

МОДУЛЬ ПОДСИСТЕМЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

Д-р техн. наук, доц. А.Н. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц. И.В. ПАРФЕНОВ, ст.преп. А.А. ТЕРЕНТЬЕВ

Рассмотрена структурная оптимизация термодформационной системы металлорежущего станка. Основное внимание уделено практической реализации алгоритма бинарного программирования, принятого в качестве базового для решения задачи структурной оптимизации. Представленные исследования показали, что использование алгоритма бинарного программирования позволяет получить оптимальную структуру термодформационной системы станка, ее вид полностью определяется выбором ограничений.

Article is devoted to a question of structural optimization thermodeformed systems of the metal-cutting machine tool. Statement of a task of structural optimization thermodeformed systems of the machine tool is briefly submitted. The basic attention in work is given to practical realization of algorithm of the binary programming accepted as base for the decision of a task of structural optimization. The researches submitted in work have shown, that use of algorithm of binary programming allows to receive optimum structure thermodeformed systems of the machine tool, its kind is completely defined by a choice of restrictions.

Создание высокоточных станков требует проектных работ с проведением параметрической и структурной оптимизации несущей системы станка. В условиях развитости автоматизированных систем конечно-элементного анализа задачи параметрической оптимизации НСС принципиально можно считать решенными. Такие известные системы инженерного анализа, базирующиеся на методе конечных элементов (МКЭ), как Ansys, Nastran, Samcef в различных постановках позволяют их успешно решать. В [1—4] были изложены примеры практической реализации параметрической оптимизации для термодформационной системы станка (ТДСС).

В идеале оптимальная НСС должна быть результатом решения задачи структурно-параметрической оптимизации. Учитывая высокую размерность задачи параметрической оптимизации для НСС при использовании базовой конечно-элементной модели, обобщенную модель структурно-параметрической оптимизации НСС можно рассматривать как ближайшую перспективу (если не учитывать использование суперкомпьютеров). В настоящее время практически реализуем подход, основанный на первичности решения задачи структурной оптимизации с последующим проведением параметрической оптимизации. Одним из способов решения задачи структурной оптимизации является использование алгоритма бинарного программирования [5].

Постановка задачи бинарного программирования имеет вид

$$\min_x f'x \quad (1)$$

при заданных ограничениях

$$A_1x \leq b_1, \quad A_2x = b_2, \quad (2)$$

где f' — транспонированный вектор коэффициентов; x — вектор искомых параметров; A_1, A_2 — матрицы коэффициентов системы ограничений типа «неравенство» и «равенство» соответственно; b_1, b_2 — вектор правых частей систем (2).

Практическое применение алгоритма бинарного программирования показывает, что формирование вектора коэффициентов базируется на матрице коэффициентов взаимосвязей между элементами структуры ТДСС — $[P]$. Структура матрицы $[P]$ связана с архитектурой ТДСС [1—4], т. е. с компоновкой станка и протекающими в нем процессами. Компоновка станка определяет фиксированное множество элементов его несущей системы E , расположенных в определенном порядке. Для каждого элемента несущей системы станка реализуемо некоторое множество способов обеспечения теплоустойчивости станка S (СОТС). Комбинация элементов из обоих множеств позволяет сформировать множество вариантов структур ТДСС

$$T = \{(E_1, S_1), \dots, (E_\alpha, S_\alpha), \dots, (E_r, S_r)\}, \quad (3)$$

где E_α — совокупность элементов несущей системы станка; S_α — совокупность СОТС; (E_α, S_α) — α -ый вариант структуры ТДСС, $\alpha \rightarrow 1, r$; r — общее число вариантов структур ТДСС.

Элементами искомого вектора параметров x , определяющего оптимальную структуру ТДСС, являются только «1» (задане данного СОТС для элемента НСС) и «0» (в фиксированном элементе НСС рассматриваемый СОТС не задан).

Если принять общее число элементов СОТС равным k , а число элементов НСС равным n , то матрица $[P]$ имеет размер $[n \times k]$. Элементами матрицы $[P]$ являются количественные оценки, показывающие влияние данного набора СОТС для элемента НСС по выбранным критериям оптимальности K . Получив матрицу $[P]$, и, учитывая, что искомым вектор x имеет длину $< k \times n >$ можно получить вектор коэффициентов f . Вектор f фактически представляет собой матрицу $[P]$, записанную по столбцам.

Ограничения типа «равенство» и «неравенство» (2) позволяют исключить отдельные варианты структур ТДСС на этапе их генерации. Тип «неравенство» исключает варианты невозможных сочетаний СОТС в одном элементе НСС или нереализуемые на практике варианты использования СОТС для данного элемента НСС. Тип «равенство» позволяет организовать некоторый начальный вариант распределения СОТС в каждом элементе НСС. Оба типа ограничений вместе с матрицей $[P]$ устанавливают закономерность размещения СОТС в элементах НСС.

Программная реализация типового алгоритма бинарного программирования реализована в автоматизированной системе вычислений MATLAB 7 в виде встроенной функции «bintprog». На ее основе был разработан «модуль структурной оптимизации ТДСС». Разработанный программный модуль представляет решение задачи структурной оптимизации в локальной постановке. В общем случае в качестве СОТС для ТДСС может быть использован следующий набор типов множеств: свойства материала; тепловой поток; конвективный поток; пространственное расположение отдельных элементов, реализующих СОТС. Нами выбран только один тип — свойства материала, поэтому постановка задачи оптимизации относится к классу локальной. Решение задачи оптимизации в локальной постановке объясняется необходимостью исследования путей решения трех основных проблем: формирование матрицы $[P]$; организация системы ограничений; выбор системы критериев и расчет соответствующих критериальных ограничений.

Основные этапы решения локальной задачи структурной оптимизации следующие: разработка геометрической твердотельной модели НСС; формирование двух множеств: материалов S и элементов НСС — E ; формирование матрицы $[P]$; формирование системы ограничений A_1 и A_2 ; реализация алгоритма бинарного программирования.

Особенностью решения задачи структурной оптимизации ТДСС являлось использование результатов расчетов ТДСС с помощью системы инженерного анализа при фор-

мировании матрицы $[P]$. Расчеты проводятся итерационно по следующей программе (число итераций равно числу рассматриваемых материалов): для всех элементов НСС назначается один тип материала; проводится термодформационный расчет модели; с использованием встроенных средств систем инженерного анализа отдельно для каждого элемента НСС фиксируются значения по выбранным видам критериев (в качестве критерия в данном исследовании использовалось максимальное суммарное перемещение одной точки элемента НСС).

Копия экрана разработанного программного модуля представлена на рис. 1. Структура модуля включает следующие блоки: блок выбора файла исходных данных — «файл матрицы предпочтений»; блок просмотра множества элементов НСС — E («материал для НСС») и множества материалов S («элементы НСС»); блоки формирования ограничений типа «равенство» и неравенство — «изменения структуры матриц ограничений» и «расширенный анализ»; блок, реализующий дополнительные ограничения типа «неравенство» — «условия исключения»; расчетный блок.

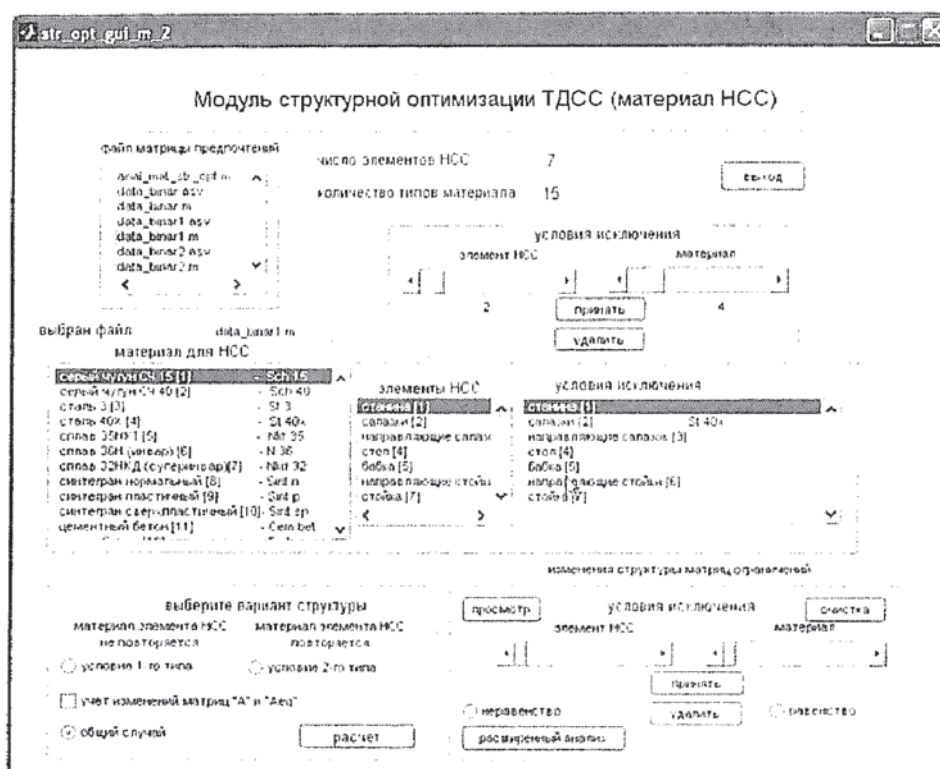


Рис. 1. Копия экрана программного модуля структурной оптимизации ТДСС

Файл матрицы предпочтений формируется заранее, так как он содержит три формализованные записи в виде матриц: множество E , множество S и матрица $[P]$.

Для формирования ограничений в общем виде предусмотрен дополнительный модуль «расширенный анализ матриц для условий «равенство» и «неравенство», активизируемый нажатием клавиши «расширенный анализ». Матрицы, реализующие ограничения типа «равенство» и «неравенство», представляют собой линейную совокупность подматриц. Число строк матрицы и подматрицы совпадает. Количество подматриц равно числу рассматриваемых материалов. Копия экрана этого модуля представлена на рис. 2.

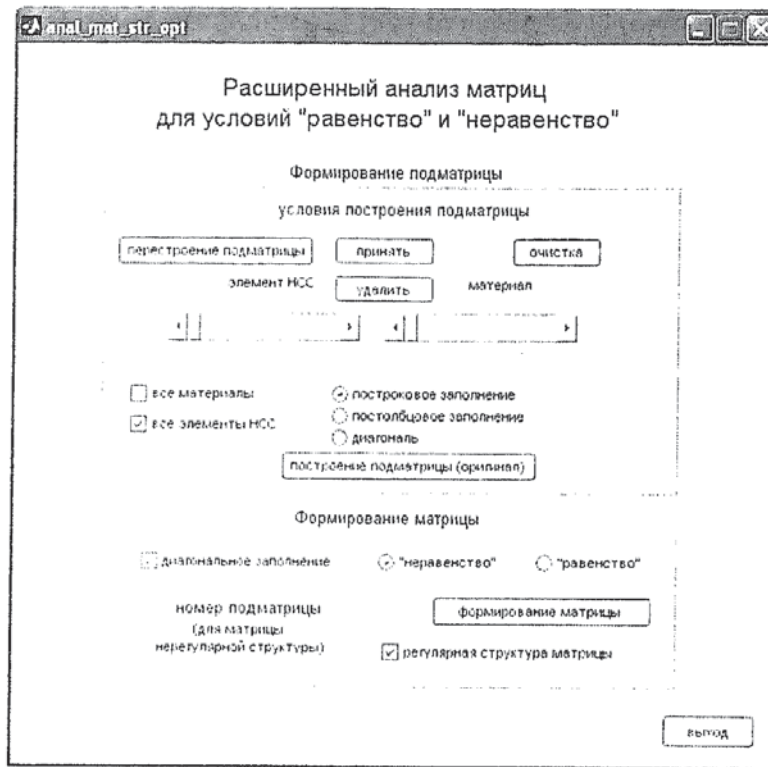


Рис. 2. Копия экрана дополнительного программного модуля для расширенного анализа матриц, реализующих ограничения «равенство» и «неравенство»

Принципиально он включает два основных блока — блок построения подматрицы и блок построения матрицы. Соответствующие переключатели «равенство» и «неравенство» определяют вид формируемой матрицы. Каждая из подматриц может быть сформирована или на основе учета всех элементов НСС или всех материалов, путем комбинации строк или столбцов. Для этого предусмотрены различные элементы управления — «построчковое заполнение», «постолбцовое заполнение», «диагональ». Для исключения отдельных элементов подматрицы предусмотрена система элементов управления — «условия построения подматрицы».

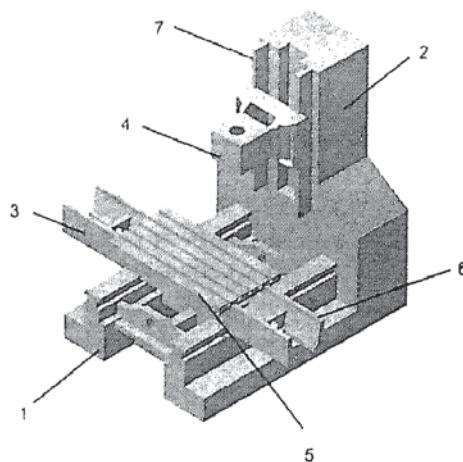


Рис. 3. Твердотельная модель станка

Для дальнейшей иллюстрации исследований на рис. 3 приведена трехмерная модель несущей системы многоцелевого станка, включающая семь элементов: станина 1, стойка 2, салазки 3, шпиндельная бабка 4, стол 5, направляющие салазок 6, направляющие стойки 7. Для каждого элемента НСС рассмотрено использование пяти групп различных материалов: две марки сталей; две марки чугунов; неметаллические материалы (синтегран нормальный, синтегран пластичный, синтегран сверхпластичный, полимербетон, цементный бетон, железобетон, природный гранит); бронза; сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения 35НКТ, 36Н и 32 НКД. Это означает, что при дальнейшем изложении значение параметра n принимается равным 7, а параметра k — равным 15.

Подматрицы, используемые в формировании матриц, реализующих условия типа «неравенство», имеют размер $[k \times n]$ (в рассмотренном примере — $[15 \times 7]$). При формировании подматриц может использоваться два варианта. В первом варианте используется комбинация переключателей: «все элементы НСС» и «построчковое заполнение», а во втором — «все материалы» и «постолбцовое заполнение». Подматрица, используемая при формировании матрицы ограничений типа «равенство», имеет диагональную структуру и размер $[n \times n]$, в частности для нашего случая — $[7 \times 7]$. Предложенная система переключателей в программном модуле (рис. 2) позволяет формировать матрицы «регулярной» и «нерегулярной» структуры. Например, при формировании матрицы регулярной структуры (матрица, имеющая идентичные подматрицы) используется переключатель «регулярная структура матрицы» (рис. 2). Этот же переключатель может быть использован при формировании «не типовых» матриц регулярной структуры. Для формирования «не типовых» матриц используется система элементов управления «условия построения матриц» (рис. 2). В этом случае, например, для отдельных элементов подматрицы может задаваться нулевой элемент. При формировании матриц нерегулярной структуры система элементов управления «условия построения матриц» используется только для одной фиксированной подматрицы. Остальные подматрицы имеют заранее установленную структуру (примеры и комментарии для таких матриц приведены ниже).

В соответствии с изложенной последовательностью решения задачи структурной оптимизации после формирования системы ограничений A_1 и A_2 , собственно, находится решение поставленной задачи путем реализации алгоритма бинарного программирования. В программном модуле предусмотрено три варианта (рис. 1), реализуемых включением соответствующих переключателей: «общий случай», «условие 1-го типа» и «условие 2-го типа».

На рис. 4, а приведен результат решения задачи структурной оптимизации при заданных типовых системах ограничений типа «равенство» (рис. 4, б) и «неравенство» (рис. 4, в). В рассматриваемом примере использована следующая система идентификаторов для материалов: Sch_15 (Чугун СЧ 15); Sch_40 (Чугун СЧ 40); St_3 (Сталь 3); St_40x (Сталь 40X); Nkt_35 (сплав 35НКТ); N_36 (сплав 36Н); Nkd_32 (сплав 32НКД); Sint_n (синтегран нормальный); Sint_p (синтегран пластичный); Sint_sp (синтегран сверхпластичный); Cem_bet (цементный бетон); Fe_b (железобетон); Nat_g (природный гранит); Pol_b (полимербетон); Bronz (бронза). Приведенное решение (рис. 4, а) означает, например, что для станины (1-ый элемент НСС) следует выбрать синтегран нормальный. При проведении проверки, т.е. был проведен термомодеформационный расчет в САЕ-системе Ansys с использованием различных вариантов задания материалов для элементов НСС, представленный вариант на рис. 4, а действительно оказался оптимальным по выбранному критерию.

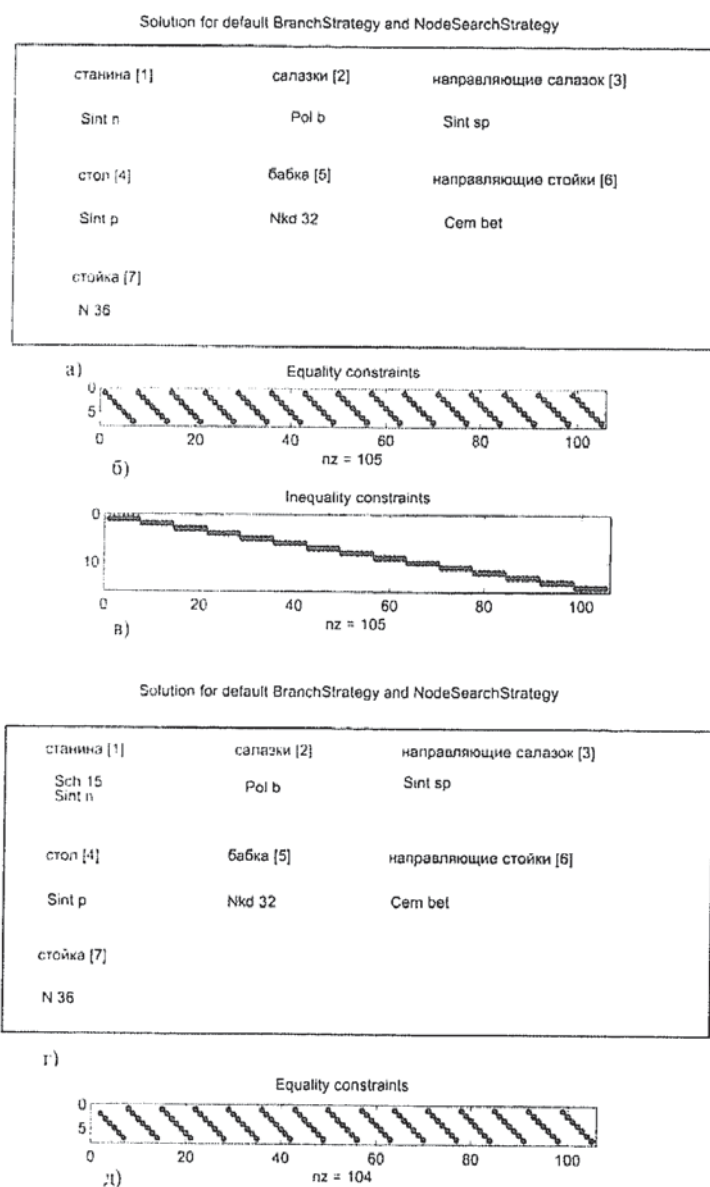


Рис. 4. Результаты моделирования

Особенностью использования данной системы ограничений является использование в каждом элементе НСС не повторяющегося (в другом элементе НСС) материала. На рис. 4, г приведено решение при тех же ограничениях типа «неравенство», но других ограничениях типа «равенство» (рис. 4, д). Для ограничений типа «равенство» использован нулевой элемент в первой подматрице. Это привело к варианту оптимальной ТДСС, в котором для станины следует использовать два материала: серый чугун СЧ15 и синтегран нормальный. Следует подчеркнуть, что на практике этот вариант решения не является приемлемым. Однако в данном случае показано, что при получении решения для структуры ТДСС, учитывающей несколько различных СОТС (не только материал), использование нулевого значения элемента подматрицы для конкретного элемента НСС означает, что для него при создании оптимальной структуры ТДСС должны одновременно использоваться несколько СОТС.

На рис. 5, а приведено решение для другого варианта использования типовой системы ограничений. Матрица ограничений типа «равенство» имеет тот же вид, что и в первом случае (подматрицы диагональной структуры), а матрица ограничений типа «неравенство» имеют постолбцовое расположение ненулевых элементов в каждой подматрице (рис. 5, б). Особенностью полученного решения является допущение использования повторяющегося материала во всех элементах НСС. В данном решении для каждого элемента НСС использован сплав 32НКД. На рис.5, в представлено решение для оптимальной ТДСС, полученное при том же варианте ограничений типа «неравенство», но другом варианте ограничений типа «равенство» (рис. 5, г). В данном случае для второго элемента СОТС, т.е. серого чугуна (идентификатор Sch 40) не задано условие «равенство».

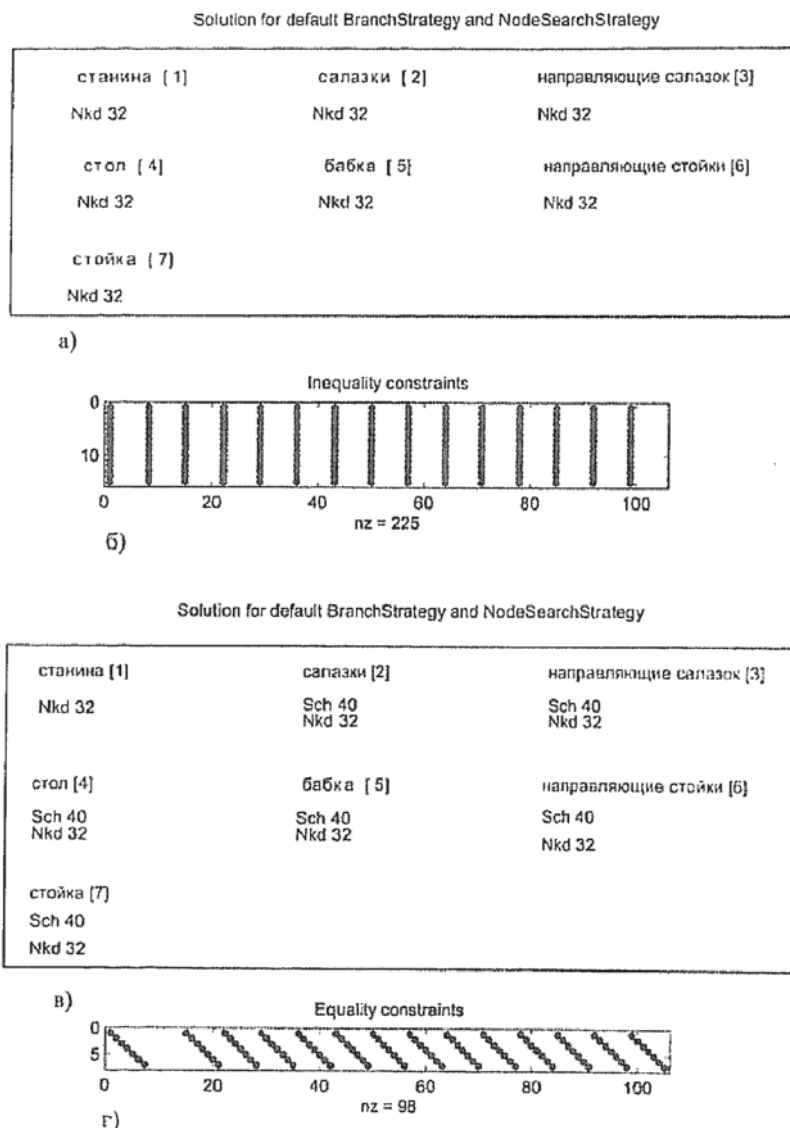


Рис. 5. Результаты моделирования

Следует сделать общее замечание для всех приведенных решений оптимальной ТДСС: они несколько далеки от практики, так как при формировании ограничений не учитывались дополнительные условия исключения, реализуемые в модуле элементами управления slider: «элемент НСС» и «материал» (рис. 1). Ограниченный объем статьи не позволяет

полностью представить все проведенные исследования. Тем не менее представленные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Использование алгоритма бинарного программирования позволяет получить оптимальную структуру ТДСС.

2. Вид оптимальной структуры полностью определяется выбором ограничений.

3. Система ограничений требует проведения дальнейших исследований, в ходе которых необходимо установить четкие формализованные взаимосвязи между структурами матриц, описывающих ограничения типа «равенство» и «неравенство», и структурой оптимальной ТДСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков А. Н. Оптимизация термодинамической системы плоскошлифовального станка ШПХ32.11 // Технология машиностроения, 2003. — №5. — С. 18—25.
2. Поляков А. Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: Учебное пособие. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. — 382 с.
3. Поляков А. Н. Построение и исследование оптимизационной термоупругой модели станка // Вестник машиностроения. — 2003. — № 6. — С. 51—57.
4. Поляков А. Н., Парфенов И. В. Анализ эффективности параметрической оптимизации тепловой модели станка // Известия вузов. Машиностроения. — 2002. — № 6. — С. 60—70.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. Красовского А.А. — М.: Наука, 1987. — 711с.