

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени
институт инженеров железнодорожного транспорта
им. М.И.Калинина

На правах рукописи

ФЕДОРЦ ВИТАЛИЙ АНДРЕЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
ТЕПЛОВОЗОВ МЕТОДОМ УЗЛОВЫХ ТОЧЕК

05.22.07 – Подвижной состав железных
дорог и тяга поездов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск – 1991

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного
Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени
М. И. Калинина

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
Т. Ф. КУЗНЕЦОВ

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
БОСОВ Аркадий Аркадиевич;

доктор технических наук, профессор
Давидович;

к наук, профессор
Ченьевич.

исследовательский
железнодорожного транспорта

в заседании специали-
стском институте

суд: 320700, ГСП,
364 в 15-00

е

2

ГРОВИЧ Л. В.

5608a
Ф 331 Федоренко В. В.
Определение рациональ-
ных параметров систем...
1991
Б. 54.35 414.35 3103

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Работа посвящена решению проблемы по разработке и внедрению эффективных многофакторных методов исследования систем тепловозов, которые дают возможность заметно ускорить решение задач по внедрению научно-технического прогресса в области тепловозной тяги. Решение этой проблемы позволяет получить значительный технико-экономический эффект за счет улучшения параметров, сокращения времени и материальных затрат на всех этапах создания и эксплуатации систем тепловозов.

Современный тепловоз представляет собой сложный объект, состоящий из большого количества агрегатов и узлов, которые в процессе эксплуатации должны работать с высоким уровнем показателей, характеризующих их эффективность. Сложными по своей структуре являются системы испытания, эксплуатации и ремонта тепловозов. Общим для таких систем является наличие большого количества факторов, влияющих на параметры их функционирования.

Многофакторность изучаемых процессов, сложность и высокая стоимость оборудования, острая нехватка времени – все это вынуждает применять особые методические приемы организации исследований сложных систем тепловозов.

Большой интерес к многофакторным методам вызван широкими масштабами экспериментальных и теоретических исследований и значительным экономическим эффектом от их применения.

Однако многофакторные методы очень медленно осваиваются в исследованиях сложных систем тепловозов. Между тем, как показывает существующий опыт, именно при исследовании сложных систем тепловозов многофакторные методы особенно эффективны. Эти методы позволяют в значительной степени ускорить внедрение идей научно-технического прогресса и повысить качество исследований на всех эта-

пах создания и эксплуатации систем тепловозов.

Целью работы является совершенствование методов исследования систем тепловозов путем разработки и внедрения новых прикладных, многофакторных методов, направленных на ускорение научно-технического прогресса в области тепловозной тяги.

Для достижения поставленной цели необходимо было разработать новый многофакторный метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов, который позволил решить следующие задачи:

- разработать метод планирования и идентификации активного эксперимента, направленного на совершенствование разнообразных систем тепловозов ;
- предложить метод анализа многофакторных полиномиальных моделей, описывающих различные параметры систем тепловозов ;
- внедрить в практику научных исследований новый метод идентификации пассивного эксперимента, который позволил эффективно анализировать и моделировать сложные процессы, происходящие в системах тепловозов ;
- совершенствовать процедуру идентификации многомерных рядов динамики путем разработки нового метода, который позволил эффективно производить анализ и прогнозирование различных показателей использования тепловозов ;
- разработать новые методы функционального подобия систем тепловозов ;
- предложить новый метод решения сепарабельных задач, который упрощает поиск рационального сочетания факторов систем тепловозов.

Общая методика исследований. В качестве объектов исследования рассматривались сложные технические, а также динамические системы

тепловозов идентифицирующего типа.

Основная методика выполнения работы – теоретические исследования в сочетании с решением конкретных практических задач.

В основу всех теоретических исследований и решения практических задач положен новый метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов, который получил условное название "Метод узловых точек".

В работе также использовались известные методы регрессионного анализа, математической статистики, теории надежности. С целью численного решения соответствующих задач использовалось разработанное обеспечение для персональных ЭВМ.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обосновывалась на основании анализа разнообразных критериев адекватности: индекса множественной корреляции, критерия Фишера, среднеквадратического отклонения, а также процента рассогласования опытных и расчетных данных.

Научная новизна в диссертации представлена новым методом описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов, а также прикладными методами: планирования и идентификации активного эксперимента; анализа многофакторных полиномиальных моделей; идентификации пассивного эксперимента; идентификации многомерных рядов динамики; функционального подобия; определения рационального сочетания факторов на основе сепарабельного программирования.

Совокупность предлагаемых методов позволяет внести значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области совершенствования систем тепловозов.

Показана также возможность применения метода узловых точек в задачах моделирования плотности распределения вероятностей многих случайных величин, а также в задачах моделирования параметров слу-

чайных стохастических процессов.

Практическая ценность. Новые методы планирования активного эксперимента и функционального подобия в задачах анализа и синтеза параметров систем тепловозов позволяют существенно (в 2-4 раза) сократить материальные затраты и время на проведение исследований. Эти методы также дают возможность получить мультипликативные, аддитивные и аддитивно-ковариационные модели, которые в значительной степени облегчают процедуру поиска рационального сочетания факторов.

Метод идентификации пассивного эксперимента в задачах моделирования параметров систем тепловозов позволяет визуально оценить степень влияния каждого из факторов и выбрать их рациональное сочетание, а также заметно снизить погрешность расчетов.

Метод идентификации многомерных рядов динамики позволяет произвести анализ эволюции таких важнейших показателей систем эксплуатации тепловозов, как вес поезда, техническая скорость, суточная производительность, удельный расход топлива и рассчитать их прогнозные значения, которые могут быть основой для составления объективных планов, направленных на повышение эффективности тепловозной тяги.

Методы сепарабельного программирования и анализа многофакторных полиномиальных моделей второго порядка в значительной степени упрощают поиск рационального сочетания факторов и делают сам поиск простым и наглядным. Простота методов способствует росту производительности исследовательского труда и решению качественно новых задач, что предопределяет социальный и производственно-технический эффект от их применения.

На основании предложенных методов разработаны и защищены авторскими свидетельствами на изобретение (в соавторстве) новые техни-

ческие решения по разработке топливоподающих систем и способа оп-
ределения эффективной мощности ДВС тепловозов с гидropередачей мощ-
ности.

Экономический эффект от внедрения предлагаемых методов, подт-
вержденный актами, составляет 336 тыс.руб.

Реализация работы. Разработанные новые методы планирования и
идентификации активного эксперимента и функционального подоби-
я внедрены в ПО "Завод имени Малышева" и Головном специализирован-
ном конструкторском бюро по двигателям средней мощности.

Методы идентификации многофакторного пассивного эксперимента
внедрены в Центральном проектно-конструкторском и технологическом
бюро промышленного транспорта черной металлургии при решении зада-
чи по выбору рациональной структуры тепловозного парка, в локомо-
тивном хозяйстве Улан-Баторской железной дороги и Главном вычисли-
тельном центре УБЖД Монгольской народной республики, в службе ло-
комотивного хозяйства Одесской железной дороги, а также в ЛИИЖТе
при решении задач многофакторного моделирования удельного расхода
топлива.

Метод описания многомерной поверхности параметров систем теп-
ловозов и метод функционального подоби-я внедрены в Управлении же-
лезнодорожного транспорта КМ "Криворожсталь" при разработке мето-
дики расчета рациональной системы ремонта тепловозов.

Косвенный способ определения эффективной мощности ДВС тепло-
возов с гидropередачей мощности внедрен в межотраслевых предпри-
ятиях промышленного железнодорожного транспорта МПС (г.Клин,
г.Джанкой), в тепловозном хозяйстве КМ "Криворожсталь".

Многофакторные методы исследования систем тепловозов внедрены
также в учебном процессе ДИИТа, ХИИТа и Монгольском политехничес-
ком институте.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом" /г.Харьков, 1973/, научно-технических конференциях Харьковского института инженеров жел.-дор. транспорта /г.Харьков, 1979-1986/, межотраслевой научно-технической конференции "Проблемы повышения технического уровня и надежности тракторных и комбайновых двигателей" /г.Владимир, 1980/, отраслевой научно-технической конференции "Повышение топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания" /г.Челябинск, 1982/, Всесоюзной научно-технической конференции "Современный уровень и пути совершенствования экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания" /г.Ворошиловград, 1983/, Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение энергетической эффективности локомотивов" /г.Ростов-на-Дону, 1986/, научно-техническом семинаре ХИИТа "Повышение эксплуатационной эффективности тягового подвижного состава и технология обслуживания" /г.Харьков, 1986/, на заседании научно-методической комиссии ГУУЗа МПС /г.Харьков, 1986/, объединенном семинаре кафедр "Локомотивы и локомотивное хозяйство", "Вагоны и вагонное хозяйство", "Прикладная математика" ДИИТа /г.Днепропетровск, 1986/, отраслевом научно-техническом совещании "Служба технического обслуживания и надежности предприятий главдизеля. Повышение надежности и ресурса дизельных двигателей" /г.Токмак, 1987/, Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкции подвижного состава" /г.Днепропетровск, 1988/, научно-технической конференции "Повышение надежности и долговечности машин и сооружений" /г.Запорожье, 1988/, Республиканской конференции "Техническая диагностика и повышение надежности средств транспорта" /г.Ташкент, 1988/, межотрасле-

вой конференции "Проблемы повышения надежности тепловозов и путевых машин" /г.Коломна, 1988/, Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование форм управления режимом топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в новых условиях хозяйствования" /г.Москва, 1988/, Всесоюзной научно-технической конференции "Методы и средства диагностирования технических средств железнодорожного транспорта" /г.Омск, 1989/, научно-методическом семинаре кафедр механического факультета ДИИТа /г.Днепропетровск, 1989/, научном семинаре кафедры "Локомотивы и локомотивное хозяйство" МИИТа /г.Москва, 1990/, НТС отделения тепловозов и локомотивного хозяйства ВНИИЖТа /г.Москва, 1991/, научно-техническом семинаре кафедры "Электрическая тяга" МИИТа /г.Москва, 1991/.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 43 печатных работах, в 5 учебно-методических разработках. По результатам исследования получено 4 авторских свидетельства на изобретение.

Содержание работы также представлено 12 научно-техническими отчетами, зарегистрированными во Всесоюзном научно-техническом информационном центре.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и двух приложений.

Материал диссертации изложен на 296 страницах машинописного текста, содержит 39 таблиц и 74 рисунка. Список использованной литературы насчитывает 221 наименование. Приложения содержат 42 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации и приведена её краткая характеристика.

В первой главе приводится анализ основных этапов совершенствования тепловозов. Показано, что на всех этапах возникают многофакторные задачи по определению рациональных параметров систем тепловозов. Приводится анализ существующих многофакторных методов активного и пассивного испытания разнообразных технических объектов и рассмотрены возможности их применения в задачах исследования систем тепловозов.

Многофакторные методы в настоящее время применяются при исследовании разнообразных сложных систем подвижного состава в МИИТе, ВЗИИТе, ЛИИЖТе, ОмИИТе, ХИИТе, ВНИИЖТе, ВНИИТИ, КИИТе, РИИЖТе, ХПИ, ПО "Завод имени Малышева" и других организациях.

Существующие многофакторные методы позволили решить ряд прикладных задач: исследовать показатели надежности подвижного состава; оптимизировать план тягово-энергетических испытаний локомотивов; исследовать воздействие подвижного состава на путь; оптимизировать технологические процессы ремонта подвижного состава; произвести термодинамическую оптимизацию ДВС; исследовать индикаторные и эффективные показатели ДВС и их пусковые качества; исследовать токсичность и сложные процессы топливоподачи и т.д.

Однако эти методы при активном исследовании сложных технических систем имеют следующие основные недостатки: при увеличении числа факторов заметно растет число опытов; высокая степень формализации построения планов многофакторного эксперимента отсутствует наглядность хода эксперимента и возможность последовательного анализа экспериментальных данных; возможна ситуация несовместимости факторов, которая не позволяет реализовать план многофакторного исследования; отсутствует композиционный принцип планирования и обработки данных эксперимента при переходе от одного числа факторов к другому; отсутствует возможность предупреждения появления грубых ошибок из-за того, что ход эксперимента не анализируется.

ся; малоэффективны и сложные процедуры анализа многофакторных моделей.

При пассивном исследовании сложных технических систем также имеются существенные недостатки: регламентированная структура принимаемых моделей, которая может заметно снижать точность описания исследуемого параметра; отсутствует наглядность в анализе опытных данных; отсутствует возможность использования принципа композиционности при переходе от одного количества факторов к другому; высокая степень формализации обработки данных многофакторного пассивного эксперимента; сложные процедуры анализа многофакторных моделей.

Анализ недостатков существующих методов свидетельствует об актуальности разработки новых, более эффективных методов, главным достоинством которых должна быть наглядность, композиционность и эффективность в плане рационального использования многомерного пространства, простая процедура анализа данных исследования и полученных моделей, а также возможность обобщения опытных данных.

Вторая глава посвящается разработке новых методов исследования систем тепловозов.

С целью повышения эффективности исследований необходимо было разработать новый метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов, который получил условное название "Метод узловых точек". В соответствии с этим методом многофакторная функция параметров систем тепловозов

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

может быть рассмотрена как функция, состоящая из Π ветвей однофакторных функций $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$. Разветвление этих функций происходит в особой точке, в которой численное значение

зависимой переменной (Y Y_0) есть общее для всех ветвей. Точку разветвления (Y_0) мы условно называем узловой точкой. Характерной особенностью этой точки является то, что она позволяет "связать" однофакторные функции в многофакторную модель.

Многомерная поверхность в соответствии с методом узловых точек может быть представлена в виде мультипликативной модели

$$Y = \frac{1}{Y_0^{n-1}} \prod_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (1)$$

или аддитивной модели

$$Y = -Y_0(n-1) + \sum_{i=1}^n f_i(x_i). \quad (2)$$

Выражение (1) является обобщенной моделью любого процесса, который подчиняется закону мультипликативного влияния факторов. Модель (2) описывает многомерную поверхность параметров процесса, в основу которого положен принцип аддитивности (суммирования) эффектов.

Функции $f_i(x_i)$, входящие в выражение (1) и (2), представляют собой следы сечения многомерной поверхности вдоль факторных осей, аналитическое выражение которых может быть самым разнообразным.

Описание многомерной поверхности с использованием моделей (1,2) возможно в том случае, когда отсутствует межфакторная корреляция, т.е. влияния факторов на результирующий признак независимы.

Пример графической интерпретации моделей типа (1) и (2) в случае $n = 4$ приведен на рис.1.

Графическая интерпретация многофакторных моделей позволяет получить наглядное представление о закономерностях изменения изу-

чаемых параметров под воздействием варьируемых факторов и в значительной степени облегчает процедуру анализа, синтеза и, следовательно, оптимизации, а также решения компромиссных задач.

В практике исследования сложных систем тепловозов могут встречаться также задачи, в которых наблюдается существенное межфакторное взаимодействие, что исключает возможность применения моделей (1), (2). В таком случае многомерную поверхность можно описать аддитивно-ковариационной моделью

$$Y = -Y_0(n-1) + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{i,j}^n b_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

Новый метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов явился основой для разработки ряда методов исследования сложных систем тепловозов, суть которых излагается ниже.

Метод планирования и идентификации активного эксперимента

Активный эксперимент предполагает возможность активного воздействия на исследуемый процесс по заранее составленному плану.

В том случае, когда многофакторные процессы подчиняются закону мультипликативного или аддитивного влияния факторов и многомерная поверхность изучаемых параметров может быть описана выражением (1) и (2) план активного эксперимента строится следующим образом. Выбирается исходная точка многомерного пространства, которая задается определенным сочетанием уровней влияющих факторов $(x_{10}, \dots, x_{n0})$ (см. рис. 1). Эта точка является узловой точкой плана эксперимента. В узловой точке находится численное значение параметра Y_0 . Дальнейшие исследования проводятся в плане однофакторного эксперимента, но при условии, что все однофакторные зависимости $f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)$ пройдут через узловую точку.

Число опытов при увеличении количества факторов растет незначительно, так как в модели (1), (2) вводятся однофакторные зависимости, для формирования каждой из которых требуется три, четыре опыта в случае отсутствия повторностей. Число опытов без повторностей необходимых для формирования моделей типа (1) или (2) составляет

$$N = (m-1) \cdot n + 1, \quad (4)$$

где m — число уровней факторов;

n — число факторов.

Планы эксперимента мультипликативного и аддитивного типа обладают свойством композиционности, обеспечивают минимальное количество опытов, а также упрощают обработку данных эксперимента.

Разработанный новый метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов позволил также повысить эффективность активного эксперимента в задачах с межфакторными взаимодействиями типа $x_i x_j$

Если в выражение (3) подставить значение функции $f_i(x_i) = (\beta_0 + \beta_i x_i + \beta_{ii} x_i^2)$ и $y_0 \neq \beta_0$, то получим следующее выражение

$$y = -(n-1) \cdot \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_0 + \beta_i x_i + \beta_{ii} x_i^2) + \sum_{i,j}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что для формирования полиномиальных моделей второго порядка достаточно иметь последовательные двухфакторные планы. Такие планы эксперимента мы условно назвали "планы эксперимента типа $x_i x_j$ ". Сочетание " $x_i x_j$ " определяет любую последовательность двухфакторных планов. Например,

$$x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3 \text{ и т.д.}$$

Для упрощения логики рассуждения в уравнении (5) и последую-

щих выражениях, иллюстрирующих идеи плана эксперимента типа

x_i, x_j значение факторов принято в кодированном виде.

Структура выражения (5) предопределяет метод планирования и построения многофакторной модели.

Из выражения (5) видно, что многофакторная модель состоит из двух частей. Первая (основная) часть включает сумму однофакторных зависимостей ($\theta_0 + \theta_i x_i + \theta_{ii} x_i^2$), которые проходят через общую узловую точку θ_0 при $x_i = 0$. Для формирования этих зависимостей необходимо иметь экспериментальные точки, расположенные вдоль факторных осей. Таким образом, план эксперимента для формирования основной части факторной модели (5) должен состоять из обычных однофакторных планов, но при условии, что эти планы имеют общую узловую точку ($y_0, x_i = 0$), в которой численное значение изучаемого параметра имеет постоянное значение, равное θ_0 .

Вторая часть факторной модели (5) включает эффекты межфакторных взаимодействий $\sum_{i,j} \theta_{ij} x_i x_j$. Для того, чтобы получить численное значение коэффициентов θ_{ij} , входящих в эту часть модели, необходимо иметь дополнительные точки последовательного двухфакторного эксперимента $(x_i = +1, x_j = +1), (x_i = -1, x_j = -1), (x_i = -1, x_j = +1), (x_i = +1, x_j = -1)$, порядок сочетания которых определяется сочетанием $x_i x_j$.

Таким образом, основу формирования многофакторной модели (5) составляют последовательные двухфакторные планы эксперимента.

В качестве графической интерпретации двухфакторного эксперимента можно использовать рис. 2 и рис. 3.

Точки эксперимента $y_{x_i=0, x_j=0}, y_{x_i=+1, x_j=0}, y_{x_i=-1, x_j=0}, y_{x_i=+1, x_j=+1}, y_{x_i=-1, x_j=+1}, y_{x_i=+1, x_j=-1}, y_{x_i=-1, x_j=-1}$, расположенные вдоль факторных осей x_i, x_j , являются точками плана, формирующего основную часть факторной модели (5).

Эти точки позволяют получить однофакторные зависимости

$$(\theta_0 + \theta_i x_i + \theta_{ij} x_i^2).$$

Точки эксперимента $y_{x_j=+1, x_i=+1}, y_{x_j=+1, x_i=-1}, y_{x_j=-1, x_i=+1}, y_{x_j=-1, x_i=-1}$ необходимы для определения численного значения коэффициентов θ_{ij} .

На рис. для удобства вычисления коэффициентов θ_{ij} порядок знаков (плюс, минус) численного значения параметра y показан стрелками.

Численное значение коэффициентов θ_{ij} в соответствии с рисунком можно определить из следующих выражений:

$$(\theta_{ij})_{x_j=+1, x_i=+1} = y_{x_j=+1, x_i=+1} + y_{x_j=0, x_i=0} - y_{x_j=+1, x_i=0} - y_{x_j=0, x_i=+1} \quad (6)$$

$$(\theta_{ij})_{x_j=-1, x_i=-1} = y_{x_j=0, x_i=0} + y_{x_j=-1, x_i=-1} - y_{x_j=-1, x_i=0} - y_{x_j=0, x_i=-1} \quad (7)$$

$$(\theta_{ij})_{x_j=+1, x_i=-1} = y_{x_j=+1, x_i=0} + y_{x_j=0, x_i=-1} - y_{x_j=0, x_i=0} - y_{x_j=+1, x_i=-1} \quad (8)$$

$$(\theta_{ij})_{x_j=-1, x_i=+1} = y_{x_j=0, x_i=+1} + y_{x_j=-1, x_i=0} - y_{x_j=0, x_i=0} - y_{x_j=-1, x_i=+1} \quad (9)$$

При воздействии на изучаемый процесс случайных факторов коэффициенты, которые определены по зависимостям (6–9), могут иметь различное значение. В таком случае θ_{ij} определяется как среднее

$$\theta_{ij} = \frac{1}{4} [(\theta_{ij})_{x_j=+1, x_i=+1} + (\theta_{ij})_{x_j=-1, x_i=-1} + (\theta_{ij})_{x_j=+1, x_i=-1} + (\theta_{ij})_{x_j=-1, x_i=+1}]. \quad (10)$$

Численное значение коэффициентов β_{ij} можно также определить, используя крайние точки эксперимента (см. рис.2 и рис.3)

$$\beta_{ij} = \frac{1}{4} \left(y_{\substack{x_j=+1 \\ x_i=+1}} + y_{\substack{x_j=-1 \\ x_i=-1}} - y_{\substack{x_j=-1 \\ x_i=+1}} - y_{\substack{x_j=+1 \\ x_i=-1}} \right) \quad (II)$$

Если в результате расчета получено $\beta_{ij} = 0$ или численное значение β_{ij} находится в пределах доверительного интервала ошибок эксперимента, то можно считать, что межфакторные взаимодействия отсутствуют и процесс подчиняется закону аддитивного влияния факторов. Факторная модель в этом случае будет иметь вид

$$y = -(n-1)\beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_0 + \beta_i x_i + \beta_{ii} x_i^2) \quad (I2)$$

Если обеспечено высокое качество экспериментального исследования, в котором погрешность сведена к нулю или эксперимент проводится на математической модели, то достаточно для определения коэффициентов β_{ij} иметь любую одну из этих четырех точек.

Количество опытов без повторов для получения многофакторной модели типа (5) или (3) составляет

$$N = (m-1)n + M \cdot C_n^2 + 1, \quad (I3)$$

где m - число уровней факторов;

n - количество факторов;

M - количество точек, формирующих коэффициент β_{ij} ;

C_n^2 - количество планов типа $x_i x_j$.

Количество планов $x_i x_j$ можно определить по формуле

$$C_n^2 = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (I4)$$

Из выражения (I4) видно, что количество опытных точек M существенно влияет на общее количество опытов N . Поэтому с целью сокращения количества опытов в план эксперимента можно включить две точки ($M = 2$), расположенные на диагонали плана или любое другое сочетание.

Двухфакторный план типа $x_i x_j$ (рис. 2 и рис. 3) можно также использовать для выявления признака мультипликативных связей между параметрами и факторами их обуславливающими.

Признак мультипликативного влияния факторов можно установить, используя отдельные соотношения параметров изучаемого процесса.

$$\frac{y_{x_i=+1, x_j=+1}}{x_i=+1} = \left(\frac{y_{x_i=+1, x_j=0}}{x_i=+1} \frac{y_{x_i=0, x_j=+1}}{x_i=0} \right) / \frac{y_{x_i=0, x_j=0}}{x_i=0} \quad (I5)$$

$$\frac{y_{x_i=-1, x_j=+1}}{x_i=-1} = \left(\frac{y_{x_i=-1, x_j=0}}{x_i=-1} \frac{y_{x_i=0, x_j=+1}}{x_i=0} \right) / \frac{y_{x_i=0, x_j=0}}{x_i=0} \quad (I6)$$

$$\frac{y_{x_i=-1, x_j=-1}}{x_i=-1} = \left(\frac{y_{x_i=-1, x_j=0}}{x_i=-1} \frac{y_{x_i=0, x_j=-1}}{x_i=0} \right) / \frac{y_{x_i=0, x_j=0}}{x_i=0} \quad (I7)$$

$$\frac{y_{x_i=+1, x_j=-1}}{x_i=+1} = \left(\frac{y_{x_i=+1, x_j=0}}{x_i=+1} \frac{y_{x_i=0, x_j=-1}}{x_i=0} \right) / \frac{y_{x_i=0, x_j=0}}{x_i=0} \quad (I8)$$

Если в результате проверки получены равенства (I5-I8) или численное значение абсолютной разности правых и левых частей равенств (I5-I8) находится в пределах доверительного интервала ошибки эксперимента можно считать, что параметры многофакторного процесса подчиняются закону мультипликативного влияния факторов.

Планы экспериментов типа $x_i x_j$, которые позволяют получить аддитивно-ковариационные модели типа (3) или (5) оптимальны по таким критериям, как композиционность, минимальное число опытов,

простота обработки данных эксперимента.

Кроме того, планы типа $x_i x_j$ обладают свойством независимости определения параметров функций $(\theta_0 + \theta_i x_i + \theta_{ii} x_i^2)$ коэффициентов взаимодействий θ_{ij}

Метод анализа многофакторных полиномиальных моделей

Основная идея метода основана на переходе от многофакторных полиномиальных моделей типа

$$Y = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i + \sum_{i=1}^n \theta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j}^n \theta_{ij} x_i x_j \quad (19)$$

к моделям аддитивного или мультипликативного типа (1), (2).

Для поиска оптимального значения параметра Y уравнения типа (19) можно применять также другие методы: градиентный, симплексный, стохастический, графоаналитический и т.д. Однако, все существующие методы отличаются сложной процедурой поиска оптимального сочетания факторов.

Если в результате реализации эксперимента получено уравнение регрессии (19), в котором отсутствуют межфакторные взаимодействия $\theta_{ij} = 0$, то его можно преобразовать к виду

$$Y = -(n-1) \cdot \theta_0 + \sum_{i=1}^n (\theta_0 + \theta_i x_i + \theta_{ii} x_i^2), \quad (20)$$

где $(\theta_0 + \theta_i x_i + \theta_{ii} x_i^2)$ — однофакторные функции.

Отсутствие межфакторных взаимодействий в выражении (19) и возможность его преобразования к виду (20) свидетельствует об аддитивном законе влияния факторов на изучаемый параметр Y

Задача анализа влияния факторов на параметр Y и выбор их оптимального сочетания в данном случае сводится к исследованию однофакторных функций, входящих в выражение (20).

Многофакторную модель типа (20) можно также представить в графическом виде типа (рис. I). Такая форма интерпретации многофакторной модели позволяет путем анализа однофакторных функций установить степень влияния на параметр каждого из факторов, найти экстремальное сочетание, обеспечивающее минимальное или максимальное значение параметра Y , а также определить желаемое их сочетание при заданном уровне параметра Y . Кроме того, значительным преимуществом такой интерпретации многофакторной модели является то, что исследователь может видеть поведение факторов в многомерном пространстве в привычной для него графической форме.

Если влияние факторов на изучаемый параметр подчиняется мультипликативному закону, то выражение (19) можно заменить моделью вида

$$Y = \frac{1}{\beta_0^{n-1}} \prod_{i=1}^n (\beta_0 + \beta_i x_i + \beta_{ii} x_i^2) \quad (21)$$

Правомерность замены выражения (19) на (21) возможна в том случае, когда дисперсия адекватности выражения (21) меньше или равна дисперсии адекватности выражения типа (19).

Задача оценки влияния факторов на параметр Y выбор их рационального сочетания в этом случае также сводится к анализу однофакторных функций, входящих в выражение (21).

При исследовании сложных систем тепловозов могут быть такие случаи, когда влияние факторов на изучаемый параметр не подчиняется аддитивному или мультипликативному закону.

В таком неблагоприятном варианте необходимо из уравнения регрессии (19) эффекты межфакторных взаимодействий $(\sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j)$ исключить путем поворота осей координат многофакторного пространства. В результате такой процедуры уравнение регрессии (19) пре-

образовывается в каноническое уравнение нецентральной поверхности

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_{ni} + \sum_{i=1}^n B_{ii} X_{ni}^2 \quad (22)$$

где B_i, B_{ii} - коэффициенты полиномиального уравнения
в новой системе координат;

X_{ni} - новая система координат.

Отсутствие межфакторных взаимодействий в уравнении (22) позволяет его преобразовать к виду

$$y = -(n-1)\beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_0 + B_i X_{ni} + B_{ii} X_{ni}^2) \quad (23)$$

Задача определения рациональных параметров систем тепловозов в этом случае также сводится к анализу однофакторных зависимостей, но в новой системе координат.

С целью облегчения процедуры перехода от моделей типа (19) к модели типа (23) разработана специальная программа для ЭВМ.

Из приведенного описания сути предлагаемого метода видно, что его основу составляет метод узловых точек.

Метод идентификации пассивного эксперимента основан на регистрации входных и выходных параметров, характеризующих сложный процесс в системах тепловозов без вмешательства в ход его проведения.

Следует отметить, что в настоящее время для получения однофакторных функциональных зависимостей $f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)$, входящих в выражения (1) и (2), хорошо разработаны методы двумерного анализа. Вместе с тем, в литературе нет сведений, показывающих насколько эффективно могут быть использованы однофакторные функции для целенаправленного проведения многомерного анализа.

Эта проблема может быть эффективно решена путем использования предлагаемого нами метода - метода узловых точек.

С целью удобства анализа влияния изучаемых факторов ($x_1, \dots, x_n$) на параметр y желательно данные пассивного эксперимента представлять в табличной форме.

Статистический массив данных таких таблиц позволяет произвести оценку влияния каждого из факторов на параметр y . Это влияние можно оценить путем графического построения однофакторных корреляционных полей.

Статистические данные таблицы и их графическое изображение позволяют установить корреляционные связи, используя метод наименьших квадратов.

В результате такого анализа могут быть получены функциональные зависимости: $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$.

Эти функциональные зависимости позволяют дать количественную оценку влияния каждого из факторов на параметр y .

В задачах пассивного эксперимента численное значение параметра в узловой точке можно получить, используя следующее выражение

$$y_0 = \sum_{i=1}^N y_i / N, \quad (24)$$

где y_i - фактическое значение параметра (результативного признака) в статистическом массиве экспериментальных данных;

N - число опытных точек статистического массива.

Однофакторные функциональные зависимости $f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)$ и среднее значение параметра (y_0) позволяют легко получить многофакторные модели типа (1), (2).

Характерной особенностью моделей (1), (2) в задачах пассивного эксперимента является то, что однофакторные функции пересека-

ются в узловой точке (U_0), которая представляет собой центр тяжести многомерного корреляционного поля.

С целью облегчения процедуры анализа и обработки данных пассивного эксперимента разработаны специальные программы, которые реализованы на ПЭВМ.

Метод идентификации рядов динамики. Одной из проблем идентификации рядов динамики параметров сложных систем является задача выделения факторных компонентов, на которые их можно разложить.

Применительно к разнообразным задачам анализа сложных систем можно выделить годовые $f(\Gamma)$ и внутригодовые $f(Z)$ компоненты.

Под внутригодовым компонентом $f(Z)$ следует понимать функции, описывающие влияние месяца $f(M)$, сезона $f(C)$ или квартала $f(K)$. Переход от условного компонента $f(Z)$ к конкретным внутригодовым компонентам определяется задачей исследования и наличием необходимых данных рядов динамики.

В задачах идентификации аналитические выражения компонентов $f(\Gamma)$ и $f(Z)$ могут быть представлены в виде полиномов N -го порядка или в виде сплайн-функций.

С целью облегчения обработки данных рядов динамики можно компоненты $f(\Gamma)$ и $f(Z)$ также отображать в табличной или графической форме.

Проблемой идентификации рядов динамики является также отсутствие простых методов воссоединения отдельных компонентов в модели анализа и прогноза.

Для эффективного решения проблемы воссоединения отдельных компонентов рядов динамики можно применить метод узловых точек. В соответствии с этим методом двухфакторная функция рядов динамики может быть рассмотрена как функция, состоящая из двух ветвей однофакторных функций.

Двухфакторные модели рядов динамики могут быть мультипликативного или аддитивного типа.

$$Y = \frac{1}{Y_0} \cdot f(\Gamma) \cdot f(Z), \quad (25)$$

$$Y = -Y_0 + f(\Gamma) + f(Z), \quad (26)$$

где Y_0 численное значение параметра в узловой точке.

Численное значение Y_0 можно получить, используя следующее выражение

$$Y_0 = \sum_{i=1}^{n_r} \sum_{j=1}^K Y_{ij} / (n_r \cdot K), \quad (27)$$

где Y_{ij} - фактическое значение результативного признака в исследуемых рядах динамики;

n_r - число опытных точек, участвующих в формировании годового компонента;

K - число опытных точек, участвующих в формировании внутригодового компонента.

Для облегчения процедуры обработки данных трехмерных рядов динамики разработаны специальные программы, которые реализованы на ПЭВМ.

Метод решения сепарабельных задач

Основу задач сепарабельного типа составляют многомерные функции, которые могут быть представлены в виде суммы или произведения n функций одной переменной, т.е.

$$Y = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i), \quad (28)$$

$$Y = \prod_{i=1}^n \varphi_i(x_i). \quad (29)$$

Из приведенных выражений (28) и (29) видно, что сепарабельное программирование применяется в специфических задачах поиска оптимального сочетания факторов аддитивных или мультипликативных процессов.

Выражения (28) и (29) можно легко преобразовать к виду (2) и (1). Преобразование осуществляется через узловую точку Y_0 и численное значение каждой из функций $(Y_{10}, \dots, Y_{n0})$, входящих в выражения (28) и (29), при выбранном сочетании факторов в узловой точке $(x_{10}, \dots, x_{n0})$. Сочетание факторов в узловой точке может быть произвольным или выбранным, исходя из какого-либо условия.

Для аддитивных процессов можно написать следующие соотношения перехода:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1) = \varphi_1(x_1) + (Y_0 - Y_{10}) \\ f_2(x_2) = \varphi_2(x_2) + (Y_0 - Y_{20}) \\ f_3(x_3) = \varphi_3(x_3) + (Y_0 - Y_{30}) \\ \dots \\ f_n(x_n) = \varphi_n(x_n) + (Y_0 - Y_{n0}) \end{array} \right. \quad (30)$$

Соотношения перехода для мультипликативных процессов могут иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1) = \varphi_1(x_1) \cdot Y_0 / Y_{10} \\ f_2(x_2) = \varphi_2(x_2) \cdot Y_0 / Y_{20} \\ f_3(x_3) = \varphi_3(x_3) \cdot Y_0 / Y_{30} \\ \dots \\ f_n(x_n) = \varphi_n(x_n) \cdot Y_0 / Y_{n0} \end{array} \right. \quad (31)$$

Соотношения (30) и (31) позволяют функции, входящие в выражения (26), (29) привести к одной общей узловой точке y_0 . Возможность перехода от (28), (29) к (2), (1) позволяет исследователю производить анализ многомерного пространства, используя геометрическую интерпретацию типа рис. 1. Такой переход в значительной степени упрощает анализ, синтез и поиск экстремального значения параметров многофакторных процессов.

Применение метода узловых точек в задачах сепарабельного программирования существенно упрощает поиск рационального сочетания факторов и делает сам метод поиска простым и наглядным.

Метод мультипликативного подобия

Особыми свойствами функционального подобия обладают мультипликативные процессы, моделирование которых основано на произведении функций влияющих факторов.

Анализ разнообразных литературных источников свидетельствует о том, что в природе многих, разнообразных по физической сущности многофакторных процессов существует устойчивое соотношение между параметрами и факторами; которое выражается в общем виде мультипликативной моделью типа (1).

Модели параметров y мультипликативно подобных сложных систем могут быть представлены в соответствии с методом узловых точек в следующем виде:

$$y = y_{j,0}^{1/n} \prod_{i=1}^n c_{ji} \bar{f}_i(x_i), \quad (32)$$

где n - число факторов;

$y_{j,0}$ - численное значение результирующего признака в узловой точке;

c_{ji} - коэффициенты масштабных преобразований;

$\bar{f}_i(x_i)$ - инвариантные функции влияющих факторов;

j - индекс, показывающий отношение модели к системе
ме $j = \overline{1, K}$

i - переменные порядковых номеров изучаемых факторов,
 $i = \overline{1, n}$

Следует отметить, что компоненты $\bar{f}_i(x_i)$ выражения (32) представляют собой инвариантные функции.

Функциональное подобие считается обеспеченным в том случае, если подобные системы можно описать инвариантными функциями

$\bar{f}_i(x_i)$ не меняющимися при переходе от одной системы к другой.

Одной из проблем функционального подобия является нахождение инвариантных соотношений, которые описываются функциями $\bar{f}_i(x_i)$, входящими в выражение (32)

Для двух функционально подобных систем в соответствии с выражением (32), можно написать:

$$Y = \frac{1}{Y_{10}^{n-1}} \cdot C_{11} \bar{f}_1(x_1) \cdot C_{12} \bar{f}_2(x_2) \cdot \dots \cdot C_{1n} \bar{f}_n(x_n), \quad (33)$$

$$Y = \frac{1}{Y_{20}^{n-1}} \cdot C_{21} \bar{f}_1(x_1) \cdot C_{22} \bar{f}_2(x_2) \cdot \dots \cdot C_{2n} \bar{f}_n(x_n). \quad (34)$$

Выражение (33) относится к первой системе ($j = 1$), а выражение (39) - ко второй системе ($j = 2$).

Из приведенных выражений (33), (34) видно, что в узловых точках численное значение параметра мультипликативно подобных процессов Y будет равно численному значению параметра в узловой точке Y_{10} . В этом случае для двух рассматриваемых систем можно написать $Y = Y_{10} (j = 1)$, $Y = Y_{20} (j = 2)$.

Численные значения результативного признака в узловой точке

($y_{1.0}, y_{2.0}$) позволяют найти значение коэффициентов c_{ji} входящих в выражение (33), (34).

Опыт решения подобных задач свидетельствует о том, что при анализе разнообразных мультипликативных процессов можно принять допущения, предопределяющие следующие равенства:

$$\begin{cases} c_{11} = y_{1.0} & c_{12} = y_{1.0} & , & c_{1n} = y_{1.n} \\ c_{21} = y_{2.0} & c_{22} = y_{2.0} & , & c_{2n} = y_{2.n} \end{cases} \quad (35)$$

Равенства (35) предопределяют то, что численные значения зависимых переменных функций $\bar{f}_1(x_1), \bar{f}_2(x_2), \dots, \bar{f}_n(x_n)$ независимо от их вида и сложности в узловой точке будут всегда равны единице.

Равенства (35) позволяют также для выражений (33), (34) написать очевидные соотношения:

$$\frac{y_{1.0} \cdot y_{1.0}^{n-1}}{c_{11} \cdot c_{12} \cdot \dots \cdot c_{1n}} = 1, \quad (36)$$

$$\frac{y_{2.0} \cdot y_{2.0}^{n-1}}{c_{21} \cdot c_{22} \cdot \dots \cdot c_{2n}} = 1 \quad (37)$$

Соотношения (36) и (37) называются индикаторами подобия, которые предопределяют гомогенность процессов, что является необходимым условием функционального, мультипликативного подобия.

Если каждую из функций двух мультипликативно подобных систем разделить на численное значение результативного признака в узловой точке, то получим:

$$\frac{c_{11} \cdot \bar{f}_1(x_1)}{y_{1.0}} \cdot \frac{c_{12} \cdot \bar{f}_2(x_2)}{y_{1.0}} \dots \frac{c_{1n} \cdot \bar{f}_n(x_n)}{y_{1.0}} = \prod_{i=1}^n \bar{f}_i(x_i), \quad (38)$$

$$\frac{c_{21} \cdot \bar{f}_1(x_1)}{y_{2.0}} \cdot \frac{c_{22} \cdot \bar{f}_2(x_2)}{y_{2.0}} \dots \frac{c_{2n} \cdot \bar{f}_n(x_n)}{y_{2.0}} = \prod_{i=1}^n \bar{f}_i(x_i). \quad (39)$$

Функции $\bar{f}_1(x_1), \bar{f}_2(x_2), \dots, \bar{f}_n(x_n)$, входящие в выражения (38), (39), представляют собой инвариантные, однофакторные характеристики.

Важным свойством этих характеристик является то, что они остаются инвариантными к любым масштабным преобразованиям параметров, имеющих ту или иную физическую размерность.

Описание многомерной поверхности изучаемых параметров с учетом инвариантных характеристик и выражений (38), (39) будет иметь вид

$$y = \prod_{i=1}^n \bar{f}_i(x_i) \quad (40)$$

Композиция многофакторной инвариантной модели (40) осуществляется через узловую точку, в которой численное значение аргументов всех разнообразных функций $\bar{f}_1(x_1), \dots, \bar{f}_n(x_n)$ равно единице ($\bar{y}_0 = 1$). Таким образом, узловая точка ($\bar{y}_0 = 1$) "связывает" инвариантные (обобщенные), однофакторные характеристики в многофакторную модель изучаемого параметра.

Предлагаемый метод дает возможность эффективно использовать огромный объем разрозненной информации, находящейся в архивах НИИ и заводов, в новых задачах анализа и синтеза. Такой методический подход позволяет экономить время и значительные средства на проведение дополнительных многофакторных исследований.

Метод аддитивного подобия

Модели параметров Y нескольких аддитивно подобных систем могут быть представлены в соответствии с методом узловых точек в следующем виде:

$$Y = -Y_{j,0} \cdot (n-1) + \sum_{i=1}^n C_{ji} \bar{f}_i(x_i). \quad (41)$$

Обозначения, входящие в выражение (41) растифрованы при анализе модели (32).

Выражение (41) может быть основой для получения основных соотношений нелинейной аддитивной теории подобия.

Если две выбранные нами системы аддитивно подобны по одному и тому же фактору, то имеет место следующее соотношение:

$$C_{11} \cdot \bar{f}_1(x_1) = (Y_{1,0} - Y_{2,0}) + C_{21} \cdot \bar{f}_1(x_1). \quad (42)$$

Из приведенного выражения (42) видно, что при аддитивном подобии функции $C_{11} \bar{f}_1(x_1)$ и $C_{21} \bar{f}_1(x_1)$ смещены относительно друг друга на постоянную величину ΔY . Это смещение можно определить по численному значению параметра в узловой точке

$$\Delta Y = Y_{1,0} - Y_{2,0} \quad (43)$$

Данные выражения (42) также свидетельствуют о том, что аддитивное подобие более точно соответствует наглядной тождественности формы, чем мультипликативное. Аддитивное преобразование приводит лишь к сдвигу функций вдоль оси параметра Y . Мультипликативное же преобразование изменяет форму функции.

Если основную идею двумерного варианта, которая представлена выражением (42) распространить на многомерный случай, то получим следующее соотношение аддитивного подобия:

$$\sum_{i=1}^n c_{1i} \bar{f}_i(x_i) = n(y_{1.0} - y_{2.0}) + \sum_{i=1}^n c_{2i} \bar{f}_i(x_i) \quad (44)$$

Из выражения (44) видно, что при аддитивном подобии происходит смещение многомерной поверхности на постоянную величину $n(y_{1.0} - y_{2.0})$. Приведенное выражение (44) позволяет сделать важный вывод: при переходе от одной аддитивно подобной системы к другой необходимо всегда знать численное значение результирующего признака в узловой точке.

Описание многомерной поверхности с учетом инвариантных характеристик аддитивно подобных систем будет иметь следующий вид:

$$\bar{y} = -(n-1) + \sum_{i=1}^n \bar{f}_i(x_i). \quad (45)$$

Особенностью инвариантной модели (45) является то, что численное значение аргументов всех функций $\bar{f}_1(x_1), \dots, \bar{f}_n(x_n)$ в узловой точке равно единице.

Таким образом, метод узловых точек позволяет получить новые соотношения, которые представляют собой весьма существенный шаг в развитии математического аппарата аддитивной теории нелинейного подобия при исследовании систем тепловозов.

В этой главе показана также возможность применения метода узловых точек в задачах моделирования плотности распределения вероятностей многих случайных величин и параметров случайных стохастических многофакторных процессов.

В третьей главе показано применение новых методов в задачах исследования параметров сложных систем ДВС в виде методик и практических примеров.

Планирование активного эксперимента и построение многофакторных моделей удельного расхода топлива ДВС

Показана практическая реализация метода на примере последова-

тельного перехода от двухфакторных планов ($\Pi = 2$) до четырехфакторных планов ($\Pi = 4$) активного эксперимента. При этом особое внимание уделено методике определения коэффициентов межфакторных взаимодействий β_{ij} при различном сочетании опытных точек необходимых для их определения ($M = 1$ и $M = 4$).

В результате проведенного исследования показано, что предлагаемый новый метод позволяет производить синтез многофакторных моделей при последовательном увеличении количества факторов, сокращает в таких ситуациях количество опытов, обеспечивает реализацию плана эксперимента и формирования при различном количестве точек (M) необходимых для определения коэффициентов β_{ij} . Полученные модели являются основой для определения рационального значения удельного расхода топлива таких сложных систем тепловозов, как ДВС.

Анализ многофакторных моделей параметров сложных систем ДВС

На примере трех и четырехфакторных моделей, описывающих сложные процессы систем ДВС, показана практическая возможность перехода от общепринятых моделей типа (19) к моделям типа (20) и (21), которые позволяют производить исследование многомерного пространства параметров систем ДВС путем последовательного анализа однофакторных функций.

Показаны также методики поворота осей координат двумерного ($\Pi = 2$) и четырехмерного ($\Pi = 4$) пространства с целью исключения эффектов межфакторных взаимодействий (β_{ij}) на примере анализа многофакторных моделей удельного расхода топлива. Эти методики позволяют произвести переход от моделей типа (19) к моделям типа (23). Существенным достоинством этих методик является наглядность анализа изучаемого многомерного пространства параметров сложных технических систем в задачах оптимизации и компромиссных задачах.

Идентификация вероятности безотказной работы сложных механизмов ДВС

Суть методики заключается в применении специальных насыщенных планов активного эксперимента типа X_i, X_j , у которых число опытов равно числу коэффициентов многофакторных моделей. Предлагаемая методика позволяет при минимальных затратах на эксперимент получить многофакторные модели второго порядка, которые являются основой для определения рационального сочетания факторов.

Многофакторное исследование параметров сложных систем топливopодачи

Исследование проводилось на математической гидродинамической модели, имитирующей реальные физические процессы. Такие модели позволяют сократить время и стоимость научных исследований, но они не пригодны для решения задач многофакторного анализа и синтеза в связи с тем, что дифференциальные уравнения, описывающие физические процессы, не интегрируются аналитически и велика их размерность. Это приводит к заметному увеличению времени счета одного варианта. Кроме того, велико количество факторов, учитываемых в таких моделях. Проблема может быть решена путем применения специальных методов, позволяющих произвести перестроение исходной традиционной модели и получить её в виде алгебраических выражений, которые максимально приспособлены для решения задач анализа и синтеза.

Для решения данной проблемы нами применен активный эксперимент, основу которого составил метод узловых точек.

В работе показана методика получения шестифакторной модели параметров процесса топливopодачи мультипликативного типа и решение с её использованием различных задач анализа и синтеза.

Поиск путей улучшения процесса топливopодачи с использованием метода узловых точек позволил предложить новые идеи конструк-

тивных элементов топливных систем, которые защищены авторскими свидетельствами.

Применение метода узловых точек при исследовании потерь на трение ДВС

Механизм трения в ДВС – сложный многофакторный процесс, который недостаточно проработан в теоретическом плане. Поэтому экспериментальные исследования на опытных установках играют особую роль в установлении взаимосвязи между потерями на трение и влияющими факторами. В связи с этим возникает необходимость в применении таких многофакторных методов исследования, которые дали бы возможность получить необходимую информацию об изучаемом процессе при минимальном количестве опытов, а также упростить интерпретацию опытных данных.

В качестве альтернативного метода предлагается применить метод узловых точек, который позволил получить четырехфакторные модели мультипликативного типа.

Предлагаемая методика дает возможность повысить эффективность экспериментальных исследований, а также значительно упростить задачу анализа и синтеза многофакторных моделей.

Синтез многофакторных моделей, описывающих влияние различных эксплуатационных факторов на эффективные показатели ДВС

Экспериментальные исследования по влиянию различных эксплуатационных факторов на эффективные показатели ДВС отличаются большой сложностью и выполняются в большинстве случаев в однофакторном плане.

С целью обобщения и анализа данных таких исследований предлагается использовать метод узловых точек, в соответствии с которым можно использовать выражение (40).

Основная идея представления многофакторной модели и функций,

входящих в эту модель, в относительном виде заключается в том, что в такой форме удобно исключать из рассмотрения индивидуальные особенности одних и тех же или близких в конструктивном отношении двигателей.

Относительное выражение однофакторных зависимостей позволяет всегда получить в узловой точке численное значение изучаемого параметра равное единице. Такая ситуация дает возможность через эту точку произвести синтез многофакторной модели на основе данных однофакторного эксперимента. Эти модели можно представить как в аналитической форме, так и графической форме, что в значительной степени упрощает процедуру анализа и синтеза эффективных показателей ДВС.

Идентификация индикаторных параметров ДВС

Сложный механизм процессов, происходящих в цилиндре ДВС, а также недостаточная глубина знаний о них предопределяет особую роль эксперимента на физических моделях при изучении параметров индикаторного процесса. Несмотря на то, что эксперимент на физических моделях занимает центральное место при создании и совершенствовании ДВС, его эффективность в настоящее время очень низка.

С целью повышения эффективности экспериментальных исследований нами разработана методика, позволяющая на основе разрозненных данных однофакторного эксперимента получить алгебраическую модель, которая пригодна для решения разнообразных задач анализа и синтеза параметров индикаторного процесса. Методика включает разработку ветвящейся топологической модели, которая является основой для установления количественных связей. Для их установления используются известные соотношения или, если такие отсутствуют, применяют мультипликативные модели, полученные на основе применения метода узловых точек.

В качестве примера, иллюстрирующего применение предлагаемой

методики, были использованы данные исследования параметров индикаторного процесса двигателя IOДН2А 20,7/2х25,4 (IOД100).

Предлагаемая методика в значительной степени облегчает процедуру решения задач по определению рациональных значений индикаторных параметров ДВС.

Оценка влияния функционального состояния топливной аппаратуры на удельный расход топлива ДВС

Длительная, надежная и экономичная работа ДВС, как известно, в значительной степени зависит от качества функционирования топливной аппаратуры.

При изменении функционального состояния топливной аппаратуры её работоспособность полностью не теряется, а изменяется качество распыла и момент начала подачи топлива в цилиндр двигателя. Такое состояние топливной аппаратуры обычно обуславливается изменением давления начала открытия иглы форсунки, диаметра распыливающих отверстий, максимального подъема иглы, а также изменением действительного угла опережения подачи топлива.

Основная идея методики заключается в получении однофакторных зазисимостей в относительном виде и формировании многофакторной модели типа (40). Такая методика позволяет получить многофакторную модель сложного процесса на основании данных разрозненного однофакторного эксперимента, которая пригодна для решения разнообразных задач многофакторного анализа и синтеза.

Анализ затрат мощности двигателя на привод топливных насосов

Механизм образования потерь мощности на привод топливных насосов недостаточно изучен в теоретическом плане, и поэтому нами предпочтение было отдано экспериментальным исследованиям на безмоторном стенде.

Учитывая многофакторность рассматриваемой задачи для анализа и обобщения опытных данных использован метод узловых точек, в

основу которого была положена гипотеза мультипликативного влияния факторов на механические потери привода топливных насосов. В результате обобщения опытных данных получена аналитическая инвариантная модель относительных затрат мощности на привод топливных насосов типа (40), которую можно использовать для анализа, синтеза и прогноза.

Многофакторный анализ коэффициента наполнения ДВС

Технико-экономические показатели ДВС во многом зависят от газообмена, качество которого определяется коэффициентом наполнения.

Учитывая то, что коэффициент наполнения зависит от многих факторов, нами для получения многофакторной модели был применен метод узловых точек, который позволил получить обобщенную пятифакторную модель типа (40). Эта модель дает возможность производить сравнительный анализ коэффициента наполнения для различных модификаций ДВС при различных сочетаниях факторов, наметить пути его увеличения и оценить его уровень без определения расхода воздуха.

Идентификация динамики вероятности отказа ДВС маневровых тепловозов

В основу получения модели динамики вероятности отказа ДВС были положены трехмерные ряды динамики, которые были аппроксимированы выражением типа (25) и (26). В результате аппроксимации получены развернутые модели, позволяющие производить анализ тенденций увеличения вероятности отказа двигателей.

Способ определения мощности двигателей внутреннего сгорания маневровых тепловозов с гидropередачей

Опыт эксплуатации маневровых тепловозов с гидropередачей показывает, что для оценки технического состояния ДВС в процессе их эксплуатации, а также оценки качества технического обслуживания и их ремонта необходимо применять комплексный диагностический параметр, основу которого составляет эффективная мощность двигателя.

Вместе с тем, замер эффективной мощности ДВС тепловозов с гидропередачей является сложной технической задачей, которая до настоящего времени не решена.

Учитывая актуальность разработки способов измерения эффективной мощности ДВС тепловозов с гидропередачей нами разработан специальный методический подход к решению данной проблемы, суть которого заключается в расчете эффективной мощности по измеренной частоте вращения коленчатого вала ДВС и абсолютного давления наддува. При этом используются обобщенные модели мультипликативного типа, которые были получены на основе метода узловых точек.

Данная методика явилась основой для разработки инструкций по определению мощности двигателей 8ЧН26/26 и 6ЧН21/21 в условиях эксплуатации.

Новизна предлагаемого способа защищена авторскими свидетельствами.

Применение функционального подобия к исследованию сложных процессов ДВС

Показана практическая реализация метода функционального подобия при решении следующих задач:

анализа влияния температуры масла различных модификаций тепловозных ДВС на относительный удельный расход топлива;

оценки влияния давления наддува на относительные механические потери ДВС различных конструкций;

установлении взаимосвязи между относительным параметром потока отказа ДВС и пробегом тепловозов различных серий.

Применение метода функционального подобия в задачах исследования систем ДВС позволяет получить разнообразные модели пригодные для определения рационального сочетания факторов.

В четвертой главе приведены результаты анализа и синтеза па-

раметров, характеризующих сложную систему эксплуатации тепловозов в виде методик и примеров анализа и синтеза.

Анализ и прогнозирование показателей использования тепловозов

Актуальность разработки эффективных методик анализа и прогнозирования показателей использования тепловозов предопределяется тем, что такие методики позволяют произвести анализ эволюции сложных процессов и тем самым создать необходимые предпосылки для разработки стратегии их улучшения.

Организационно-технический механизм эксплуатации тепловозов относится к классу сложных систем, причем суммарный эффект, создаваемый большим числом факторов в этих системах, не всегда может быть оценен раздельным влиянием каждого из них. В таких ситуациях удобно пользоваться собирательными факторами, основанными на времени.

Применение временных факторов в исследовании показателей использования тепловозов предопределяет необходимость использования рядов динамики, которые представляют собой числовые данные, характеризующие развитие сложного процесса во времени.

При решении задач анализа и прогнозирования среднего веса состава, технической скорости, производительности тепловозов были использованы трехмерные ряды динамики, которые явились основой для получения адаптивных моделей типа (25).

Анализ и прогнозирование качества ремонта

Приведена методика анализа и прогнозирования надежности работы тепловозов после их заводского ремонта. В этой методике использованы трехмерные ряды динамики.

Показана возможность применения многофакторного анализа для оценки надежности тяговых электрических двигателей тепловозов. При этом получена семифакторная модель типа (I), которая явилась

основой для анализа и прогноза надежности работы тяговых электрических двигателей.

Полученные модели позволили определить сочетание факторов, обеспечивающее рациональное значение показателей качества ремонта.

Анализ и прогнозирование расхода энергоресурсов на тягу поездов

Показана возможность применения функционального подобия в задачах многофакторного исследования удельного расхода энергоресурсов на тягу поездов, а также применение в этих задачах трехмерных рядов динамики.

Приведенные методики позволяют создать объективные предпосылки для установления технически обоснованных норм расхода энергоресурсов на тягу поездов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан новый метод описания многомерной поверхности параметров систем тепловозов, который получил условное название "Метод узловых точек". Этот метод позволяет эффективно решать разнообразные задачи активного и пассивного эксперимента, оптимизации, мультипликативного и аддитивного подобия, сепарабельного программирования, а также исследовать многомерные ряды динамики.

Метод узловых точек в отличие от других многофакторных методов дает возможность получить наглядное геометрическое представление о закономерностях изменения параметров систем тепловозов при воздействии на них многих изучаемых факторов. Такая ситуация в значительной степени облегчает решение оптимизационных и компромиссных задач.

2. Применение нового метода узловых точек в задачах активного испытания систем тепловозов позволяет производить синтез многофакторных моделей при последовательном увеличении количества факторов,

существенно сократить количество опытов (в 2-4 раза), обеспечить реализацию плана эксперимента и построения многофакторной модели в случае несовместимости факторов.

3. Разработаны многофакторные модели мультипликативного, аддитивного и аддитивно-ковариационного типа, которые охватывают широкий класс задач исследования сложных систем тепловозов, имеющих разнообразную физическую природу.

4. Предложен новый метод анализа многофакторных полиномиальных моделей второго порядка, описывающих различные параметры систем тепловозов. Суть этого метода заключается в преобразовании многофакторного уравнения регрессии к виду, позволяющему производить исследование однофакторных функций.

5. Внедрен в практику научных исследований новый метод идентификации пассивного эксперимента, который позволил эффективно анализировать и моделировать сложные процессы, происходящие в системах тепловозов.

6. Предложен новый метод идентификации многомерных рядов динамики, который позволил эффективно производить анализ и прогнозирование различных показателей использования тепловозов.

7. На основании метода узловых точек разработаны теоретические основы методов функционального подобия мультипликативного и аддитивного типа. Показана эффективность их использования в задачах исследования систем тепловозов.

8. Предложен новый метод сепарабельного программирования, который заметно упрощает поиск рационального сочетания факторов, определяющих качество функционирования сложных систем тепловозов.

9. Показана возможность применения метода узловых точек в задачах моделирования многих случайных величин, а также в задачах моделирования параметров случайных стохастических процессов, происходящих в системах тепловозов.

10. Показана практическая реализация и эффективность нового метода узловых точек в задачах исследования удельного расхода топлива и параметров процесса топливоподачи ДВС.

11. На примере двух, трех и четырехфакторных моделей, описывающих сложные процессы систем ДВС, показаны методики их анализа, которые в значительной степени упрощают решение задач выбора рационального сочетания факторов.

12. Приводится методика и пример идентификации вероятности безотказной работы сложных механизмов ДВС, основу которого составляют насыщенные планы активного эксперимента, позволяющие при минимальных затратах на эксперимент получить многофакторные модели второго порядка.

13. В задачах исследования потерь на трение сложных механизмов ДВС предлагается в качестве альтернативного метода применять метод узловых точек, который повышает эффективность экспериментальных исследований и в значительной степени упрощает процедуру анализа и синтеза многофакторных моделей, а также выбор рационального сочетания факторов.

14. На основании метода узловых точек реализованы методики синтеза многофакторных моделей эффективных и индикаторных показателей ДВС на основе разрозненных данных однофакторных экспериментов.

15. Показана возможность применения и эффективность метода узловых точек в задачах анализа затрат мощности двигателя на привод топливных насосов и многофакторного анализа коэффициента наполнения ДВС.

16. Приводится методика идентификации динамики вероятности отказа ДВС, которая позволяет производить анализ эволюции их надежности работы.

17. Разработан новый способ определения эффективной мощности ДВС тепловозов с гидропередачей, основу которого составляет метод узловых точек.

18. На основании трехмерных рядов динамики показана методика анализа и прогнозирования таких показателей использования тепловозов, как средний вес поезда, техническая скорость, производительность тепловозов, удельный расход топлива.

19. Приводится методика анализа и прогнозирования надежности работы тепловозов после заводского ремонта.

20. Показана возможность применения метода узловых точек в задаче многофакторного анализа надежности тяговых электрических двигателей тепловозов.

Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:

1. Федорец В.А. Применение метода узловых точек при исследовании потерь на трение в двигателях //Двигателестроение.- 1981. - № 7. - С.50-51.
2. Федорец В.А. Метод многофакторного исследования параметров процесса топливоподачи //Двигателестроение. - 1982.- № II. - С.34-36.
3. Федорец В.А. Метод планирования эксперимента и построения факторных моделей. /Харьк.ин-т инж.ж.-д.трансп.-Харьков, 1984.- 20с. - Деп.во ВИНТИ, № 535-84.
4. Федорец В.А. Методика идентификации параметров индикаторного процесса ДВС /Харьк.ин-т инж.ж.-д.трансп.-Харьков, 1984.- 17с.- Деп. в ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, № 1252 ТМ284.
5. Федорец В.А. Метод исследования параметров многофакторных процессов /Харьк. ин-т инж.ж.-д.трансп.-Харьков, 1985.- 56с. - Деп. в ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, № 1585 - ТМ.

6. Федорец В.А. Метод факторного анализа и синтеза параметров сложных процессов //Двигателестроение. - 1983.- № 3.- С.12-15.
7. Федорец В.А. Метод оптимизации параметров многофакторных процессов //Межвуз.сб.тр./ БелИИЖИ,- 1984: Оптимизация управления и повышение эффективности работы локомотивов.- С.68-72.
8. Федорец В.А. Методические указания к применению регрессионного анализа в задачах исследования многофакторных процессов.- Харьков: ХИИТ, 1986. - 18с.
9. Федорец В.А. Метод анализа и прогнозирования параметров сложных процессов на основе рядов динамики / Харьк.ин-т инж.ж.-д. трансп.-Харьков, 1985.-17с.- Деп. в ЦНИИЭИТЯМАШ.
10. Федорец В.А. Строков А.П. Исследование процесса топливopодачи в дизелях с помощью комбинационных квадратов // Проблемы создания двигателей с высоким наддувом: Тез.докл.Всесоюзной науч.-техн.конф.-Харьков: ХПИ, 1979.- С.158-160.
11. Федорец В.А., Строков А.П. Применение метода комбинационных квадратов к исследованию процесса топливopодачи в дизелях -// Двигатели внутреннего сгорания: Респ.межвед.научн.-техн.сб.- Харьков: Выща шк. Из-во при Харьк.ун-те, 1980.- Вып. 32. - С.92-98.
12. Федорец В.А., Скурихин И.Д., Волощук А.Д. Методика выбора конструктивных элементов топливopодающей аппаратуры форсированных тепловозных дизелей // Межвуз.сб.тр. / БелИИЖИТ. - 1979: Оптимизация управления и совершенствования узлов тепловозов.- С.46-52.
13. Федорец В.А. Руденко А.Ф. Влияние основных факторов топливopодающей аппаратуры на удельный эффективный расход топлива тепловозного двигателя 220 ДГ (8ЧН 26/26)//Межвуз.сб.тр./ БелИИЖИТ.- 1977.- Вып. 155.-С.55-59.

14. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А. Адаптивное прогнозирование вероятности отказа тепловозов в эксплуатации // *Межвуз. сб. тр.* / ДИИТ. - 1987: Пути повышения надежности и экономичности тепловозов. - С. 4-7.
15. Федорец В.А., Башлай С.И. Анализ методов многофакторного исследования параметров топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания / Харьк. ин-т инж. ж.-д. трансп. - Харьков, 1985. - 26 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ трактородосельмаш, № 573 ТС.
16. Федорец В.А., Василенко Г.П. Методические указания к применению многофакторных методов при исследовании сложных процессов. - Харьков: ХИИТ, 1983. - 25 с.
17. Федорец В.А., Ефременко Р.А. Методика анализа факторных моделей / Харьк. ин-т инж. ж.-д. трансп. - Харьков, 1983. - 13 с. - Деп. во ВИНТИ, № 5662-83.
18. Федорец В.А. Методические указания к решению задач анализа и прогнозирования параметров сложных процессов на основе рядов динамики. - Харьков: ХИИТ, 1986. - 28 с.
19. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А., Жариков И.В. Методика прогнозирования параметров надежности сложных механизмов // *Повышение надежности и долговечности машин и сооружений: Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф. / Запорожье, май 1988 г.* / - Киев: ИП АН УССР, 1988. - С. 7.
20. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А., Казарина Л.С. Применение методов теории подобия в задачах моделирования параметров надежности тепловозов // *Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. / Днепропетровск, май 1988 г.* / - Днепропетровск: ДИИТ, 1988. - С. 142-143.
21. А.С. 926345 СССР, М.Кл. 02М61/10. Форсунка для впрыска топли

- ва "дизель" / И.К.Колесник, В.А.Федорец, И.Л.Скурихин, В.Г.Алексеев.- № 2921980. Заявл. 12.05.80; Оpubл. 07.05.82, Бюл. № 17.
22. А.С. 987148 СССР, М.Кл. 02М4/06. Секция распределительного топливного насоса / С.И.Башлай, И.И.Тимченко, А.А.Кокалев, В.А.Федорец.- № 3231534. Заявл. 20.11.80; Оpubл. 07.01.83, Бюл. № 1.
23. А.С. 1291716 СССР, М.Кл. 02М41/06. Секция распределительного топливного насоса / Н.И.Самусь, И.А.Коваль, И.И.Тимченко, А.М.Злобин, С.И.Башлай, А.А.Кокалев, В.И.Ледовский, А.П.Строков, В.А.Федорец. - № 3864456. Заявл. 10.11.84; Оpubл. 23.02.87. Бюл. № 7.
24. А.С. 1497477 СССР, М.Кл. С01 М 15/00. Способ определения мощности дизеля / Т.Ф.Кузнецов, В.А.Федорец, В.В.Лось, Б.Е.Боднарь.- № 4264513. Заявл. 17.06.87. Оpubл. 30.07.89.Бюл. № 28.
25. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А. Применение метода функционального подобия в задачах моделирования расхода энергоресурсов на тягу поездов //Совершенствование форм управления режимом топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в новых условиях хозяйствования: Тез.докл. Всесоюзной науч.-техн.конф./ Москва, июль 1988/-М:МИИТ, 1988.- С.26-27.
26. Федорец В.А., Жадан С.А. Влияние коэффициента избытка воздуха на эффективный КПД тепловозного дизеля типа Д100 //Междуз. сб.тр./БелИИЖТ.-1981: Оптимизация управления и совершенствование узлов локомотивов.- С.90-93.
27. Бабинский И.И., Головка В.Ф., Федорец В.А. Влияние функционального состояния топливной аппаратуры на удельный эффективный расход топлива дизеля 10Д100 //Междуз.сб.тр./ОмИИТ.- 1980: Исследование надежности и экономичности дизельного подвижного состава.- С.10-12.

28. Федорец В.А. Метод аппроксимации гиперповерхности при многофакторном исследовании рабочего процесса тепловозных ДВС // Межвуз.сб.тр./ ОмИИТ.- 1980: Исследование надежности и экономичности дизельного подвижного состава.-С.20-21.
29. Федорец В.А. Применение метода обобщенных статистических характеристик к исследованию многофакторной модели рабочего процесса четырехтактного тепловозного ДВС / Харьк.ин-т инж.ж.д. трансп.- Харьков, 1979.- 7с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС № 968.
30. Парсаданов И.В., Строков А.П., Федорец В.А. Анализ затрат мощности дизеля на привод топливного насоса // Двигателестроение.- 1987. - № 2. - С.8-10.
31. Федорец В.А., Парсаданов И.В. Многофакторный анализ коэффициента наполнения дизеля // Двигателестроение. - 1988.- № 1.- С.3-5.
32. Федорец В.А., Кузнецов В.Я., Фроленко А.П. Методика многофакторного анализа надежности тяговых электрических двигателей локомотивов // Вестник ВНИИЖТ.- № 7.- С.35-37.
33. Федорец В.А. О функциональном мультипликативном подобии при моделировании затрат энергоресурсов на тягу поездов // Межвуз. сб.тр./ ДИИТ.- 1987: Пути повышения надежности и экономичности тепловозов.- С.60-69.
34. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А., Боднарь Б.Е. Методические указания к исследованию сложных систем на основе рядов динамики.- Днепропетровск: ДИИТ, 1988.- 20с.
35. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А., Жариков И.В. Применение функционального подобия в задачах моделирования показателей надежности тепловозных дизелей // Техническая диагностика и повышение надежности средств транспорта: Тез.докл.Республиканской конф./ Ташкент: ТашиИТ, 1988.-С.73-74.

36. Коварский Е.К., Строков А.П., Федорец В.А. Метод прогнозирования износа гильз цилиндров тракторных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания: Респ.межвед.науч.-техн.сб.- Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1988.- Вып. 48, С.59-61.
37. Портнов Ю.Ф., Федорец В.А., Борзилов И.Д. Моделирование параметров потока отказов подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ.- 1988.- № 6.- С.41-43.
38. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А., Мартышевский М.И. Методические указания к применению многофакторного регрессионного анализа в задачах исследования сложных процессов эксплуатации и ремонта локомотивов.- Днепропетровск: ДИИТ, 1989.- 15с.
39. Федорец В.А., Жариков И.В. Методика моделирования параметров надежности тепловозных ДВС // Методы и средства диагностирования технических средств железнодорожного транспорта: Тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф.-Омск: ОмИИТ, 1989.-С.84-85.
40. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А. Прогнозирование среднего веса поезда / Железнодорожный транспорт.- 1989.- № 1.- С.23-24.
41. Портнов Ю.Ф., Федорец В.А., Борзилов И.Д. Оценка влияния факторов на параметр потока отказов подвижного состава // Надежность и контроль качества.- 1989.- № 8.- С.17-19.
42. Федорец В.А. Функциональное подобие в задачах исследования сложных систем тепловозов и тепловозного хозяйства // Межвуз.сб.науч.тр./ ДИИТ.- 1989: Повышение эффективности эксплуатации локомотивов.- С.18-23.
43. Кузнецов Т.Ф., Федорец В.А. Прогнозирование на основе рядов динамики средней суточной производительности тепловозов // Межвуз.сб.науч.тр./ ДИИТ.- 1989: Повышение эффективности эксплуатации локомотивов.- С.7-13.

Пример графической интерпретации
 многофакторной модели параметров систем
 тепловозов $n = 4$

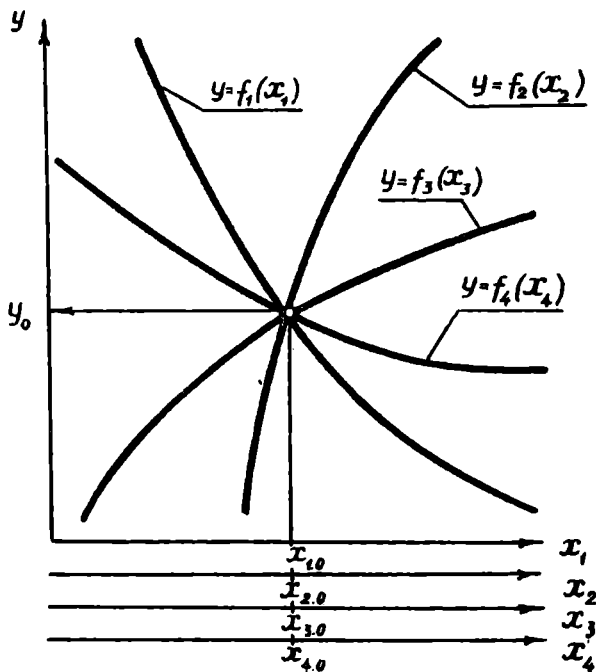


Рис. I

НТБ
ДНУЖТ

Графическое изображение на плоскости двух-факторного плана испытания систем тепловозов

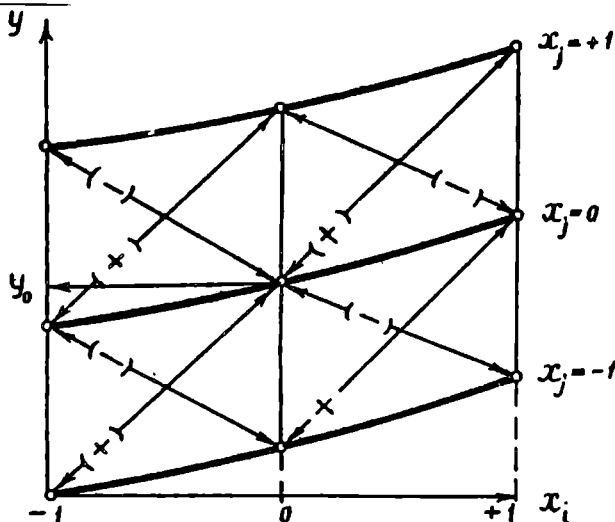


Рис. 2

Пример объемного графического изображения двух-факторного плана испытания систем тепловозов

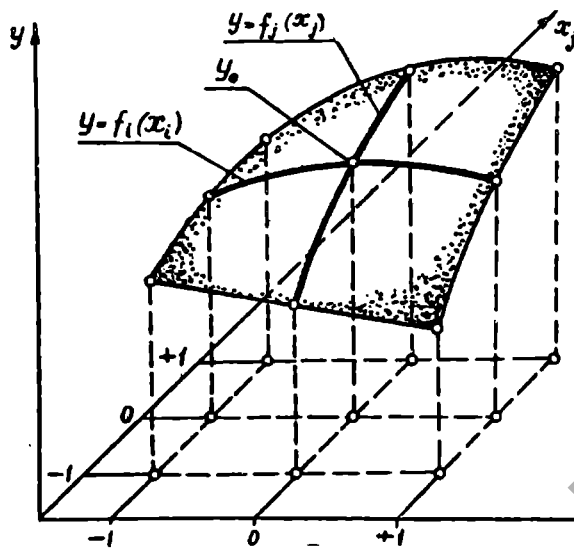


Рис. 3

Федорец Виталий Андреевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
ТЕПЛОВОЗОВ МЕТОДОМ УЗЛОВЫХ ТОЧЕК**

**05.22.07 – Подвижной состав железных дорог
и тяга поездов**

Подписано к печати 18.09.91. Формат 60х84/16. Бумага для
множительных аппаратов. Печать офсетная. Усл.печ.л.2,8.
Уч.-изд.л.2,2. Тираж 100 экз. Заказ № 817. Бесплатно.
Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени
институт инженеров железнодорожного транспорта имени
М.И.Калинина

Адрес института и участка оперативной полиграфии: 320700,
ГСП, Днепропетровск, 10, ул.Академика В.А.Лазаряна, 2.