

# ЭКСПРЕСС-МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

А.Н. Поляков, И.В. Парфенов, А.А. Терентьев



**ПОЛЯКОВ  
Александр  
Николаевич**

Доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы» Оренбургского государственного университета. Специалист в области тепловых исследований металлорежущих станков, численных методов моделирования. Автор 115 научных работ и 4 учебных пособий, разработчик программных средств теплового моделирования станков и тепловых испытаний.



**ПАРФЕНОВ  
Игорь  
Валентинович**

Доцент, кандидат технических наук. Декан факультета дистанционных образовательных технологий Оренбургского государственного университета. Специалист в области динамики шпиндельных узлов и тепловых испытаний металлорежущих станков. Автор 50 научных работ, имеет 2 авторских свидетельства на изобретения, 2 учебных пособия.



**ТЕРЕНТЬЕВ  
Александр  
Арсентьевич**

Старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. Специалист в области испытаний металлорежущего оборудования. Автор 20 научных работ.

## Введение

Одним из важнейшим критериев работоспособности современных металлорежущих станков является их теплоустойчивость [1]. Все мировые лидеры станкостроения при проектировании и изготовлении высокоточного оборудования уделяют особое внимание влиянию тепловых процессов на показатели точности работы станков и предпринимают различные мероприятия по их минимизации или компенсации возникающей термической погрешности.

Разработанная на фирме Fadal система охлаждения основных узлов станка Cool Power позволяет поддерживать температуру позиционирующих элементов с точностью до 1 °C [2]. Фирма Mori Seiki (Япония) при проектировании станка мод. NZ S1500, предназначенного для

обработки валов диаметром до 120 мм, предусмотрела термосимметричную конструкцию, что обеспечило диапазон тепловых деформаций в пределах  $\pm 10$  мкм.

Один из лидеров мирового станкостроения фирма Окуита (Япония) в начале 2000-х годов разработала собственную концепцию термостабильности TFC (Thermo-Friendly Concept), получившую мировое признание и реализованную во всех выпускаемых фирмой прецизионных станках. Основная идея концепции TFC состоит в том, что благодаря специальной конструкции станка неконтролируемые параметры температурных деформаций в станке и деталях могут быть предельно минимизированы или преобразованы в контролируемые таким образом, чтобы стабилизировать отклонения при обработке. Ее применение позволило в коробчатых, термически симметричных конструкциях станин станков Окуита компенсировать искажения, связанные с температурными изменениями, и получить высокоадаптивные термохарактеристики. Контрольные и охлаждающие устройства минимизируют влияние тепла, воздействуя не только на обрабатываемые центры, но и на соприкасающиеся с ними детали и узлы. При разработке технологий TFC специалисты фирмы Окуита собрали и обобщили огромное количество данных, позволяющих отслеживать изменения температур и снижать деформации до минимальных значений, обеспечивая тем самым высочайшую точность обработки. Новые технологии TFC позволяют сохранять уровень отклонений не выше 10 мкм при изменении температуры на 8 °С в течение продолжительного времени обработки [3,4].

По мнению авторитетного конструктора проф. В.В. Бушуева, на конечный результат влияет ранняя стадия конструирования более значительно, чем каждая из последующих [5], поэтому новаторские конструкторские решения наиболее эффективны именно на ранней стадии выполнения поставленной задачи. Процедура оптимизации является важнейшей составляющей процесса создания высокоточных станков, а наиболее эффективным способом нахож-

дения новых решений при создании конкурентоспособных станков по критерию теплоустойчивости является структурная оптимизация их термдеформационных систем (ТДСС), под которыми подразумевается совокупность всех элементов упругой системы станка (УСС), обменивающихся между собой и с окружающей средой энергией и веществом [6, 7].

### **Постановка задачи структурной оптимизации**

Задача структурной оптимизации ТДСС формулируется следующим образом. В качестве основных исходных данных принимается компоновка станка и множество способов повышения его теплоустойчивости (СПТС). При этом требуется установить оптимальный вариант совокупности СПТС для каждого элемента несущей системы станка (НСС). В качестве СПТС для ТДСС может быть использован следующий набор элементов: свойства материала, тепловой поток, конвективный теплообмен и геометрия элементов несущей системы станка.

В соответствии с этим основными этапами решения задачи структурной оптимизации ТДСС являются:

- формирование типовой структуры ТДСС;
- обоснование принципа формирования множества структур ТДСС;
- формирование системы критериев;
- формирование ограничений для межкомпонентных связей типовой структуры ТДСС;
- выбор метода и процедуры структурной оптимизации;
- формирование определяющего функционала для процедуры оптимизации;
- получение решения с использованием процедуры оптимизации.

В методологии структурной оптимизации технических систем типовая структура представляется отдельными элементами рассматриваемой системы и связями между ними. Типовая структура ТДСС включает в качестве элементов структуры элементы НСС или отдельные их части, а связи реализуются различными СПТС, т.е. каждому элементу НСС (или час-

ти элемента НСС) сопоставляется некоторое множество СПТС [9]. Тогда формула отдельной  $\alpha$ -структуры ТДСС может быть представлена в виде:

$$G_{\alpha}=(E_{\alpha}, S_{\alpha}), \alpha \rightarrow 1, \dots, r, \quad (1)$$

где  $G_{\alpha}$  – обобщенное описание отдельной структуры;  $E_{\alpha}$  – совокупность элементов НСС;  $S_{\alpha}$  – совокупность элементов СПТС;  $(E_{\alpha}, S_{\alpha})$  –  $\alpha$ -вариант структуры ТДСС;  $r$  – общее число вариантов структур ТДСС.

Каждый из элементов типовой структуры ТДСС ( $S_{\alpha}$  или  $E_{\alpha}$ ) может быть представлен как одним элементом НСС или СПТС, так и их совокупностью. Тогда, обобщенное множество структур ТДСС может быть представлено комбинацией типовых структур:

$$G=\{G_1, \dots, G_{\alpha}, \dots, G_r\}. \quad (2)$$

Формальное представление задачи структурной оптимизации имеет вид [8]:

$$\min_{G \in W} Q(G) \Rightarrow G_{оп}, \quad (3)$$

где  $Q(G)$  – функционал, заданный на множестве структур ТДСС  $G$ ;  $W$  – система ограничений;  $G_{оп}$  – оптимальная структура ТДСС.

Чтобы сформировать функционал  $Q(G)$  необходимо сформировать систему критериев. Исходя из особенностей ТДСС принимаются четыре группы критериев:

- по тепловому состоянию;
- по деформированному состоянию;
- технологический критерий;
- экономический критерий.

Обобщенный критерий оптимальности может быть представлен выражением:

$$K = \{\mathbf{P}, \mathbf{P}_{max}, \Delta, \Omega, \Theta, \Theta_{max}, C, T\}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{P}=\{\mathbf{P}_x, \mathbf{P}_y, \mathbf{P}_z, \mathbf{P}_e\}$  – вектор координатных перемещений характерных точек ТДСС;  $\mathbf{P}_x=\{P_{1x}, \dots, P_{px}\}^T$ ,  $\mathbf{P}_y=\{P_{1y}, \dots, P_{py}\}^T$ ,  $\mathbf{P}_z=\{P_{1z}, \dots, P_{pz}\}^T$ , – векторы перемещений  $p$  характерных точек ТДСС вдоль соответствующих координатных осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ;  $\mathbf{P}_{\Sigma}$  – вектор полных перемещений характерных точек ТДСС;  $\mathbf{P}_{max}$  – максимальное полное перемещение некоторой одной точки НСС (расположение точки не регламентируется);  $\Delta$  – вектор линейных деформаций;  $\Omega$  – вектор угловых деформаций;  $\Theta$  – вектор температур в фиксированных точках ТДСС;  $\Theta_{max}$  – мак-

симальная установившаяся температура в ТДСС;  $\Delta\Theta_{max}$  – максимальная температура при неравномерном нагреве элементов НСС;  $C$  – критерий экономической эффективности;  $T$  – технологический критерий.

В общем случае отыскание глобального оптимума возможно только при полном переборе всех имеющихся вариантов. Однако элементарные вычисления позволяют легко оценить порядок числа вариантов структур ТДСС. Например, для одного из рассмотренных ниже вариантов компоновки станка общее число вариантов структур ТДСС составило более 500000. Поэтому для уменьшения вычислительных затрат при практической реализации решения задачи структурной оптимизации вводят систему ограничений типа «равенство» и «неравенство». Тип «неравенство» исключает или практически нереализуемые варианты использования СПТС, или варианты сочетаний СПТС, которые не возможны в одном элементе НСС. Тип «равенство» позволяет организовать некоторый начальный вариант распределения СПТС в каждом элементе НСС.

Проведенные авторами исследования позволили сформировать следующий план усложнения структуры ТДСС:

- один фиксированный СПТС в каждом элементе НСС;
- фиксированное число повторяющихся СПТС в каждом элементе НСС;
- фиксированное число не обязательно повторяющихся СПТС в каждом элементе НСС;
- любое число СПТС в отдельных элементах НСС (СПТС в некоторых элементах НСС может отсутствовать).

Использование обобщенного критерия (4) рассматривается как стратегическая задача, на практике пока реализованы лишь локальные представления данного критерия [9].

Основными критериями выбора метода для решения задачи структурной оптимизации являются: эффективность метода и удобство его алгоритмической и программной реализации. В настоящее время при решении задач структурной оптимизации достаточно активно разви-

ваются методы бинарного программирования.

### Реализация метода бинарного программирования

Постановка задачи бинарного программирования имеет вид [10]:

$$\min_x \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{X} \quad (5)$$

при заданных ограничениях

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} &\leq \mathbf{b}, \\ \mathbf{A}_e \cdot \mathbf{X} &= \mathbf{b}_e, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mathbf{f}^T$  – транспонированный вектор коэффициентов;  $\mathbf{X}$  – вектор искомых параметров;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}_e$  – матрицы коэффициентов системы ограничений типа «неравенство» и «равенство»;  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{b}_e$  – векторы правых частей.

Практическая реализация метода бинарного программирования показывает, что формирование вектора коэффициентов базируется на матрице предпочтений  $\mathbf{P}$  размером  $(n \times k)$  ( $k$  – общее число СПТС,  $n$  – число элементов НСС). Элементами матрицы  $\mathbf{P}$  являются количественные оценки, показывающие влияние данного набора СПТС для элемента НСС по критериям оптимальности (4). Для получения каж-

дого элемента матрицы предпочтений используются результаты термдеформационного расчета для твердотельных моделей станка в САЕ-системе ANSYS [11].

Метод бинарного программирования в тепловом проектировании станков ранее не использовался, что потребовало проведения тщательного исследования. Авторами был выбран эволюционный путь исследования – последовательное изучение особенностей получения решения при введении новых СПТС. Использование двух типов СПТС (конвективный теплообмен и тепловой поток) показало необходимость учета характера термдеформированного состояния станка.

### Термдеформированное состояние станка

Термдеформированное состояние станка является неоднородным, а формирование матрицы предпочтений  $\mathbf{P}$  выполняется при раздельном влиянии СПТС. Чтобы получить адекватные решения в структурной оптимизации ТДСС при использовании метода бинарного программирования необходимо соблюдение принципа суперпозиции локальных решений

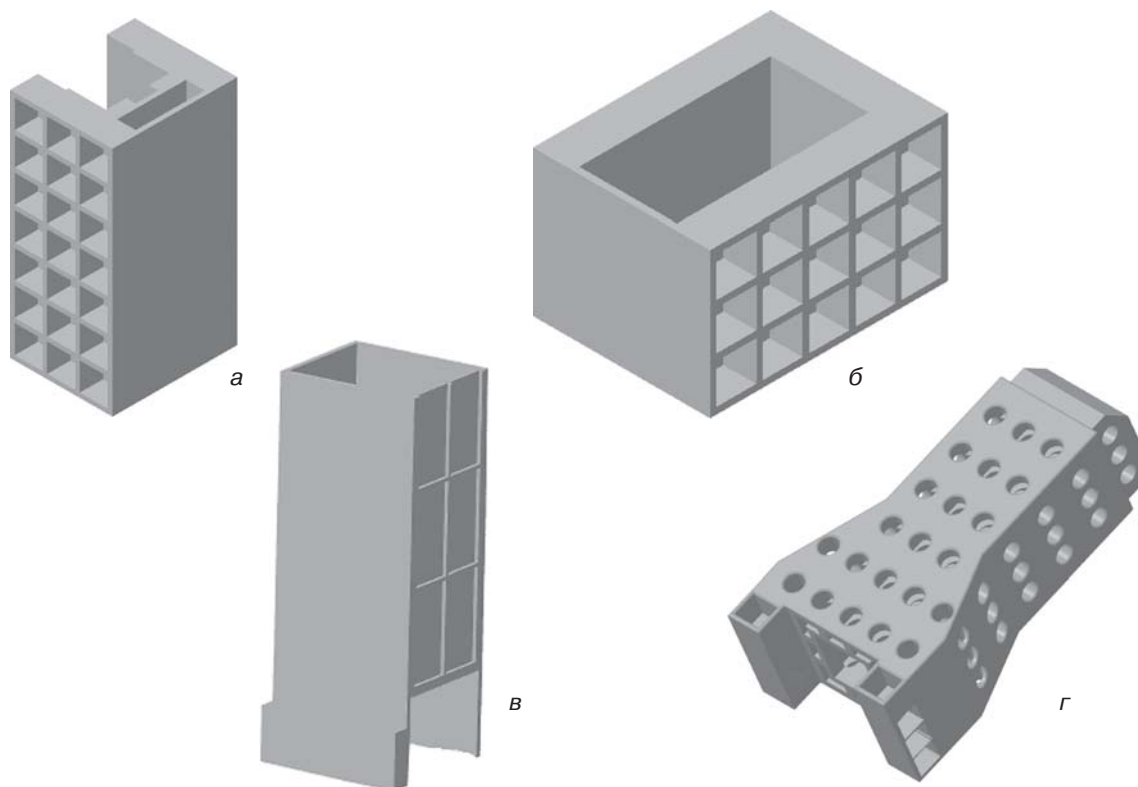


Рис. 1. Элементы НСС ячеистой структуры

для ТДСС, что означает качественное согласование характера теплового деформирования несущей системы станка при раздельном и одновременном задании СПТС.

Для этого были выполнены серии вычислительных экспериментов для НСС многоцелевого станка, для которого в качестве СПТС использовались конвективные и тепловые потоки. Для реализации задачи структурной оптимизации ТДСС в такой постановке были использованы конструкции станков с ячеистой структурой элементов НСС [12, 13]. На рис. 1 представлены твердотельные модели различных элементов НСС. Ячеистая структура элементов НСС позволяет рассмотреть варианты структур ТДСС с комбинацией конвективных и тепловых потоков, подаваемых в отдельные ячейки элементов НСС. Этот вариант представления СПТС может быть практически реализован и в отечественном станкостроении, так как некоторые российские фирмы благодаря применению быстродействующих УЧПУ (устройство числового программного управления) создают высокоавтоматизированные станки мирового уровня [14].

В вычислительном эксперименте использовалась твердотельная модель станка портальной компоновки с четырьмя элементами НСС ячеистой структуры.

Вычислительный эксперимент проводился по следующей схеме:

- выполнение серий вычислений, в ходе которых формировалась матрица предпочтений **Р**;
- получение зависимостей перемещений характерных точек станка при одновременном и раздельном действии СПТС;
- получение решения задачи структурной оптимизации ТДСС с использованием метода бинарного программирования;
- проверка адекватности полученного решения для оптимальной структуры ТДСС.

Для определения структуры матрицы предпочтений **Р** были проведены предварительные исследования различных вариантов ТДСС с использованием элементов НСС ячеистой структуры. Первоначально проводились расчеты термодетформированного состояния станка, в котором рассматривалось задание СПТС в «ячейки» нижнего 1 и верхнего 2 суппортов (рис. 1, а и 1, б, соответственно). Анализ результатов моделирования показал:

- низкую эффективность влияния выбранных СПТС на перемещение переднего конца шпинделя;
- высокую трудоемкость проверки адекватности полученной оптимальной структуры ТДСС, так как объем вычислений пропорционален количеству всех вариантов структур ТДСС.

Применение левой и правой стоек ячеистой структуры (рис. 1, в) показало достаточ-

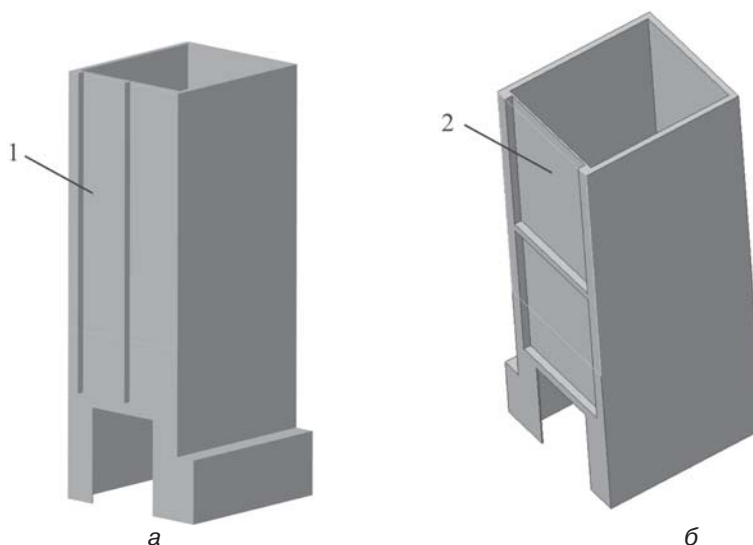


Рис. 2. Твердотельные модели левой и правой стоек с двумя ячейками:  
1 – нижний суппорт; 2 – верхний суппорт



ную чувствительность ТДСС к выбранным СПТС, но при этом чрезмерно большой объем вычислений при проверке адекватности полученной с помощью метода бинарного программирования оптимальной структуры ТДСС.

Поэтому в последующих исследованиях рассматривалась компоновка станка, в которой стойки имели по две ячейки (рис. 2).

Для принятых конструкций стоек размер матрицы предпочтений составил при общем числе вариантов структур ТДСС равным 81.

Для получения зависимостей перемещений характерных точек станка при одновременном и раздельном действии СПТС было выполнено 85 вычислений термдеформированного состояния станка для каждого из вариантов стоек (для двух вариантов 170). Для того чтобы оценить трудоемкость выполненных вычислений приведем следующие данные: число узлов сеточной модели станка – 93166; среднее время одного вычисления – 20 мин на компьютере типа PIV шестой серии.

На рис. 3 представлены диаграммы и зависимости перемещений центральной точки оправки, установленной в шпиндель, при одновременном и раздельном действии СПТС, для 10 вариантов структур ТДСС (на горизонтальную ось V нанесены номера индексов вариантов).

Диаграммы построены в виде триад. Первый и второй столбцы в каждой триаде показывают изменение температурных перемещений при раздельном действии теплового потока и конвективного теплообмена. Средние значения диаграмм соединены ломаными линиями, соответствующими различным тепловым процессам.

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать такие выводы.

1. Есть отдельные варианты структур ТДСС, для которых соблюдаются следующие закономерности: существует ярко выраженное доминирование одного из СПТС; доминирующий СПТС может использоваться для качественной (не количественной) оценки прогнозируемого состояния ТДСС при совместном действии СПТС. Так, характерными являются три первых варианта, а также две пары вариантов структур ТДСС: 5, 6 и 7, 8 (кривые 1 и 3 в этих вариантах практически параллельны);

2. В общем случае для различных вариантов структур ТДСС принцип суперпозиции по критериям температурных перемещений не соблюдается. Это означает невозможность прогнозирования уровня температурных перемещений для ТДСС, структура которой включает совместное действие СПТС по перемещениям ТДСС, использующей отдельный СПТС.

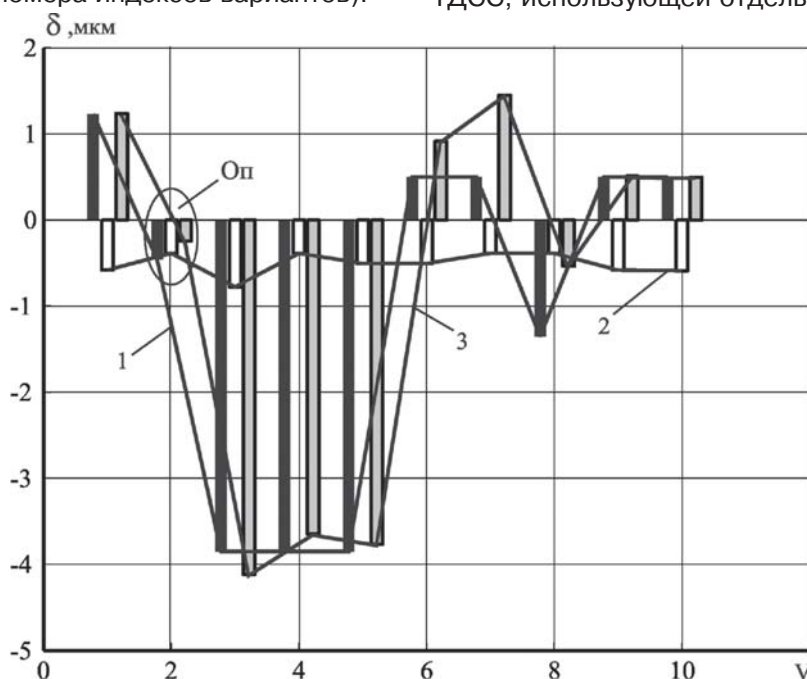


Рис. 3 Температурные перемещения характерной точки станка: 1 – действие теплового потока, 2 – действие конвективного теплообмена; 3 – совместное действие теплового и конвективного потоков

Оптимальная структура ТДСС (выделенная область «Оп» на рис. 3) получена в ходе реализации метода бинарного программирования.

Для проверки адекватности полученной оптимальной структуры ТДСС были выполнены расчеты термдеформированного состояния всех возможных структур ТДСС. Сопоставление оптимальных ТДСС, полученных методами бинарного программирования и полного перебора, показало несовпадение их структур. Это объясняется тем, что неоднородный характер температурных деформаций НСС в оптимизационной модели ТДСС, реализующий метод бинарного программирования, не учитывается. Оптимальная структура ТДСС по методу бинарного программирования имеет локальный минимум и выбирается по минимальным значениям критериев при раздельном использовании СПТС, что, в общем случае, для ТДСС не приемлемо (рис. 3).

Таким образом, результаты выполненных исследований показали, что существует два пути решения проблемы учета неоднородного характера температурных деформаций станка при отыскании оптимальной структуры ТДСС:

- разработка такой оптимизационной модели, которая учитывала бы неоднородный характер температурных деформаций в различных, случайным образом формируемых сочетаниях СПТС;
- разработка экспресс-модели станка, практически моментально определяющей его термдеформированное состояние.

В данной работе рассмотрен второй путь. При решении задачи структурной оптимизации экспресс-модель позволяет применить метод полного перебора. Особенностью предлагаемой в работе экспресс-модели станка являлось сочетание его подробной конечно-элементной модели с упрощенной математической моделью прогнозирования температурных перемещений характерных точек НСС от совместного действия СПТС. Такой подход объясняется тем, что подробная конечно-элементная модель станка позволяет учитывать все СПТС, а упрощенная модель расчета температурных пере-

мещений минимизирует вычислительные затраты.

Упрощенная модель расчета температурных перемещений построена на следующих допущениях:

- предполагается известным исходное термдеформированное состояние станка;
- хотя принцип суперпозиций для ТДСС относительно раздельного и совместного действия СПТС однозначно не соблюдается, его использование в целом не нарушает качественную оценку термдеформированного состояния.

При составлении упрощенной модели расчета температурных перемещений принималась парадигма, в соответствии с которой в качестве оптимальной структуры ТДСС считалась структура, в наибольшей степени уменьшающая исходные перемещения при сравнении температурных перемещений для всех вариантов структур ТДСС. Таким образом, модель строится не на прогнозе собственно перемещений, а на прогнозе изменений перемещений от действия СПТС.

Каждый из отдельно рассматриваемых СПТС вызывает изменение перемещений  $\Delta_{пр,\xi}$ , равное:

$$\Delta_{пр,\xi} = \delta_{\xi} - \delta_0, \quad (7)$$

где  $\delta_{\xi}$  – температурное перемещение характерной точки для  $\xi$ -го варианта структуры ТДСС, определенное по конечно-элементной модели с помощью САЕ-системы;  $\delta_0$  – перемещение этой же точки в исходном термдеформированном состоянии.

Тогда при совместном действии рассматриваемых СПТС изменение перемещений характерных точек станка принимается:

$$\Delta_{пр,i} = \left| \sum_{j=1}^s \delta_{i,j} - s \cdot \delta_0 \right|, \quad i = 1, \dots, r, \quad (8)$$

где  $\delta_{i,j}$  – температурное перемещение характерной точки для  $i$ -го варианта структуры ТДСС, обусловленное  $j$ -м действием СПТС (фактически, это значение перемещения  $\delta_{\xi}$  в (7));  $s$  – количество СПТС, реализованных в каждом  $j$ -м варианте.

Использование соотношений (8) формирует множество значений, из которых определит-

ся одно, соответствующее оптимальной структуре ТДСС, для чего устанавливается регламентирующее значение ошибки  $\varepsilon$ :

$$|\delta_p - \delta_o| \leq \varepsilon, p \in [1, r], \quad (9)$$

где  $\delta_p$  – температурное перемещение характерной точки станка.

Ошибка определяет размер области значений  $\delta_p$  (рис. 4), и тем самым рассматриваемое подмножество вариантов структур ТДСС.

Описанная модель была сформирована из анализа результатов вычислительного эксперимента, проведенного по следующей программе:

а) по сформированной матрице предпочтений  $\mathbf{P}$  размером  $(n \times k)$  выполняется  $n \times k$  расчетов, в ходе которых определяются температурные перемещения характерных точек станка;

б) определяется общее число вариантов структур ТДСС (для рассматриваемой модели – 80) и, используя выражения (7–9), формируется множество значений  $\Delta_{pr,i}$ ;

в) строится графическая зависимость 1 в системе координат  $\delta - V$  (см. рис. 4);

г) назначается ошибка  $\varepsilon$  и выделяется прямоугольная область шириной  $2\varepsilon$  (назовем ее

прогнозируемая область оптимальных структур – ПООС);

д) для всех вариантов структур ТДСС выполняется конечно-элементный расчет термомодеформированного состояния станка и выбирается один – оптимальный, т.е. удовлетворяющий условию:

$$|\Delta_{i,j}| \rightarrow \min, \quad (10)$$

е) строится графическая зависимость 2 в системе координат  $\delta - V$  (см. рис. 4);

ж) выполняется анализ качественного и количественного соответствия пиков и впадин графиков 1 и 2, а также размера подмножества структур ТДСС, попавших в ПООС.

Проведенный вычислительный эксперимент показал:

- хорошее качественное согласование графиков 1 и 2; только для отдельных структур ТДСС наблюдается незначительное качественное рассогласование (например в области А, В и С на рис. 4);

- подмножество структур ТДСС из ПООС имеет существенно меньший размер, чем полное множество структур ТДСС.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сформировать следующую методи-

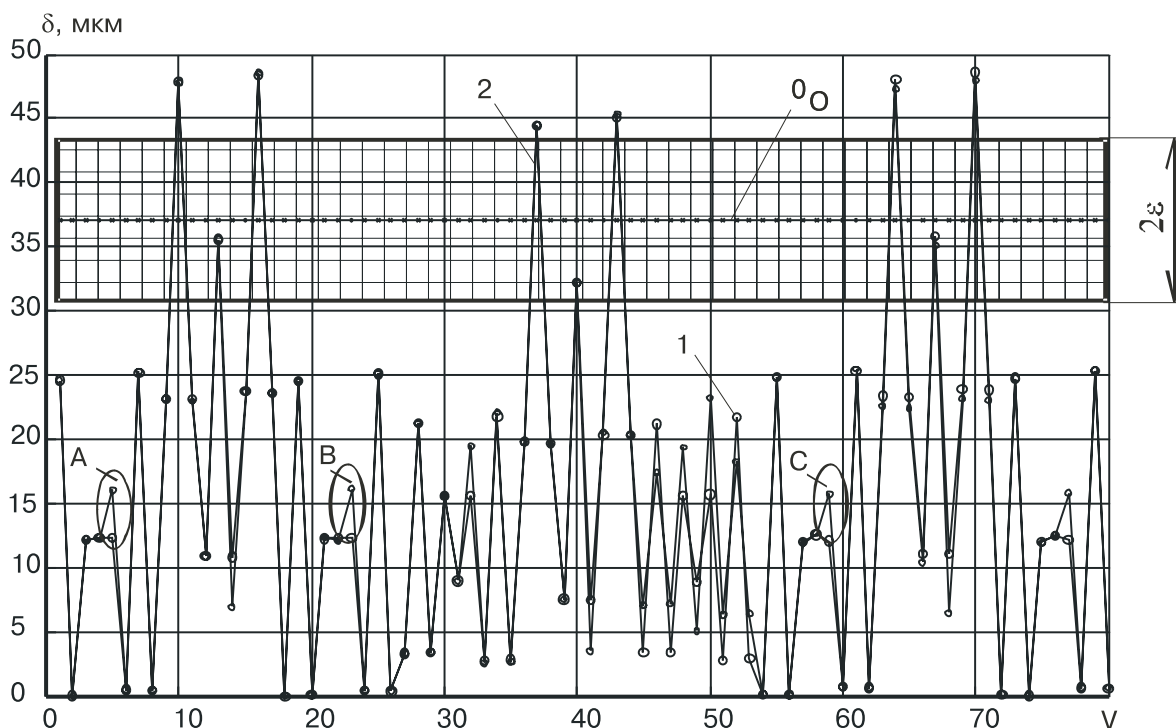


Рис. 4. Результаты вычислительного эксперимента: 1 – расчетные результаты с использованием экспресс-модели; 2 – результаты конечно-элементного расчета



ку решения задачи структурной оптимизации:

- формирование матрицы предпочтений **P** размером ( $n \times k$ );
- выполнение  $n \times k$  расчетов термдеформационного состояния станка;
- формирование общего числа вариантов структур ТДСС;
- формирование множество значений  $\Delta_{pr,i}$ ;
- построение графика 1 в системе координат  $\delta - V$ ;
- назначение ошибки  $\varepsilon$  и построение ПООС;
- для соответствующих вариантов структур ТДСС из ПООС выполняется конечно-элементный расчет термдеформированного состояния станка и выбор оптимального варианта.

### Заключение

Проведенные исследования позволили установить нижеследующее:

- традиционные методы структурной оптимизации ТДСС построены на использовании принципа суперпозиции для отдельных СПТС;
- неоднородный характер температурных деформаций станков не позволяет применять традиционные методы структурной оптимизации при использовании температурных перемещений в качестве критериев оптимальности в силу несоблюдения принципа суперпозиции, т.е. невозможности прогнозирования уровня температурных перемещений для ТДСС, структура которой включает совместное действие СПТС по температурным перемещениям ТДСС с отдельным СПТС;
- единственным способом достоверной оценки термдеформированного состояния станка при необходимости учета сложного сочетания различных СПТС является его термдеформационный расчет (при достигнутом уровне развития CAE-систем – конечно-элементный расчет);
- предложенная экспресс-модель существенно уменьшает число вычислений, необходимых для решения задачи структурной оптимизации.

### Список литературы

1. Потапов В.А. Требования потребителей к обрабатывающим центрам // Эксперт: Оборудование (рынок, предложение, цены). Март 2003. <http://www.ufastanki.ru/>

- articles.php?sid=&l=en&f=y&ar=10.
2. Современные обрабатывающие центры «Fadal». <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11811.html>.
3. The Thermo-Friendly Concept. [http://www.okuma-overseas.com/thermo\\_friendly/Thermo-Friendly.htm](http://www.okuma-overseas.com/thermo_friendly/Thermo-Friendly.htm).
4. Okuma's Guide to Thermal Control Technology. [http://www.okumamerit.com/e\\_related/report\\_pdf/tcg/tcg01.html](http://www.okumamerit.com/e_related/report_pdf/tcg/tcg01.html).
5. Бушуев В.В. Практика конструирования машин. Справочник – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
6. Поляков А.Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: Учеб. пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 382 с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник: Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 559 с.
8. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 711 с.
9. Поляков А.Н., Парфенов И.В., Терентьев И.В. Решение задачи структурной оптимизации термдеформированной системы станка // Технология машиностроения. 2007. № 7. С. 29–33.
10. Nemhauser G.L., Wolsey L.A. Integer and combinatorial optimization. N.Y.: John Wiley & Sons Inc., 1988. – 754 p.
11. Поляков А.Н., Каменев С.В. Расчет базовых деталей станков в системе ANSYS: Учеб. пособие. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2006. – 111 с.
12. Вертикальные высокоскоростные обрабатывающие центры. <http://www.exen.ru/catalogue/?660>.
13. Fulland – специалист прецизионной обработки // ИТОНовости: Приложение к журналу «Комплект: ИТО: Инструмент. Технология. Оборудование». 2006. № 9. С. 2.
14. Жаринов В.Н., Зинов В.Л., Кудояров Р.Г., Дурко Е.М. Разработка новых многоцелевых станков для изготовления деталей сложной формы // СТИН. № 10. С. 21–25.