПР многозвенных трансмиссий.

Круг проблем, возникающих при создании специализированных СППР, чрезвычайно широк. В качестве важнейших можно отметить следующие:

выделение и анализ проектных задач в рассматриваемой области и формирование этапности развития СППР;

разработка человеко-машинных схем решения выделенных проектных задач с рациональным распределением функций между проектантом и программным комплексом;

выделение и анализ основных проектных подзадач, решаемых программными средствами;

построение и исследование набора моделей этих задач, обеспечивающих их представление при различных требованиях к степени адекватности;

разработка комплекса математических методов поиска рациональных проектных решений по этим моделям с учетом различные реальных требований по точности и быстродействию;

разработка программных средств, реализующих эти методы;

разработка методов и программных средств формирования параметров моделей на базе технического задания на проектирование и полученной ранее информации;

разработка дружественного интерфейса с проектантом на языке предметной области;

разработка программных средств управления процессом решения проектной задачи в соответствии с предусмотренной схемой;

отработка технологий решения реальных проектных задач с помощью разрабатываемой СППР, в максимальной степени использующих ее потенциальные возможности.

Эффективное комплексное решение этих проблем требует активного взаимодействия и сотрудничества высококвалифицированных специалистов как в области создания САПР, так и в соответствующей предметной области.

В последующих главах обсуждаются некоторые подходы к построению СППР в САПР рассматриваемого класса многозвенных силовых трансмиссий, а также приводится описание действующей версии такой системы.

1.2. Элементы операционного моделирования

Операционное моделирование играет ведущую роль в рассматриваемой далее системе поддержки принятия решений при проектировании многоэлементных трансмиссий. Непосредственному построению операционных моделей проектных ситуаций обычно предшествует этап концептуальной постановки проблемы. На этом этапе:

анализируется (с точки зрения рассматриваемой проблемы) структура проектируемого объекта с выделением его основных компонент и выявлением взаимосвязей между ними;

определяются цели, которые необходимо достичь надлежащим решением проблемы;

выявляются факторы, влияющие на степень достижения поставленных целей;

эти факторы подразделяются на управляемые (представляющие искомое проектное решение или его компоненты) и неуправляемые (характеризующие проектную ситуацию);

выявляется характер закономерностей, связывающих выделенные факторы как между собой, так и с поставленными целями;

определяются принципы формирования возможных проектных решений и способы их оценки.

Концептуальная постановка проблемы наряду с закономерностями функционирования проектируемого объекта служит основным материалом при построении операционных моделей проектных ситуаций. Процесс построения таких моделей включает:

выбор системы переменных для математического описания структуры проектируемого объекта и учитываемых факторов с последующим *разбиением этих переменных* на: *управляемые* (описывающие управляемые факторы и представляющие искомые проектные решения), *неуправляемые* (описывающие неуправляемые факторы и представляющие конкретную проектную ситуацию, в которой нужно прини-

мать решение), *критериальные* (или *показатели*), зависящие от управляемых и неуправляемых переменных и используемые для характеристики степени достижения поставленных целей в случае принятия тех или иных решений;

выбор математических форм представления функциональных зависимостей между переменными;

формирование необходимых *ограничений* на возможные значения различных переменных, учитывая специфику рассматриваемой проектной проблемы. Обычно эти ограничения задаются диапазонами либо множествами допустимых значений соответствующих переменных;

математическое представление целей, преследуемых при выборе решений, и способов оценки степени достижения этих целей;

проверку адекватности моделей рассматриваемой проектной ситуации.

Представленные в модели цели условно подразделяются на *количественные* и *качественные*. К первым относят цели, состоящие в стремлении максимально увеличить (или уменьшить) значение некоторого показателя. Функции модели, отражающие зависимость указанных показателей от неуправляемых и управляемых переменных, называются *целевыми функциями*. Степень достижения такой цели тем больше, чем больше (или меньше) соответствующий показатель. С точки зрения некоторой количественной цели каждое решение тем лучше, чем больше (или меньше) этот показатель.

К качественным относят цели, заключающиеся в том, чтобы соответствующие показатели удовлетворяли некоторым условиям, называемым *ограничениями*. Таковым, например, может быть условие, чтобы некоторый показатель был не больше (или не меньше) некоторого наперед заданного значения. Степень достижения качественной цели принимает лишь два значения – цель достигнута или цель не достигнута. Поэтому с точки зрения некоторой качественной цели все решения, при которых эта цель достигается, одинаково хороши, а все остальные решения одинаково плохи.

Проверка моделей проводится обычно сопоставлением значений показателей, получаемых по этим моделям на специально подобранном наборе тестовых примеров, с ожидаемыми значениями.

В пояснительной записке к модели должны быть отражены предположения и допущения, принятые при ее построении, а также причины и мотивы выбора того или решения.

При построении операционных моделей необходимо учитывать ряд обстоятельств.

Всякая модель способна только приближенно представить рассматриваемую проектную ситуацию, отображая лишь ее наиболее существенные аспекты.

«Хорошие» модели сложных проектных ситуаций – это во многом компромисс между желаемым и возможным, носящий в определенной мере субъективный характер. С одной стороны – стремление учесть в моделях побольше факторов, влияющих на функционирование проектируемого объекта или характеризующих это функционирование. С другой стороны – необходимость получения моделей, допускающих последующую эффективную работу с ними с использованием доступных средств (интеллектуальных, математических, программных и аппаратных).

«Хорошей» следует считать модель, которая обеспечивает возможность получения искомого проектного решения с желаемой точностью за приемлемое время с использованием доступных средств.

Следует иметь в виду, что недостаточно полный учет в модели даже одного существенного (для рассматриваемой проблемы) фактора приводит к тому, что получаемые с помощью такой модели рекомендации по выбору проектных решений обычно оказываются ошибочными и тем самым не только неприемлемыми, но и могущими привести к серьезным негативным последствиям.

С другой стороны, введение в модель излишних деталей обычно приводит к переусложнению модели, ее неоправданной громоздкости. Это, в свою очередь, может серьезно

затруднить анализ модели и получение на ее базе рекомендаций по рациональным решениям, а также вызвать необоснованные затраты сил и средств в ходе использования модели. Более того, наличие в модели мелких деталей, не поддерживаемых необходимой достоверной информацией, обычно создает лишь иллюзию адекватности модели.

Отметим также, что понятие «хорошая модель» носит динамический характер, поскольку оно изменяется как с изменением требований к искомым проектным решениям, так и с углублений наших знаний о проектируемом объекте и закономерностях его функционирования, а также развитием математических методов, программных и технических средств.

Несмотря на исключительное разнообразие операционных моделей, используемых в системах поддержки принятия решений в САПР, большинство из этих моделей имеет следующую структуру:

$$f(x, y) \to \max\ (\min), \tag{1.2.1}$$

$$g(x, y) \le (=, \ge)\ 0, \tag{1.2.2}$$

$$x \in X, \tag{1.2.3}$$

$$y \in Y, \tag{1.2.4}$$

где $x = (x_1, \ldots, x_n)$ – вектор управляемых переменных; $y = (y_1, \ldots, y_r)$ – вектор неуправляемых переменных; $f(x,y) = (f_1(x,y), \ldots, f_m(x,y))$ – вектор целевых функций, представляющих количественные цели, каждая из которых заключается в стремлении максимизировать (или минимизировать) значение соответствующего показателя; $g(x,y) = (g_1(x,y), \ldots, g_p(x,y))$ – вектор функций, представляющих качественные цели, каждая из которых заключается в стремлении обеспечить, чтобы значение соответствующего показателя не превышало (или было равно либо не меньше) некоторого заранее заданного значения (функции $g_1(x,y)$ всегда могут быть представлены таким образом, что в качестве указанного значения показателя может быть принят 0); X – множество возможных значений управляемых переменных; Y – множество возможных значений неуправляемых переменных.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. **Введение. Математическое моделирование в процессах принятия проектных решений** 6

1.1. Системы поддержки принятия решений 7
1.2. Элементы операционного моделирования 13
1.3. Некоторые подходы к решению многокритериальных задач 17
1.4. Декомпозиционные методы решения сложных оптимизационных задач 26

Глава 2. **Обобщенная математическая модель задачи оптимизации параметров трансмиссий и общая схема ее решения** 40

2.1. Общая постановка проблемы 40
2.2. Укрупненная графовая модель структуры трансмиссии 49
2.3. Кинематические факторы и ограничения 52
2.4. Прочностные факторы и ограничения 55
2.5. Общая математическая модель проектной задачи и декомпозиционная схема ее решения 72

Глава 3. **Предварительный кинематический расчет** 81

3.1. Общая постановка задачи и схема ее решения 81
3.2. Анализ структурной схемы трансмиссии и совместности кинематических ограничений 86
3.3. Решение задачи $\mathbf{B}_{11}$ 95
3.4. Решение задачи $\mathbf{B}_1$ в целом 102
3.5. Формирование кинематических характеристик проектного решения 107

Глава 4. **Оптимизация основных проектных параметров при заданной общей долговечности трансмиссии** 116

4.1. Общая постановка задачи и ее математическая модель 117
4.2. Инварианты задачи предварительного прочностного расчета 120

4.3. Параметрическая декомпозиция задачи $\mathbf{B}_{241}$ 132
4.4. Решение задачи $\mathbf{C}''$ верхнего уровня 140
4.5. Алгоритмы последовательно-параллельного разложения граф-схем трансмиссии 155
4.6. Решение задачи $\mathbf{B}_{24}$ 161
4.7. Вычислительные эксперименты по решению задач $\mathbf{B}_{24}$ 171

Глава 5. **Оптимизация основных проектных параметров при требуемой вероятности работоспособности трансмиссии** 178

5.1. Общая постановка задачи и ее математическая модель 179
5.2. Методы решения задачи $\mathbf{C}''_1$ 184
5.3. Методы решения задачи $\mathbf{C}''_2$ 197
5.4. Вычислительные эксперименты 203

Глава 6. **Система поддержки принятия решений при проектировании силовых многозвенных механических трансмиссий** ... 214

6.1. Функциональные возможности системы и ее структура 214
6.2. Подсистема предварительного кинематического расчета .. 225
6.3. Подсистемы предварительного и уточненного прочностного оптимизационного расчета 235
6.4. Подсистема подбора подшипников 246

Об авторах 252

Основные обозначения 254

Литература 257

Научное издание

Гущинский Николай Николаевич
Левин Генрих Моисеевич
Долгий Александр Борисович

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСМИССИЙ

Редактор *И. А. Старостина*
Художественный редактор *В. А. Жаховец*
Технический редактор *Т. В. Летьен*
Компьютерная верстка *С. Н. Костюк*

Подписано в печать 25.10.2006 г. Формат $84\times108^{1}/_{32}$. Бум. офсетная № 1. Гарнитура Times New Roman. Ризография. Усл. печ. л. 13,86. Усл. кр.-отт. 14,28. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 200 экз. Заказ 308.

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука». ЛИ № 02330/0131569 от 11.05.2005 г. 220141, Минск, ул. Ф. Скорины, 40.

Отпечатано в РУП «Издательский дом «Белорусская наука».