

ДЕНИСОВ Анатолий Петрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тамбов 2002

Работа выполнена на кафедре "Информационные процессы и управление" Тамбовского государственного технического университета.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: доктор технических наук,
профессор
Матвейкин Валерий Григорьевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук,
профессор
Володин Виктор Михайлович

доктор технических наук,
профессор
Муромцев Юрий Леонидович

доктор физико-математических
наук, профессор
Матвеев Михаил Григорьевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: **Московский автомобильно-
дорожный институт**
(государственный технический
университет), (МАДИ) (ГТУ),

г. Москва

Защита состоится " ____ " _____ 2002 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу:
392000. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу:
392000. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. А. Чуриков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Транспортная система решающая важные задачи логистики представляет собой сложную эргатическую систему, которая включает транспортные средства (ТС) различных типов и назначений, базовые средства (БС) (ремонтные станции, мастерские, ангары, заправочные станции, диспетчерские пункты и т.д.), обслуживающий персонал, а также магистрали и различные дорожные сооружения. Поиск путей интенсификации существующих и разработка принципиально новых подходов к управлению транспортными системами, позволяющих при постоянно меняющихся технико-экономических ситуациях поддерживать эффективное функционирование в условиях рыночной экономики, становится необходимостью. Решение подобных задач стало возможным благодаря развитию средств вычислительной техники, информационных технологий, современной теории управления, методов системного анализа, в частности, математического моделирования и теории оптимизации. Повышение эффективности использования транспортных ресурсов при решении задач стратегического партнерства, закупки "точно в срок" (JIT - закупки), "производить или покупать" и др. приводит к необходимости рассматривать непосредственно транспортную систему региона (области, города, района), как сложную систему, функционирующую в условиях неопределенности. Отсутствие методологии, теоретических положений и алгоритмического обеспечения, позволяющих проводить имитационные исследования сложных транспортных систем с учетом изменяющихся внешних и внутренних условий, в значительной степени сдерживает создание современных высокоэффективных систем управления.

В связи с этим **актуальное значение** приобретает построение научно обоснованной методики решения задач повышения эффективности функционирования транспортной системы в условиях неопределенности, за счет оптимального движения транспортных средств и рационального распределения пунктов базовых средств, средств реализации оптимальных режимов проведения ремонтных работ, а также создание специального математического и алгоритмического обеспечения системы управления этими процессами. Поэтому **целью настоящей работы является:** разработка методики и теоретических положений, специального математического и алгоритмического обеспечения, позволяющих повысить эффективность функционирования транспортной системы при изменяющихся внешних и внутренних условиях.

Для этого в **диссертационной работе необходимо:** разработать теоретически обоснованную концепцию построения математических моделей функционирования транспортной системы, пригодных для проведения всесторонних имитационных исследований и принятия управленческих решений в условиях неопределенности; сформулировать на основе разработанной концепции задачи оптимального размещения пунктов базовых средств и разработать методы их решения; предложить эффективные численные методы решения, основанные на использовании особенностей математических формализаций задач анализа; сформировать и теоретически обосновать методику для решения задач анализа, оптимизации и управления сложной транспортной системой, учитывающую изменение внутренних и внешних условий, построения математических моделей процессов восстановления транспортных средств пригодных для целей исследования.

Работа выполнена в соответствии с одним из основных научных направлений ТГТУ "Разработка теории и методов автоматизированного проектирования химико-технологических комплексов и систем управления", координационным планом НИР АН СССР по направлению 2.27 код 2.27.7.17 на 1991 - 1995 гг., планом Министерства образования РФ на 1996 - 2004 гг. шифр 50.47.29., 50.51.19., планом НИР ТГТУ на 1991 - 2004 гг., соответствует приоритетным направлениям развития науки и технологии Российской Федерации.

Методы исследования включают: теоретические и экспериментальные, к которым, соответственно, относятся методы математического и имитационного моделирования, современной теории управления, теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1 Разработана и теоретически обоснована концепция построения математических моделей, пригодных для проведения имитационных исследований и принятия управленческих решений, позволяющая использовать качественную информацию, характеризующую свойства транспортной системы.

2 Создан специальный математический аппарат и разработана методика, позволившая ввести в рассмотрение расширенные постановки и построить методы решения задач анализа управления и оптимизации, учитывающие свойства внутренней и внешней неопределенностей транспортной системы .

3 На основе предложенной концепции сформулированы задачи оптимального размещения пунктов базовых средств и разработаны методы их решения.

4 Предложена и теоретически обоснована концепция постановки задач управления, на пунктах базовых средств функционирования транспортной системы.

5 Предложены эффективные численные методы построения решения, основанные на использовании особенностей математических формализаций задач анализа.

6 Представленная методика применена для решения задач анализа, оптимизации и управления сложной транспортной системой.

7 Сформулирована и теоретически обоснована методика построения математических моделей процесса вулканизации шин при ремонте транспортных средств, пригодных для целей исследования и управления, учитывающая изменения внешних условий.

На защиту диссертации выносятся следующие вопросы:

1 Разработанная и теоретически обоснованная концепция построения математических моделей, пригодных для проведения имитационных исследований и принятия управленческих решений, позволяет использовать качественную информацию, характеризующую свойства транспортной системы.

2 Созданный специальный математический аппарат и разработанная методика, позволившая ввести в рассмотрение расширенной постановки, и построены методы решения задач анализа управления и оптимизации, учитывающие свойства внутренней и внешней неопределенности транспортной системы.

3 Предложенные на основе разработанной концепции постановки задач оптимального размещения пунктов базовых средств и разработанные методы их решения.

4 Сформулированная и теоретически обоснованная концепция постановки задач управления оптимизации на пунктах базовых средств функционирования транспортной системы.

5 Предложенные эффективные численные методы построения решения, основанные на использовании формализации постановок задач анализа.

6 Результаты использования методики для решения задач анализа оптимизации и управления сложной транспортной системой.

7 Сформулированная и теоретически обоснованная методика построения математических моделей процесса вулканизации шин при ремонте транспортных средств, пригодных для целей исследования и управления, учитывающая изменение внутренних и внешних условий.

Практическую ценность работы составляют:

- Разработанные алгоритмы и программное обеспечение, дающее возможность синтеза необходимого математического описания как элементов, так и в целом транспортной системы.

- Разработанные алгоритмы и их программная реализация, позволяющие решать задачи исследования оптимизации и управления сложной транспортной системой с учетом изменения внутренних и внешних условий.

- Разработанные алгоритмы решения задач анализа элементов транспортной системы с учетом влияния факторов неопределенности.

- Представленные алгоритмы и их программная реализация, позволяющая решать задачу оптимального управления элементом сложной транспортной системы (базовое средство), функционирующим в условиях изменения текущей внутренней и внешней ситуации.

- Разработанные и созданные конструкции вулканизаторов для легковых (СП-1), грузовых (СП-2) и крупногабаритных (СП-3) шин.

- Разработанные и созданные устройства управления для вулканизаторов (СП-1, СП-2, СП-3).

Реализация научно-технических результатов. Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ, договоров и переданы предприятиям в виде оборудования и технической документации: завод "Техуллерод" (г. Электроугли, 1992 г., СП-1); шиноремонтный завод (ШРЗ) (г. Усть-Каменогорск, 1993 г., СП-2); ШРЗ (г. Караганда, 1993 г., СП-1, СП-2); ШРЗ (г. Невинномыск, 1993 г., СП-1, СП-2); Чеховский регенераторный завод (г. Чехов, Московской области, 1993 г., СП-1, СП-2); ШРЗ (г. Курск, 1993 г. СП-2); Сосногорский газоперерабатывающий завод (г. Сосногорск, 1993 г., СП-1, СП-2); Кстовский завод комплексной переработки и ремонта шин (г. Кстово, Нижегородской области, 1993 г., СП-1, СП-2); НИИП "Шинтрест" (г. Москва, 1996 г., СП-1, СП-2); НИИШП (г. Москва, 1994 г. СП-1, СП-2); А/О "Брекер" (г. Брянск, 1997 г., СП-1); А/О "Механизатор" (г. Тамбов, 1999 г., СП-1); ЗАО "Сельта" (г. Тамбов, 2000 г., СП-1, СП-2).

Материалы диссертации используются в учебных курсах ТГТУ при обучении студентов специальностям 21.02.00; 10.04.00.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждались на научно-практической конференции "Вопросы моделирования и управления техническими системами в условиях неопределенности" (г. Тамбов, 1993 г.); конференции "Актуальные проблемы информатики и информационных технологий" (г. Тамбов, 1995 г.); семинаре "Оборудование и современные технологии шиноремонтных предприятий" (г. Ярославль, 1996 г.); Воронежской весенней математической школе "Современные методы в теории краевых задач" (г. Воронеж, 1999 г.); научной конференции "Актуальные проблемы информатики и информационных технологий" (г. Тамбов, 1999 г.); Воронежской зимней математической школе "Современные методы теории функций и смежные проблемы" (г. Воронеж, 1999 г.); III Всероссийской научно-технической конференции "Информационные технологии и системы" (г. Воронеж, 1999 г.); Воронежском зимнем симпозиуме "Математическое моделирование в естественных и гуманитарных науках" (г. Воронеж, 2000 г.); четвертой международной теплофизической школе "Теплофизическое измерение в начале XXI века" (г. Тамбов, 2001 г.).

Рис. 1 Схема функционирования СТС

Во второй главе предложены модели, учитывающие динамичность возможных состояний системы на этапе функционирования. Особенностью рассматриваемой сложной транспортной системы является гибкое изменение продолжительности режимов задействования СТС в зависимости от характера действия обратной связи базового средства. При этом рассматривается группа базовых средств, обеспечивающих функционирование транспортных средств.

Рассматривается модель СТС, для которой выполняются следующие условия: во время функционирования СТС происходит изменение состояний по заданной программе; состояния СТС отличаются разной степенью ответной реакции СТС на действие внешних условий; интервал времени, в течение которого возможно действие условий, превосходит продолжительность отдельных состояний СТС. Программа изменения состояний СТС может быть жесткой и гибкой. Случаи функционирования СТС: это первый, частный случай - когда действие происходит до начала функционирования СТС и изменения состояний; второй частный случай - когда действие условий происходит после окончания функционирования СТС; общий случай - когда действие условий происходит в процессе функционирования и изменения состояний СТС.

Эффективность системы характеризует степень ее приспособленности к решению стоящих перед ней задач. Критерий эффективности должен отражать сложную взаимозависимость многих факторов, влияющих на функционирование системы. Показатель эффективности (ПЭ) зависит от назначения системы и при выборе его надо учитывать: ПЭ должен характеризовать не какую-то часть системы, а систему как единое целое; ПЭ и его зависимость от влияющих на функции системы факторов должен обеспечить возможность получения количественной оценки с требуемой достоверностью; область изменения ПЭ должна иметь четко очерченные границы. ПЭ вводится для оценки качества работы системы, так как результат функционирования системы зависит от большого числа случайных факторов, то в качестве ПЭ выбирают вероятности соответствующих случайных событий или среднее значение соответствующих величин. Необходимо учитывать период времени и условия, при которых получен ПЭ (они могут быть нестационарными). Можно выделить две группы показателей: ПЭ связанные с экономикой системы; ПЭ обеспечивающие лучшее обслуживание.

Выбор критерия эффективности транспортной системы (рис. 1) приводит к решению задач управления транспортной системой (рис. 2).

Для решения задачи оценки эффективности с целью выбора программы изменения состояний СТС динамическая модель в наиболее общем виде может быть представлена следующим образом (рис. 3).



Рис. 2 Вложенность задач



t - время задействования СТС; U - необходимый энергетический запас; a - количество транспортных средств на маршруте; q - количество задействованных базовых средств; m - среднее число пассажиров (грузов)

Рис. 3 Структура изменения состояний СТС

На СТС находящуюся в исходном состоянии, поступает сигнал о начале функционирования - обслуживание заданного комплексного объекта. После этого сигнала СТС начинает функционирование, состоящее в последовательном прохождении заданных состояний до момента окончательного выполнения предписанных функций.

На рис. 2 представлено дерево задач управления транспортной системой.

Изменение состояний транспортного средства связано с его функционированием в процессе подготовки к отправке на начальном участке маршрута, пока ТС находится в зоне влияния действий условий, направленных на БС. Изменение состояний БС и ТС совместно определяет перечень и продолжительность состояний СТС в целом.

Действие условий характеризуется совокупностью факторов, влияющих на чувствительные элементы устройства получения информации.

О параметрах реагирующей части БС и его действиях в устройстве преобразования осуществляется расчет интервалов времени, в которые недопустима отправка ТС. Исполнительное устройство осуществляет коррекцию момента отправки, если момент отправки ТС принадлежит этому интервалу. При этом увеличивается продолжительность пребывания ТС на БС и соответственно смещается момент отправки. Модель действия условий на СТС предназначена для разработки динамической модели функционирования СТС с изменением состояний, оценки эффективности СТС при обслуживании БС с учетом случаев прекращения функционирования БС, ТС и изменения параметров успешно функционирующих средств СТС. Действие условий на СТС разделены на две группы. В качестве условий I группы рассматриваются такие, действия которых определяются реагирующей частью БС и направлены на средства СТС. В качестве условий II группы рассматриваются такие, действия которых исходят от внешней среды и направлены как на средства СТС, так и на средства реагирующей части БС. Средства реагирующей части БС задаются: перечнем и количеством действующих средств; энергетическим запасом действия каждого средства; распределением уровня доставляемого (передаваемого) объекту воздействия; распределением времени действия средств БС; устойчивостью к действиям условий второй группы.

Основная особенность задачи выбора рациональных параметров схемы гибкого изменения состояний СТС при действиях условий сводится к тому, что результаты выбора во многом определяются самими параметрами действий по данной СТС.

Разработанная модель изменения характеристик СТС рассмотрена на примере оценки ошибок доставки транспортным средством на БС.

Математическое ожидание количества действий, не учтенных системой коррекции при отправке ТС:

$$K_{\gamma}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_{H\gamma}, \\ K_{\Sigma\gamma} \frac{(t - t_{H\gamma})}{(t_{K\gamma} - t_{H\gamma})}, & t_{H\gamma} < t < t_{K\gamma}, \\ K_{\Sigma\gamma}, & t_{K\gamma} \leq t; \end{cases} \quad (1)$$

t_{Hy} - начало интервала задействия СТС; t_{Ky} - конец интервала задействия СТС; K_{γ} - математическое ожидание; Γ - граница зоны действия БС; V - средняя скорость ТС

$$t_{H\gamma} = \Gamma \min_{\gamma} / V \max_{\gamma} + t_{нгр\gamma};$$

$$t_{K\gamma} = \Gamma \max_{\gamma} / V \min_{\gamma} + t_{кгр\gamma}.$$

$$\Delta_{уф} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta_{уфi} \cdot B_i}{\sum_{i=1}^m B_i} - \text{средняя ошибка,}$$

$$\Delta_{уфi}^2 = \Delta_u^2 + \Delta_{г\уфi}^2 + \Delta_c^2 \quad \text{при} \quad \Delta_{г\уфi} = K_{\alpha} \alpha_{уфi};$$

Δ_{Γ} - групповая ошибка; $\Delta_{и}$ - индивидуальная ошибка, возникающая при функционировании ТС на маршруте; Δ_c - систематическая ошибка; K_{α} - индивидуальная ошибка ТС; $\Delta_{г\уф}$ - групповая ошибка доставки успешно функционирующих ТС; $\alpha_{уфi}$ - производная изменения ошибки доставки ТС к отправке после i -го действия. Ошибки доставки ТС при групповом применении можно представить в виде трех ошибок: Δ_{Γ} , $\Delta_{и}$, Δ_c . Далее в главе предлагается математическая

модель функционирования БС с учетом прекращения функционирования компонентов БС. Учет прекращения функционирования необходим для соблюдения единства модели внешних условий для средств СТС и средств БС. В модели функционирования предусмотрена возможность коррекции характеристик действия условий первой группы с учетом действия условий второй группы. Вероятность успешного функционирования БС с ТС и ошибка доставки ТС за время задействия СТС:

$$B = \frac{\sum_{\omega=1}^{N_{исх}} B_{\omega} B_{\omega}^1 (m_{\omega}^* \{ \Delta t_i^* \}_{\omega})}{N_{исх}}, \quad (2)$$

$$\Delta_{уф} = \left\{ \frac{\sum_{\omega=1}^{N_{исх}} \Delta_{уф\omega} B_{\omega} B_{\omega}^1 (m_{\omega}^* \{ \Delta t_i^* \}_{\omega})}{\sum_{\omega=1}^{N_{исх}} B_{\omega} B_{\omega}^1} \right\}$$

$B_{\omega}^1 (m_{\omega}^* \{ \Delta t_i^* \}_{\omega})$ - вероятность ω -й ситуации, которая находится из выражения:

$$B_{\omega}^1 (m_{\omega}^* \{ \Delta t_i^* \}_{\omega}) = \prod_{i \in A_{\omega}} (\theta_i) \prod_{i \in C_{\omega}} (1 - \theta_i),$$

$$A_{\omega} = \{ a_1^{\omega}, a_2^{\omega} \dots a_m^{\omega} \}, \quad C_{\omega} = \{ c_i^{\omega} \}; \quad c_i^{\omega} = 1 - a_i^{\omega};$$

$$a_i^{\omega} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-средство БС функционирует;} \\ 0, & \text{если } i\text{-средство БС не функционирует;} \end{cases}$$

$$\theta_i = \begin{cases} B_i', B_i'', & (\eta = 1) \\ B_i'', & (\eta = 0) \end{cases}$$

η - доставка; ω - номер ситуации; Δ_{yf} - ошибка доставки; (*) - индекс характеристик действий с учетом условий второй группы; B - вероятность успешного функционирования БС с ТС; B_{ω} - вероятность успешного функционирования ТС в ω -й ситуации; θ_j - порядок функционирования БС при действии условия второй группы. Для нахождения значений B используется специальный алгоритм. Большинство решений технико-экономических задач основано на эффективности вложения затрат по мере увеличения общей эффективности системы. Известное положение требует особого обоснования эффективности той или иной системы, особенно в области значений эффективности близких к максимуму. Повышение эффективности на 1-2 % может потребовать увеличения необходимых затрат во много раз. Для обоснования требуемого уровня развития (эффективности) системы широко применяется системный подход, который заключается в представлении рассматриваемой системы как элемента (подсистемы) более крупной системы, для которой уже известен общий располагаемый ресурс. Именно такой подход использован при построении математической модели СТС синтеза оптимальной системы БС при ограничениях на ресурс и возможный состав ее элементов.

Постановка задачи:

Требуется определить матрицу $X_0 = \left\| x_{ji}^0 \right\|$, доставляющую максимум функции вида:

$$\Psi(X) = \sum_{i=1}^s A_i \left(1 - \prod_{j=1}^m \varepsilon_{ji}^{x_{ji}} \right). \quad (3)$$

При линейном ограничении на переменные $\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^s a_{ji} x_{ji} \leq b$ и дополнительные условия:

$$\left. \begin{array}{l} x_{ji} \in \{0, 1, \dots\}, \\ 0 \leq (\varepsilon_{ji} = 1 - \omega_{ji}) \leq 1, \\ A_i \quad j = 1, \dots, m. \end{array} \right\} \quad i = 1, \dots, S \quad (i \in I_s)$$

A_i - среднее число ремонтов за смену; a_j - полные затраты; ω_j - вероятность затрат; x_j - общее количество задействованных средств j -го типа.

$$a_j = \sum_{i=1}^s a_{ji} x_{ji}, \quad x_j = \sum_{i=1}^s x_{ji}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Общий ресурс, выделенный для организации воздействия по i -му объекту:

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_{ji} x_{ji} \quad (b = \sum_i b_i), \quad i = 1, \dots, m,$$

где a_{ji} - затраты одного средства j -го типа.

Таким образом, в данной главе с единых системных позиций рассмотрен процесс функционирования сложной транспортной системы, подверженной влиянию случайных факторов, связанных с внутренним состоянием системы и воздействием внешней среды. Предложены математические модели, описывающие работу подсистем сложной транспортной системы и постановки задач оптимизации.

В третьей главе показано, что вопросы эффективной эксплуатации транспортных средств как одной из подсистем непосредственно связаны с проведением текущих и капитальных ремонтов.

Периодичность ремонтов обуславливается режимами эксплуатации, состоянием транспортного средства и качеством дорожного полотна, а также качеством ремонта транспортного средства. В эксплуатации машин на пневматическом ходу как новая, так и отремонтированная шина занимает не последнее место. Она должна выдерживать высокие скоростные характеристики большие динамические нагрузки, хорошо держать дорогу, а главное обеспечивать безопасность. Конечно, с точки зрения экономии, шина должна иметь как можно больший срок службы при меньших затратах в производстве. Срок службы шины в целом и долговечность ее конструктивных элементов зависит от многих условий. Одни из них связаны с производством, другие - с эксплуатацией шины. На протяжении последних лет, наряду с повышением прочности каркаса непрерывно возрастает роль эксплуатационных факторов, влияющих на долговечность основных элементов шины. Баланс условий складывается не в пользу протектора. Решающее значение в этом отношении имеет рост скоростей движения автомобилей и все возрастающие требования по повышению безопасности движения. Таким образом, и в производстве шин, и в условиях их эксплуатации происходят перемены, в силу которых ремонт приобретает все большее значение. Важным технологическим звеном ремонта шины является вулканизация. Вулканизация - один из наиболее важных и сложных тепловых процессов, протекающих при меняющихся по времени тепловых потоках, зависящих от многих факторов. Структура математического описания процесса вулканизации представлена на рис. 4.

В диссертации помещен обзор литературы по оптимальному управлению процессом индукционного нагрева, как частный случай управления взаимосвязанными тепловыми и электромагнитными полями. Предложена математическая постановка задачи исследования, а также разработана математическая модель процесса индукционного нагрева. Подробно рассмотрена постановка электромагнитной и тепловой задачи, а также математическая модель поля термонапряжений. Особое внимание уделено граничным условиям вышеупомянутых математических моделей, а также взаимной связи между ними. В качестве эталонных моделей при моделировании оптимального управления процессом были использованы существующие в литературе решения. Представлены варианты декомпозиции модели. Уделено внимание управляющим факторам, зависящим от времени и пространства. Рассмотрены решения задачи оптимального управления процессом, предложенный алгоритм решения задачи, обоснован на локальном принципе максимума. Показаны возможности параметризации задачи оптимального управления процессом. Рассмотрены теоретические подходы, отражающие реологические свойства резиноподобных материалов. На основе сделанных предложений состояние системы описывается тензором деформации, температурой, градиентом температуры и конечным или бесконечным набором внутренних переменных. Разработан аппарат, который позволяет построить формальные нелинейные уравнения с учетом связанности полей деформации и температуры. Для решения этой задачи найдены условия, при которых источник тепла в уравнении энергии определяется соотношением между напряжениями, деформациями и температурой.



Рис. 4 Структура математического описания процесса вулканизации местного ремонта шин

Задачи подобного типа встречаются в различных технологических процессах, примером которых может быть процесс вулканизации.

Структура математического описания процесса вулканизации позволяет сделать вывод о структуре математической модели процесса вулканизации, которая представлена на рис. 5.

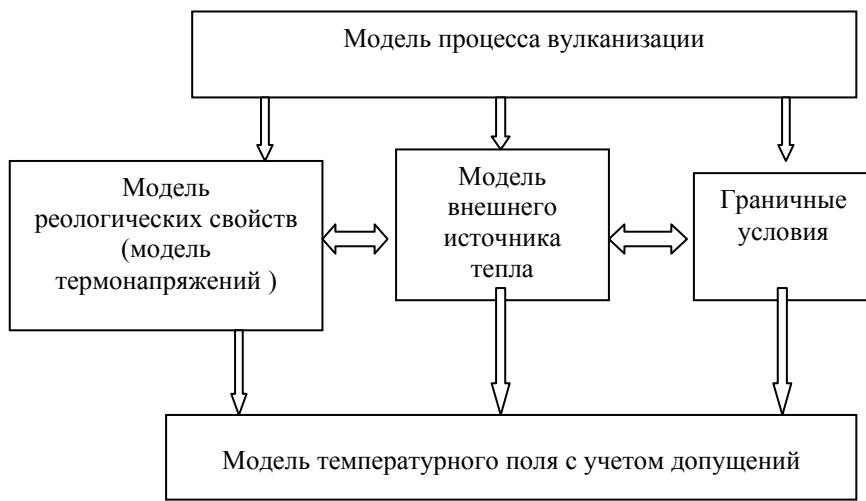


Рис. 5 Структура математической модели процесса вулканизации

Область моделирования представлена на рис. 6. Наиболее важными вопросами при разработке математической модели процесса вулканизации являются вопросы осуществления нагрева ремонтируемого участка и влияние реологических свойств материала пластиря на качественные показатели отремонтированного изделия. Наиболее перспективным является индукционный нагрев, обладающий следующими характеристиками: высоким качеством нагрева, в силу быстроты процесса; возможностью достижения широкого диапазона температур; возможностью точности нагрева; гибкостью и высокой точностью управления, вследствие малой инерционности процесса; возможностью точного дозирования энергии; наличием нескольких каналов управления; сбережением энергетических ресурсов за счет уменьшения потерь в процессе нагрева; повышения качества изделия; увеличения производительности.

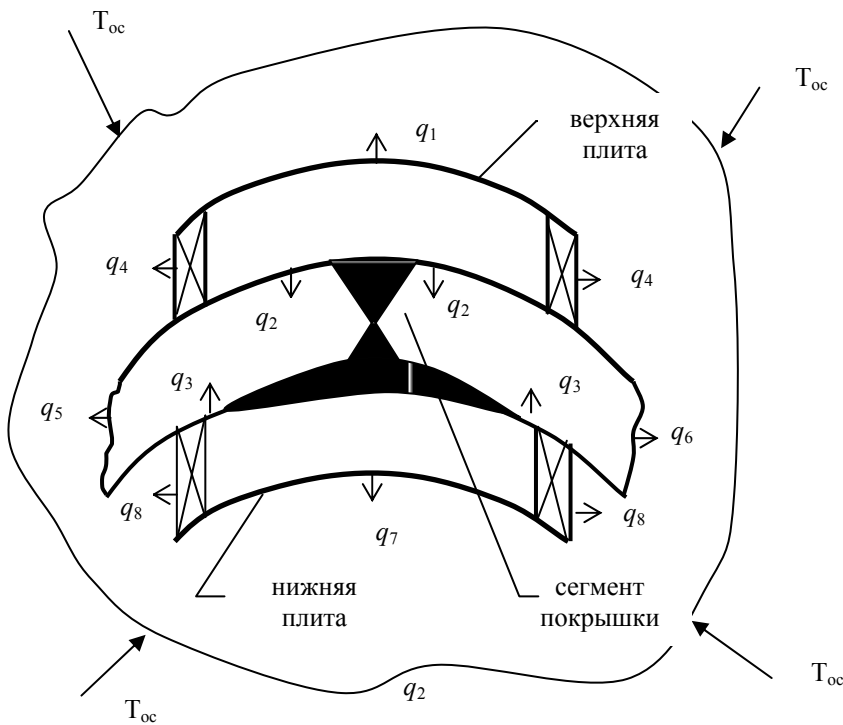


Рис. 6 Область моделирования

Перечисленные выше достоинства процесса индукционного нагрева открывают возможность оптимального управления процессом. Математическая модель внешнего источника тепла с учетом естественных допущений представлена в табл. 1, где схема замещения системы индуктор-плита строилась на основе использования метода общего потока.

Математическая модель распределения температуры в плитах нагревателей и ремонтируемом участке представлена в табл. 2.

В том случае, когда ремонтируемое изделие имеет существенные размеры, т.е. осуществляется процесс ремонта крупногабаритной шины, существенное влияние оказывают реологические свойства материала пластыря. Для учета их влияния была разработана математическая модель, представленная в табл. 3.

1 Математическая модель внешнего источника тепла

Для плоскопараллельного поля уравнение Гельмгольца имеет вид:

$$\nabla (1/\gamma(T)) \nabla H^{(i)} - j\omega\mu H^{(i)} = 0, \quad (4)$$

$$H_T(x) = H_0 = \text{const},$$

H - напряженность магнитного поля; γ - удельная электропроводность.

Уравнение можно записать в интегральном виде

$$2\pi r_Q \rho_Q I_Q + j\omega \int_{S_1} \mu_{Q\rho} I_\rho dS_T + j\omega \int_{S_2} \mu_{QT} I_T dS_T = U_Q, \quad (5)$$

$\text{const} = \mu$ - относительная магнитная проницаемость; r_Q - радиус Q -го кольца индуктора; ω - круговая частота; ρ_Q - удельное сопротивление; I_Q, I_ρ, I_T - плотность тока в Q -ом, ρ -ом и T -ом кольце индуктора; $\mu_{Q\rho}, \mu_{QT}$ - коэффициент взаимной индукции для различных колец индуктора; U_Q - напряжение в Q -ом кольце индуктора; i - составляющая магнитного поля (в нашем случае $i = 1$)

Таким образом, в данной главе предложена структура математического описания процесса вулканизации при местном ремонте шин, построена математическая модель внешнего источника тепла, математическая модель распределения температур, а также математическая модель термонапряжений.

В четвертой главе на основе результатов анализа процесса вулканизации, проведенного в третьей главе, делается вывод, что практическая реализация процессов индукционного нагрева невозможна без решения проблемы оптимального управления процессом. При этом обычно в качестве целевой функции управления используются следующие показатели: быстрдействие; минимизация энергии; минимум потерь; точность распределения температуры нагревательной плиты в конце нагрева.

2 Математическая модель температурного поля с учетом допущений

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda(T) \nabla (T) + W. \quad (6)$$

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (r \frac{\partial T}{\partial z}) + W(r, z, t), \quad (7)$$

$$T(r, z, t_0) = T_0(r, z).$$

ГУ:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = f_L(T); \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = f_0(T);$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = f_R(T); \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0.$$

$$f_S(T) = \alpha_S(T) (T - T_S) - \sigma \varepsilon_i \varepsilon_j \varphi_{ij}(T) (T_i^4 - T_{\phi j}^4), \quad (8)$$

$$S = \{L, R, 0\},$$

где λ - коэффициент теплопроводности; z - координата; R - тепловое сопротивление; L - длина индуктора; σ - постоянная Больцмана; α_s - коэффициент теплообмена; $\varepsilon_i; \varepsilon_j$ - коэффициенты черноты плиты и футеровки; φ_{ij} - средний угловой коэффициент поверхностей

В силу вышесказанного, решение проблемы оптимального управления процессом индукционного нагрева складывается из решения двух основных задач: построения математической модели процесса нагрева и построения процесса нагрева. К особенностям модели процесса нагрева следует отнести учет взаимосвязанных полей:

- электромагнитного, теплового, поля термонапряжений;
- учет многомерности каждого из перечисленных полей;
- учет нелинейности зависимостей свойств материала от температуры и напряженности электромагнитного поля.

3 Математическая модель термонапряжений

$$\nabla^2 U_1 + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=i}^3 \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - 2 \frac{1}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$\bar{\sigma} \underline{U} = 0$$

$$\nabla^2 \sigma_{ii} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x_i^2} + \frac{\alpha_T E}{1+\nu} - \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{1-\nu}{1+\nu} \nabla^2 T \right) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla^2 \sigma_{ij} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\alpha_T E}{1+\nu} - \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j} = 0$$

$$i = 1, 2, 3; \quad (i, j) \in \{1,2; 1,3; 2,3\}$$

$$\nabla^2 U_i + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=i}^3 \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - 2 \frac{1}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial x_i} = 0$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$\underline{U} = \underline{U}_T$$

$$\bar{\sigma} \underline{n} = \underline{f} \quad \sigma = \sum_{\kappa=1}^3 \sigma_{\kappa}$$

$$\sigma_{ii} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \sum_{k=i}^3 \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - \frac{dE}{1-\nu} T = 0 \quad (11)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) = 0$$

$$i = 1, 2, 3; \quad (j, k) \in \{1,2; 1,3; 2,3\}$$

Продолжение табл. 3

E - модуль упругости Юнга, ν - коэффициент Пуассона, α_m - температурный коэффициент линейного расширения, T - температура.

$\underline{U} = [U_1, U_2, U_3]$ - вектор перемещения

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} - \text{тензор напряжения}$$

Следует отметить, что на выбор критериев качества существенное влияние оказывает текущая экономическая ситуация. Схема постановки задачи управления, представленная на рис. 7, позволяет на основе проведенного анализа построить дерево задач управления, представленного на рис. 8.

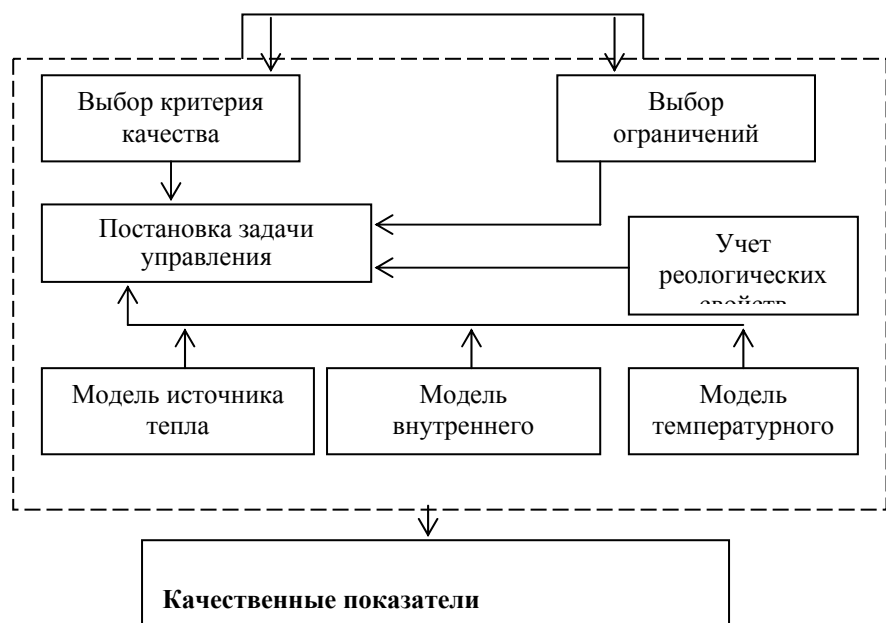


Рис. 7 Схема постановки задачи

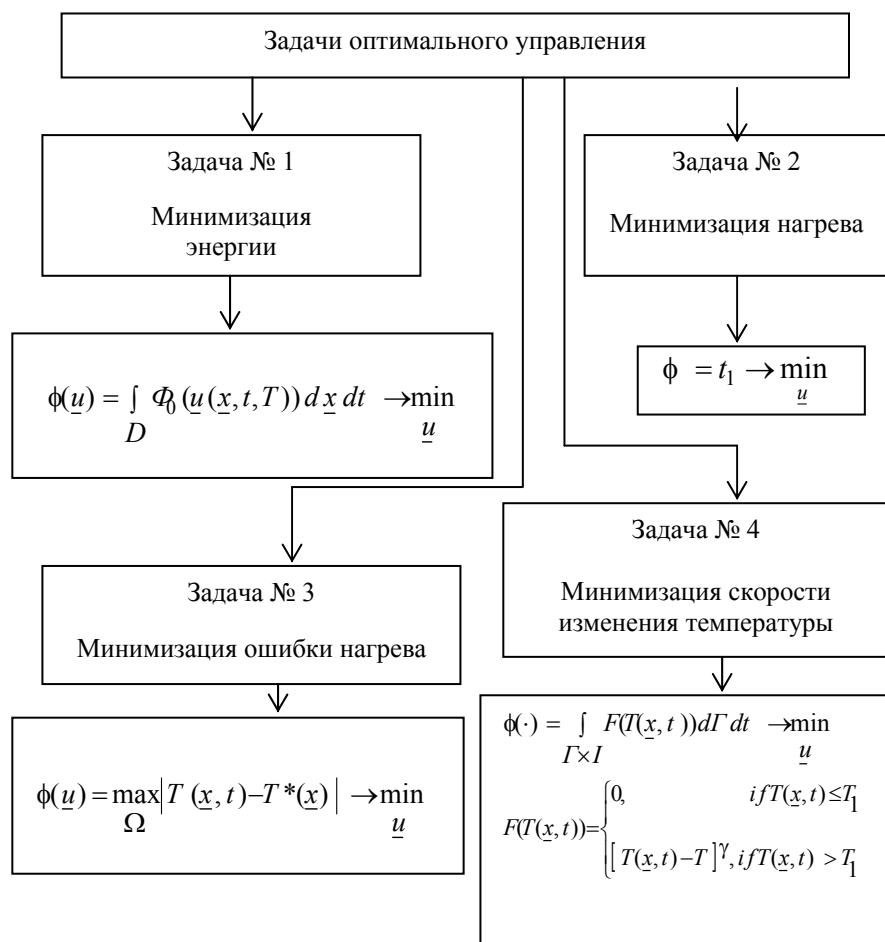


Рис. 8 Дерево задач управления

С математической точки зрения каждая из задач на рис. 8 является частным случаем задачи Дубовицкого-Миллютина для моделей с распределенными параметрами, которая представлена в табл. 4, где ограничения имеют следующий физический смысл:

1 Ограничение на перепад температуры

$$\max_{\Omega} | T(\underline{x}, t_i) - T^*(\underline{x}) | \leq \varepsilon_2 ; \quad (12)$$

ε_2 - задаваемая точность распределения $T^*(x)$.

2 Ограничение энергии на нагрев

$$\int_D \Phi_0(\underline{u}, (\underline{x}, \tau), \underline{x}, \tau) d\underline{x} dt \leq \varepsilon_4 ; \quad (13)$$

3 Ограничение на максимальную температуру

$$\max_{\Omega} T(\underline{x}, t_i) \leq \varepsilon_1 ; \quad (14)$$

4 Ограничение на термонапряжения в процессе нагрева

$$\sigma_K \leq \sigma_{T,2}$$

где σ_K - интенсивность термонагрева; $\sigma_{T,2}$ - граница пластичности и упругости деформации.

5 Ограничение на перепад температуры во время нагрева

$$\max_{\underline{x}, \underline{y}, t} | T(\underline{x}, t_i) - T(\underline{y}, t) | \leq \varepsilon_3 . \quad (15)$$

4 Задача Дубовицкого-Миллютина для модели с распределенными параметрами

$$\begin{aligned} \phi(\cdot) &\rightarrow \min_{\underline{u}} \quad (16) \\ &\text{при ограничениях} \\ \lambda[\theta] &= s(\underline{u}, \underline{x}, t, \theta), \\ k(\theta(\underline{x}, t_0), \underline{x}) &= 0, \\ I[\theta] &= q(\underline{u}, \underline{x}, t, \theta), \\ \varphi(\theta(\underline{x}, t_i), \underline{x}) &\leq 0, \\ \Phi_i(\theta, \underline{x}, t) &\leq 0, \quad i \leq M, \\ \varphi_i(\underline{u}(\underline{x}, t_i), \underline{x}, t) &\leq 0, \quad i = \overline{1, k}, \\ \underline{u} &= \underline{u}(\underline{w}, \underline{v}), \quad \underline{w} = \underline{w}(\underline{x}, t), \quad \underline{v} = \underline{v}(t). \end{aligned}$$

Таким образом, в данной главе выбраны критерии качества, решена задача Дубовицкого-Миллютина при ограничениях типа равенств и неравенств.

В пятой главе разработан комплекс технических средств и методики проведения экспериментальных исследований процесса вулканизации при местном ремонте шин, позволивший, с одной стороны, поставить и решить задачу идентификации неизвестных технологических параметров, а, с другой - оценить адекватность построенных математических моделей. Схема разработанной установки индукционного нагрева представлена на рис. 9.

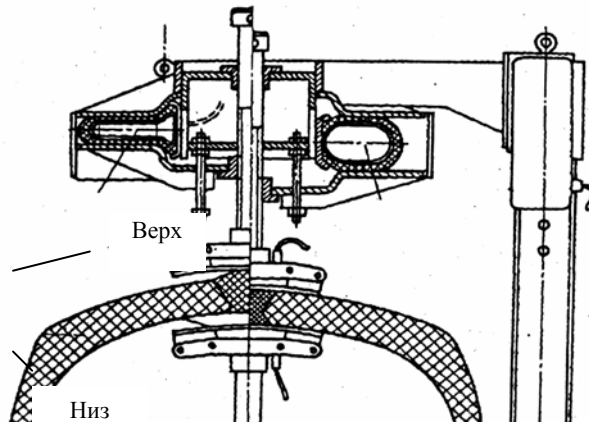


Рис. 9 Схема установки индукционного нагрева

При проведении эксперимента измерялась температура в четырех точках верхней и нижней нагревательных плит на трех участках ремонтируемой шины (протектор, плечо и боковины). Схема установки датчиков (термопар) представлена на рис. 10.

Полученные экспериментальные и расчетные данные изменения температуры в четырех точках для крупногабаритных шин представлены на рис. 11 - 13.

Разработанное аппаратное оформление и методика проведения экспериментальных исследований позволили поставить задачу идентификации, имеющую вид:

Найти α (коэффициент теплопередачи) доставляющий экстремум

$$\dot{\phi} \rightarrow \min \quad \phi = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^i \int_{t_0}^t (T_{ЭК}^i - T(x_i, t))^2 dt$$

при уравнениях с в виде математической модели, разработанной в третьей главе.

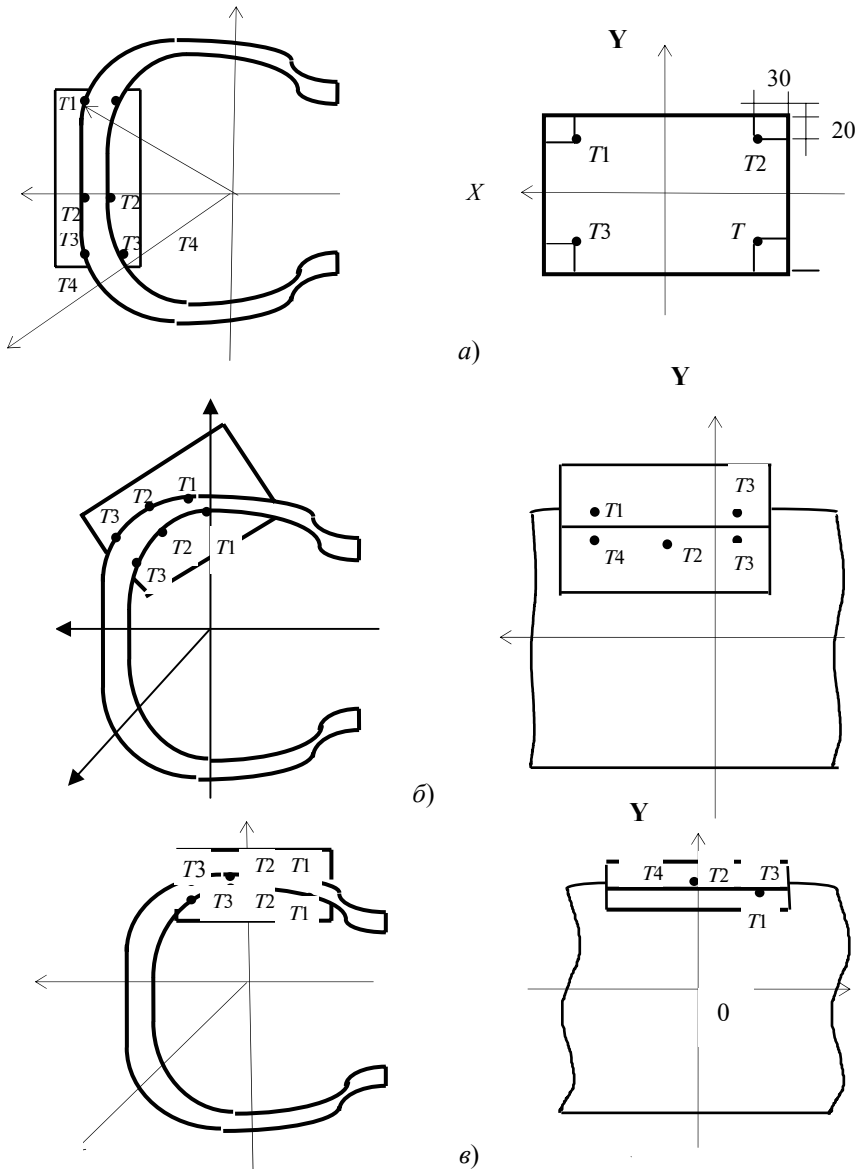


Рис. 10 Схема измерения температуры при проведении эксперимента:

a - протектор; *б* - плечо; *в* - боковина

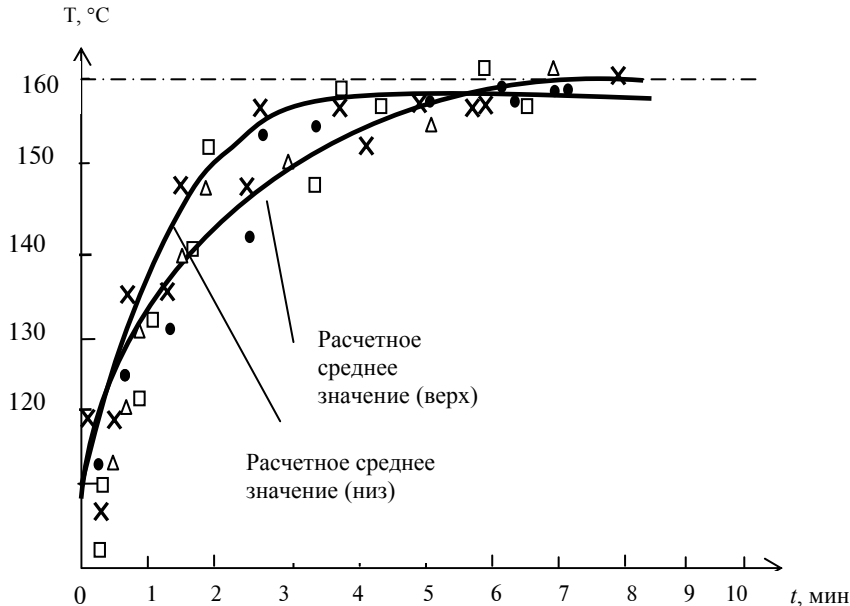


Рис. 11 Изменение температуры во времени в четырех точках протектора покрышки типоразмера 720×665 (верх; низ).

□ Точки: ● первая; ▲ вторая; × третья; □ четвертая

Таким образом, в данной главе полученные экспериментальные данные позволили решить поставленную задачу идентификации.

В шестой главе рассматривается построение алгоритмов численного анализа задач моделирования и оптимизации управления процесса индукционного нагрева. Характерной чертой рассматриваемой задачи вычисления оптимального управления является конечное ограничение на перепад температуры. Решение рассматриваемой задачи методом прямого использования локального принципа максимума позволило определить число предельных точек и параметров управления. Глава целиком посвящена численным решениям задач оптимального управления процессом индукционного нагрева. Представлен комбинированный численный алгоритм решения задачи, основанный на локальном принципе максимума с применением теории равномерных Чебышевских приближений. Особое внимание уделено проблеме допустимой аппроксимации математической модели объекта и точности задания его коэффициентов в общем алгоритме оптимального управления. Основные результаты получены с помощью теоремы Хана-Банаха и спектральной постановки задачи.

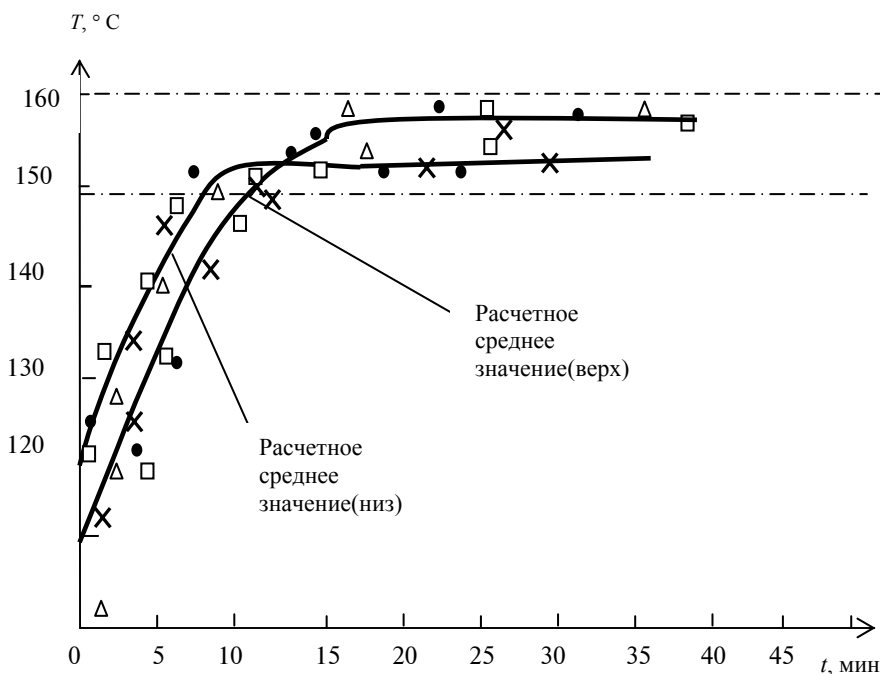


Рис. 12 Изменение температуры во времени в четырех точках плеча
покрышки типоразмера 720 × 665 (верх, низ)

В главе представлены примеры решения прикладных задач проблем оптимального управления процесса индукционного нагрева. С помощью пакета программ получено решение при учете существенной зависимости теплофизических и реологических параметров от температуры, в котором имеют место особые точки по фазовым ограничениям. Исследована конкретная прикладная задача с ограничениями, зависящими от времени и пространства. Проанализирована задача, связанная с особым оптимальным управлением. На рис. 14 - 16 представлены графики оптимального управления для различных зон повреждения крупногабаритной покрышки (720 × 665).

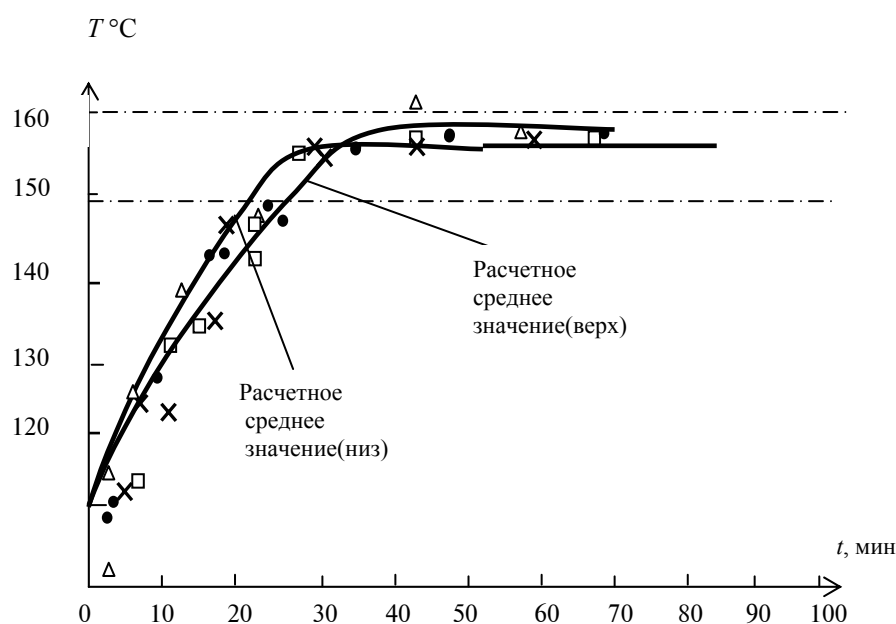


Рис. 13 Изменение температуры во времени в четырех точках боковины
покрышки типоразмера 720 × 665 (верх, низ)

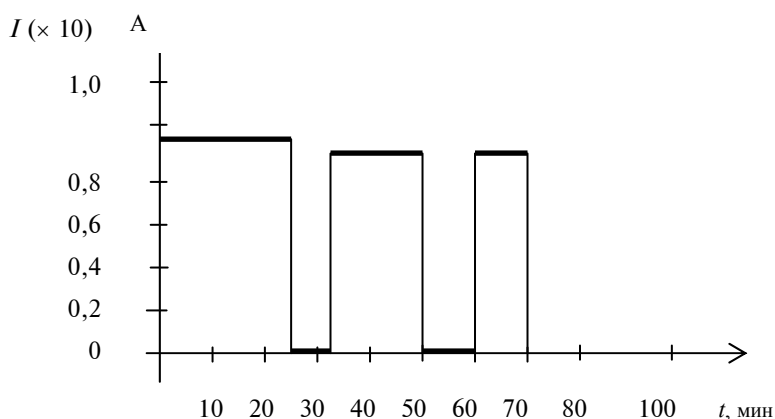


Рис. 14 Оптимальное управление для поврежденной покрышки

720 × 665 в зоне протектора

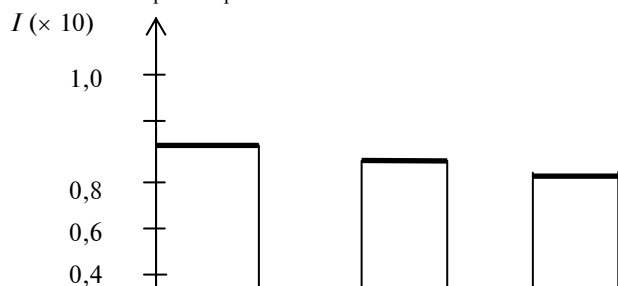


Рис. 15 Оптимальное управление для повреждения покрышки

720 × 665 в зоне плеча

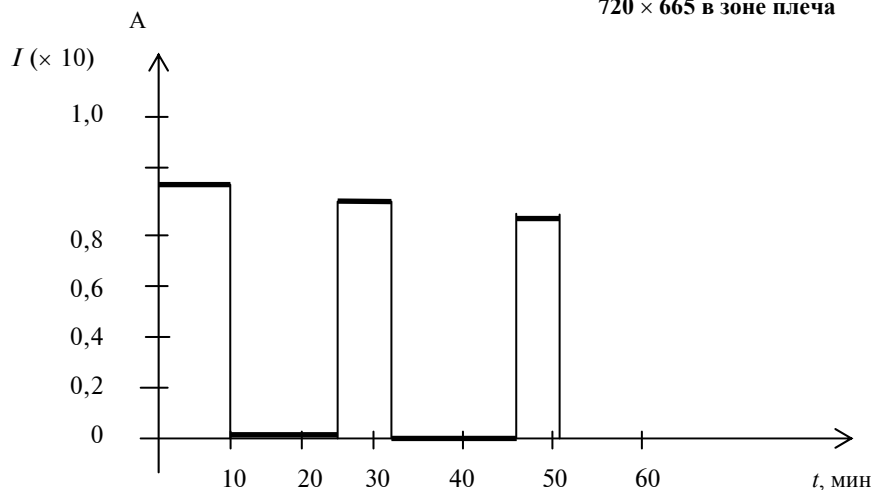


Рис. 16 Оптимальное управление для повреждения покрышки

720 × 665 в зоне боковины

Таким образом, в главе определены параметры управления, позволяющие вести оптимальное управление процессом вулканизации при местном ремонте шин индукционным нагревом и использовать их для расчетов коэффициентов, используемых при построении математических моделей функционирования ТС.

Основные результаты работы

1 Разработана и теоретически обоснована концепция построения математических моделей пригодных для проведения имитационных исследований и принятия управленческих решений, позволяющая использовать качественную информацию, характеризующую свойства транспортной системы.

2 Создан специальный математический аппарат и разработана методология, позволившая ввести в рассмотрение расширенные постановки и построить методы решения задач анализа управления и оптимизации, учитывающие свойства внутренней неопределенности транспортной системы.

3 На основе предложенной концепции разработана постановка задач оптимального размещения пунктов комплексного обслуживания и разработаны методы их решения.

4 Предложена и теоретически обоснована концепция постановки задач управления, оптимизации на пунктах комплексного обслуживания функционирования транспортной системы.

5 Предложены эффективные численные методы построения решения, основанные на использовании особенностей математических формализаций задач анализа.

6 Предложенная методология применена для решения задач анализа оптимизации и управления сложной транспортной системой.

7 Сформулирована и теоретически обоснована методология построения математических моделей процесса вулканизации шин при ремонте транспортных средств, пригодных для целей исследования и управления, учитывающая изменения внешних условий.

8 Разработаны и внедрены устройства управления вулканизаторов СП-1, СП-2, СП-3.

9 Разработаны и внедрены конструкции вулканизаторов СП-1, СП-2, СП-3.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

- 1 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Матвейкин В. Г. Моделирование и управление сложными транспортными системами: Монография. М.: Машиностроение, 2002. 291 с.
- 2 Громов Ю. Ю., Денисов А. П. Постановка задачи оптимального управления процессом нагрева резино-технических смесей с минимальной энергией. // ВГУ, МГУ. Воронеж, 1999. С. 65 - 66.
- 3 Громов Ю. Ю., Денисов А. П. Постановка задачи оптимального управления процессом нагрева резино-технических смесей с минимальным быстродействием // ВГУ, МГУ. Воронеж, 1999. С. 67 - 68.
- 4 Денисов А. П., Громов Ю. Ю. Устройство для измерения и регулирования температуры вулканизации // "Пантрягинские чтения - X". Современные методы в теории краевых задач. Воронеж. 1999. С. 321 - 314.
- 5 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Матвейкин В. Г., Мосягина Н. Г. Устройство измерения и регулирования температуры нагрева для вулканизаторов типа "Термопресс" // Приборостроение. 1999. № 7. С. 42 - 43.
- 6 Денисов А. П., Громов Ю. Ю., Провоторов В. В., Покорный Ю. В. Исследование задачи оптимального управления процесса вулканизации при местном ремонте шин. // ВГУ, МГУ. Воронеж. Информационные технологии и системы. 1999. С. 97.
- 7 Денисов А. П., Громов Ю. Ю. Алгоритм численного решения задачи оптимального управления процессом вулканизации. // ВГУ, МГУ. Воронеж. Математическое моделирование в естественных и гуманитарных науках. 2000. С. 80.
- 8 Пат. № 97118870/25 (019700). Вулканизатор для ремонта местных повреждений крупногабаритных шин / Н. П. Ланцов, А. П. Денисов, В. Г. Матвейкин, Ю. Ю. Громов, А. А. Денисова. Оpubл. 10.11.97.
- 9 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Математическое моделирование процесса вулканизации при местном ремонте шин в условиях неопределенности: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. Воронежск. гос. тех. ун-т. 1997. С. 48 - 52.
- 10 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Постановка задачи управления процессом вулканизации при местном ремонте шин в условиях неопределенности: Меж. вуз. сб. науч. тр. Воронеж. Воронежск. гос. тех. ун-т. 1997. С. 118 - 119.
- 11 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Использование нелинейных разностных схем при численном решении математической модели процесса местного шиноремонта / Тамбов: ТИХМ. 1996. 18 с. Деп. в ВИНТИ 17.04.96, № 1247-B96.
- 12 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Математическое моделирование процесса вулканизации при местном ремонте шин / Тамбов: ТИХМ. 1996. 20 с. Деп. в ВИНТИ 17.04.96, № 1248-B96.
- 13 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Постановка и решение задачи управления процесса местного шиноремонта / Тамбов: ТИХМ. 1996. 14 с. Деп. в ВИНТИ. 04.04.96, № 1096-B96.
- 14 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Решение уравнений математической модели процесса местного шиноремонта / Тамбов: ТИХМ. 1996. 47 с. Деп. в ВИНТИ. 04.04.96, № 1096-B96.
- 15 Денисов А. П. Вулканизатор для местного ремонта грузовых шин СП-1 / ЦНТИ. Тамбов. 1996. 4 с.
- 16 Денисов А. П. Вулканизатор для местного ремонта грузовых шин СП-2 / ЦНТИ. Тамбов. 1992. 4 с.
- 17 Денисов А. П. Устройство регулирования температуры для вулканизаторов СП1 / ЦНТИ. Тамбов. 1996. 4 с.
- 18 Громов Ю. Ю., Денисов А. П. Постановка задачи управления процессом вулканизации при местном ремонте крупногабаритных шин с минимальным быстродействием: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. Воронежск. гос. тех. ун-т. 1998. С. 111 - 112.
- 19 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Земской Н. А., Мосягина Н. Г. К вопросу моделирования процесса вулканизации при местном ремонте шин // Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. Воронежск. гос. тех. ун-т. 1998. С. 130 - 134.
- 20 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф., Земской Н. А., Мосягина Н. Г. Математическое моделирование и управление процессом вулканизации при местном ремонте шин в условиях неопределенности // Вестник, ТГТУ. 1996. Т. 3. № 4. С. 380 - 392.
- 21 Денисов А. П., Ащеулов А. А. К вопросу моделирования процесса вулканизации при местном ремонте шин / Актуальные проблемы информатики и информационных технологий. Тамбов: ТГУ. 1999. С. 18 - 19.
- 22 Денисов А. П. Устройство регулирования температуры для вулканизаторов СП-2 / ЦНТИ. Тамбов. 1996. 6 с.
- 23 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. и др. Математическое моделирование процесса вулканизации при местном ремонте крупногабаритных шин в условиях неопределенности: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. Воронежск. гос. тех. ун-т. 1998. С. 53 - 55.
- 24 Громов Ю. Ю., Денисов А. П., Мартемьянов Ю. Ф. Решение уравнений математической модели процесса местного шиноремонта для крупногабаритных шин: Межвуз. сб. тр. Тамбов: ТИХМ. 1996. С. 63 - 65.
- 25 Громов Ю. Ю., Денисов А. П. Новые подходы к постановке и решению задач управления процессами тепло- и массопереноса: Тез. докл. IV Международной теплофизической школы. Тамбов: Изд-во ТГТУ. 2001. С. 108.

