

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131

Поляков А.Н., *Никитина И.П., Позевалкин В.В.

Оренбургский государственный университет

*E-mail: innanikitina@list.ru

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

Аннотация. Представлена методика построения цифровой модели термодиформационной системы станка, используемой при создании цифровых двойников станков, для которых актуально их термоупругое поведение, основанное на решении задачи термоупругости. В качестве специального программного обеспечения, позволяющего создать цифровую модель, использованы платформы Ansys Workbench и Ansys Twin Builder. В качестве объекта моделирования использован двусторонний торцевально-шлифовальный станок, для которого ранее были проведены экспериментальные исследования. Экспериментальные данные позволили сформировать целевые значения оптимизационной задачи. Разработана общая методика построения цифровой модели основанной на использовании FMI-стандарта для обмена динамическими библиотеками. В работе показано практическое применение цифровой модели станка к решению задачи идентификации термодиформационной модели станка. Задача идентификации решалась в экстремальной постановке. Представлен анализ эффективности применения шести методов оптимизации: квазиньютоновский метод; поиск по шаблону; многоцелевой генетический алгоритм; метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; метод адаптивной многоцелевой оптимизации; метод адаптивной одноцелевой оптимизации. Предпочтительными по эффективности оказались методы частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования и адаптивной одноцелевой оптимизации. Их применение позволяет получить уточненные параметры модели с погрешностью достижения целевых значений моделирования менее 2 %.

Ключевые слова: цифровые двойники, цифровые модели, термодиформационная модель станка, методы оптимизации

Введение. В последнее время цифровые технологии и цифровые двойники (ЦД) приобретают особую значимость как при создании новой техники и новых производств, так и при поиске путей совершенствования существующего производства и выпускаемого высокотехнологичного оборудования [1–4]. Самыми значимыми примерами применения в России цифровых технологий является создание в Публичном акционерном обществе «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК») гражданского лайнера SSJ-100 и боевых самолетов Су-35 и Су-57 [1, 3], а также новые технологии проектирования авиационных двигателей АИ222-25, ТВ7-117СТ, ПД14 и ПД-8 [2, 4]. Проектировщики отмечают, что использование цифровых моделей позволило сократить разработку новейшей авиационной техники не только на месяцы, но и на годы. Так при создании двигателя ПД-14 использование ЦД позволило существенно сократить сроки его изготовления и получить серийный образец уже через 3,5 года [4]. Применение технологии ЦД привели к успешному завершению испытаний двигателя ПД-8. При этом в корпорации считают, что сокращение затрат на всех этапах разработки двигателя может составлять до 30 % [2].

Несмотря на то, что в настоящее время в России уже принят ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», все равно в научной литературе присутствуют или общие рассуждения на тему ЦД [4–9], или подмена понятий: цифровые двойники и модели; компьютерные и имитационные модели; математическое моделирование; жизненный цикл изделия [10–13]. При этом из-за того, что термин цифровых двойников набирает популярность на производстве, то и стоимость цифрового двойника как конечного продукта пропорционально растет его популярности. Однако реальных научных работ, которые бы дали методику создания цифрового двойника в отечественной литературе очень немного. Один из подходов к созданию цифровых двойников изложен в работах, выполненных под руководством профессора Кабалдина Ю.Г. [14–20]. В качестве базового математического аппарата используются искусственные нейронные сети. Их использование позволило показать методику создания цифровых двойников для различных объектов и процессов: процесса стружкообразования [14, 16], процесса 3D-печати электродуговой наплавкой [17, 18], режущего инструмента [14, 19], металлорежущего станка с ЧПУ [14, 20].

Более разнообразные подходы к созданию цифровых двойников представлены в зарубежной литературе [21–24].

Так в работе [21] наряду с нейросетевыми технологиями представлены конечно-элементные модели с использованием программного комплекса LS-Dyna, а также особый акцент сделан на вычислительных моделях процесса резания. В работе [22] предложена комплексная система оценки производительности электрошпинделя станка с ЧПУ, реализуемая с помощью цифрового двойника. Цифровой двойник реализован с использованием технологии мультидоменного физического моделирования. Анализ полученных результатов показал, что расхождения модельных и экспериментальных данных для температур и характеристик жесткости электрошпинделя не превысили 6 %. При этом представленная в работе модель шпинделя является одновременно многопараметрической, мультидоменной и многофункциональной. Однако из-за сложной шпиндельной системы станков с ЧПУ, включающей множество физических процессов, предложенная в работе модель не является полной, а в определенной степени упрощенной. Поэтому авторы сформулировали задачу усовершенствования модели за счет: уточнения функциональных характеристик шпинделя на основе более точных характеристик отдельных функциональных компонентов цифровой модели; учета влияния силы резания, внешней вибрации и других физических факторов, сопутствующих работе шпинделя.

В работе [23] предлагается набор цифровых систем моделирования и мониторинга станка, направленных на решение проблемы низкой скорости моделирования станка при оценке столкновения инструментов с узлами работающего станка. Сначала реконструируется физическая модель, а затем строится модель тел столкновения для инструментов и узлов станка. По сравнению с традиционным алгоритмом обнаружения столкновений, предлагаемый алгоритм обнаружения столкновений более точен для инструмента и обладает более высокой точностью обнаружения столкновений и резания заготовки. Используя этот метод, моделирование резания и обнаружение столкновений в G-коде может быть выполнено за 0,02 секунды, что не только повышает скорость моделирования, но и повышает точность обнаружения столкновений.

В работе [24] рассматривается архитектура ЦД станка с ЧПУ на основе мультидоменного физического моделирования. Изложен метод оценки применимости технологии цифрового двойника для станков с ЧПУ. Этот метод сначала анализирует предъявляемые к станку с ЧПУ тре-

бования с позиций использования в нем технологии ЦД. А затем исследуется оценка применимости технологии ЦД для станка с ЧПУ на основе оптимальной модели оценки, а также алгоритмов системного проектирования. Эта оценка определяется количественно.

В работе [25] также представлено построение цифрового двойника с использованием мультидоменного физического моделирования. В работе показано использование стратегии прогнозирования и диагностики неисправностей для фрезерного станка с ЧПУ; подробно описана цифровая модель привода подачи по оси X.

В работе [26] представлен метод разработки цифрового двойника интеллектуального станка с ЧПУ (ИМТ). Для сбора и обработки данных в режиме реального времени применена технология мультисенсорного слияния. Разработано несколько форм и приложений для визуализации и анализа данных в цифровом двойнике, включая траекторию обработки, состояние обработки и потребление энергии. Модель цифрового двойника ИМТ создается с целью дальнейшего анализа и оптимизации данных, таких как динамика станка, оценка ошибок контура и компенсация. Представлены примеры применения цифрового двойника ИМТ.

С позиций концептуального представления о цифровом моделировании и формирующихся терминах в этой области исследований следует отметить работы зарубежных и отечественных авторов [5, 8, 9]. Однако, учитывая, что ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» уже введен в действие с 16.09.2021 будем руководствоваться там принятыми терминами для «цифрового двойника изделия» и «цифровой модели изделия».

Методы, оборудование. Одной из проблем разработки цифровых двойников изделия является реализация компьютерных моделей, входящих в цифровую модель изделия, в режиме реального времени. При этом компьютерные модели реализуются в различных программных системах. Кроме этого, собственно, цифровой двойник изделия реализуется на некоторой программно-технологической платформе, оснащенной двусторонними информационными связями с изделием и его компонентами.

В последние годы стали появляться новые стандарты структурирования информации и хранения данных, которые из-за компактности компьютерного кода и высокого быстродействия его обработки позволяют эффективно решать задачи мультифизического моделирования в режиме реального времени. Например, FMI-стандарт [27] или Functional Mock-UP Interface (интерфейс

функционального макета) – бесплатный стандарт, который определяет обмен динамическими моделями с использованием комбинации XML-файлов, двоичных файлов и С-кода, распространяемых в виде архивного FMU-файла (Functional Mock-up Unit можно перевести как модуль функционального макета). FMI-стандарт поддерживается более чем 170 программными системами.

Экспериментальные натурные исследования проводились на двустороннем торцешлифовальном станке. Машинные эксперименты проводились на разных рабочих станциях на базе процессоров Intel Core i9 и i5, а также процессорах AMD Ryzen Threadripper 24-Core.

Ниже приведена методика разработки цифровой модели двустороннего торцешлифовального станка, построенной с использованием FMI-стандарта.

Основная часть. Структура модели термомодеформационной системы станка, генерирующая FMU-файл приведена на рис. 1.

Тепловая и термоупругая модели станка определяются условиями однозначности: геометрическими (Г), физическими (Ф) граничными (Гр) и начальными условиями (Н).

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [C^{tu}] & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\{u\}} \\ \dot{\{T\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^u] \\ [0] & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где $[C^{tu}]$ – матрица термоупругого затухания, размер $n \times m$; $[C^t]$ – матрица температурного затухания, размер $n \times n$; $\dot{\{u\}}$ – вектор скоростей изменения перемещений, длина m ; $\dot{\{T\}}$ – вектор скоростей изменения температур, длина n ; $[K^{tu}]$ – термоупругая составляющая матрицы жесткости, размер $m \times n$; $[K^t]$ – матрица теплопроводности, размер $n \times n$.

Система (1) представляет тепловую модель термомодеформационной системы станка, базируясь на законе сохранения энергии, в качестве решения имеет температурное поле. В качестве входных параметров рассматривается множество тепловых потоков, приложенных к различным внутренним и наружным поверхностям несущей системы станка или отводящих тепло в виде конвективного теплообмена. Множество входных параметров описывается следующим образом:

$$\Omega_{in}^1 = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_f; \alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_s\}, \quad (4)$$

В зависимости от вида решаемой задачи термоупругости – связанной и несвязанной, по-разному представляется термоупругая модель.

Для несвязанной задачи термоупругости термоупругая модель, базируясь на решении задачи статики о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле, описывается системой уравнений вида:

$$[C]\{\dot{T}\} + [H]\{T\} = \{Q\}, \quad (1)$$

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $[C]$ – матрица теплоёмкости, размер $n \times n$; $[H]$ – матрица теплопроводности, размер $n \times n$; $[K]$ – матрица жёсткости, размер $m \times m$; $\{\delta\}$ – вектор перемещений, длина m ; $\{Q\}$, $\{F\}$ – векторы узловых тепловой и механической нагрузок, каждый длиной n и m , соответственно; n – число узлов расчетной схемы.

Для связанной задачи термоупругости уравнения (1) и (2) решаются совместно:

где q_i – тепловой поток, Вт, или плотность теплового потока, Вт/м², i -ой поверхности; α_j – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К), для j -ой поверхности; f, s – число поверхностей подвода и отвода тепла.

Ниже в машинных экспериментах в качестве искомым параметров q_i рассматривались тепловые потоки. В качестве множества выходных параметров рассматривается совокупность показаний виртуальных датчиков температуры:

$$\Omega_{out}^1 = \{T_1, \dots, T_i, \dots, T_p\}, \quad (5)$$

где p – число поверхностей температурных датчиков.

При решении несвязанной задачи термоупругости система (2) фактически описывает задачу статики, но на холостом ходу работы станка используется только тепловая нагрузка, обусловленная сформировавшимся в несущей системе станка температурным полем. Поэтому для системы (2) множество входных параметров совпадает с множеством выходных параметров (5) си-

стемы (1). В качестве выходных параметров рассматриваются только абсолютные и относительные температурные перемещения отдельных элементов несущей системы станка:

$$\Omega_{out}^2 = \{\delta T_1, \dots, \Delta T_j, \dots, \delta T_b, \Delta T_c\}, \quad (6)$$

где $\delta T_i, \Delta T_i$ – абсолютные и относительные температурные перемещения; b – число датчиков измерения абсолютных температурных перемещений; c – количество данных относительных температурных перемещений.

Относительные перемещения являются зависимыми переменными, так как они получаются расчетным путем из геометрических построений.

Решение задачи термоупругости в виде систем (1)–(3) для любого уровня сложности конструкций в настоящее время просто решается во многих коммерческих CAE-системах (Ansys, Creo, Siemens NX, Comsol Multiphysics, Inventor и других). Однако выбор Workbench Ansys обусловлен тем, что данная система имеет инструментальные средства, позволяющие легко создать FMU-файл, который затем может передан в Ansys Twin Builder для последующей обработки.

Если последовательность решения задачи термоупругости понятна и выше ясно описана, то формирование FMU-файла требует отдельного пояснения. Для формирования FMU-файла используется технология Ansys Design Explorer, которая позволяет построить поверхность отклика, на основании которой формируется FMU-файл:

1. формируется геометрическая модель исследуемого объекта в векторном формате, например, с использованием любой CAD-системы;

2. затем создаётся проект в Ansys Workbench, в котором импортируется геометрическая модель и задаются физические условия;

3. этот этап, в зависимости от выбранного типа решения задачи термоупругости, реализуется двумя способами:

- 3.1 если выбирается решение несвязанной задачи термоупругости, то сначала строится тепловая модель с учётом граничных и начальных условий и выполняется расчёт; тепловые потоки и конвективный теплообмен (в виде коэффициентов теплоотдачи) для отдельных поверхностей геометрической модели задаются некоторыми фиксированными значениями, в виде параметров модели (в Workbench предусматривается символ «р»); в разделе «Solution» дерева проекта задается размещение температурных датчиков, их значения тоже заносятся в параметры модели; с учётом данных температур, которые выступают в качестве тепловой нагрузки, строится упруго-

деформационная модель и выполняется её расчёт; также в разделе «Solution» дерева проекта задается размещение датчиков перемещений, их значения тоже заносятся в параметры модели;

- 3.2 если решается связанная задача термоупругости, то создаваемый проект на базе системы анализа Coupled Field предусматривает одновременное задание граничных условий для единой термоупругой модели в виде тепловых потоков и конвективного теплообмена, а также параметров механического закрепления геометрической модели; в этом случае температурное поле и поле деформаций являются результатами расчёта единой термоупругой модели, поэтому показания температурных датчиков и датчиков перемещений одновременно задаются в качестве параметров модели в разделе «Solution» дерева проекта;

4. после того как сформировано множество параметров модели из раздела Design Exploration, выбирается инструмент для построения поверхности отклика Response Surface; по умолчанию, при построении поверхности отклика, для каждого проектного параметра (Design Variable – в терминах Ansys Workbench) задаётся область изменения в пределах +/- 10 % от заданного начального значения параметра; после построения поверхности отклика формируется FMU-файл.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 построенная термоупругая модель должна пройти верификацию и валидацию. Верификация модели заключается в подтверждении корректности её решения. Учитывая, что используется лицензионный коммерческий продукт, то на корректность решения задачи термоупругости решающую роль оказывают геометрические и физические условия. Поэтому, выполнив анализ полученных различных решений, с характерным изменением входных параметров, можно оценить корректность модели. А вот для того, чтобы выполнить валидацию модели, необходимо использовать экспериментальные данные.

На рис. 1 представлена последовательность формирования FMU-файла при решении несвязанной задачи термоупругости.

При решении связанной задачи термоупругости последовательность формирования FMU-файла принципиально не меняется. Отличие будет строиться на исключении всех блоков модели, связанных с тепловой моделью.

Одним из этапов процедуры валидации модели является процедура идентификации модели [28]. Решение задачи идентификации в экстремальной постановке является одним из наиболее просто реализуемых способов применения компьютерных моделей в Ansys Twin Builder. Струк-

тура такой компьютерной модели термомодеформационной системы станка с использованием FMU-файла приведена на рис. 2.

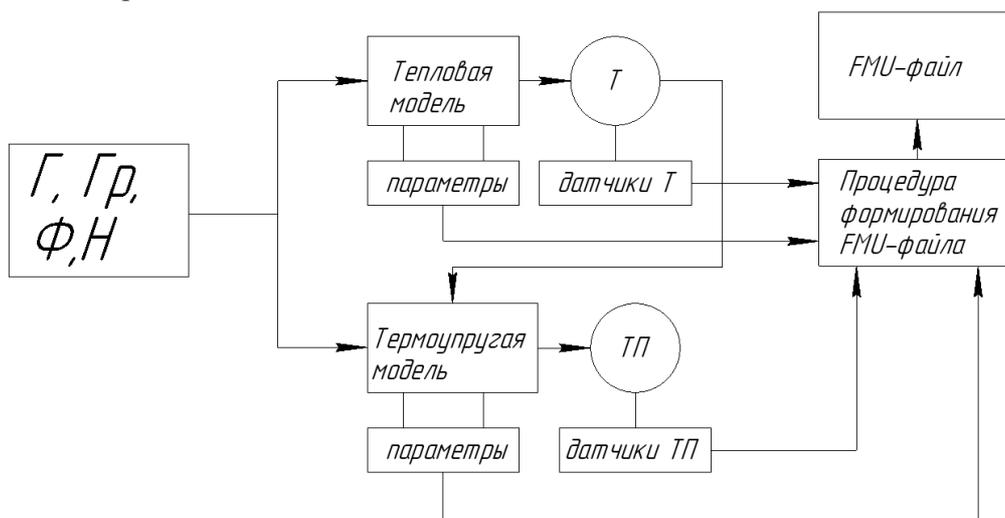


Рис. 1. Последовательность формирования FMU-файла:
Т – температура; ТП – температурные перемещения

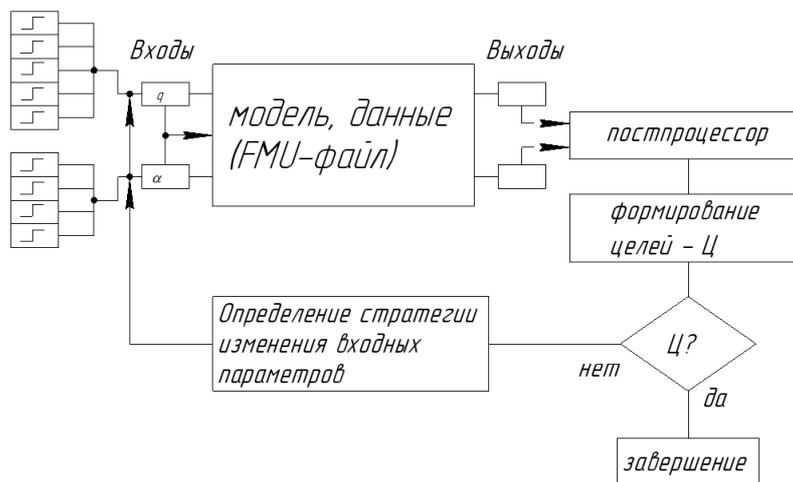


Рис. 2. Структура компьютерной модели термомодеформационной системы станка с использованием FMU-файла

Пример построения цифровой модели двустороннего торцевшлифовального станка в Ansys.

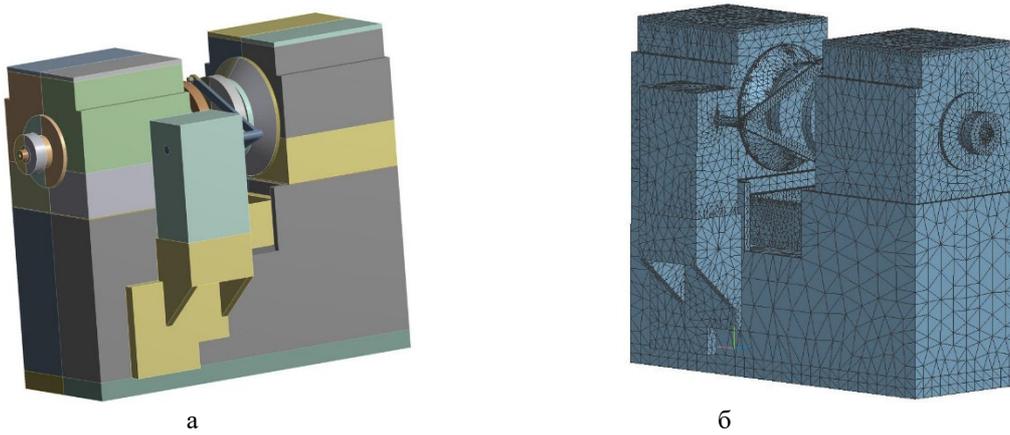
1 этап – формирование fmu-модели. Для этого: формируется геометрическая модель несущей системы станка в Компас 3D и экспортируется в Ansys Workbench, где формируется сеточная модель (рис. 3), задаются физические и начальные условия; в зависимости от особенностей моделируемого теплового процесса (холостой или рабочий ход станка) задаются граничные условия; формируется множество входных и выходных параметров; выполняется базовый расчёт; формируется поверхность отклика с использованием инструментов раздела Design Exploration в Ansys Workbench; схемы проектов формирования fmu-моделей для двух постановок задачи термоупругости (несвязанная и связанная) представлены на рис. 4.

2 этап – создание проекта в Ansys Twin Builder. Для этого сначала загружается fmu-модель, что приведет к появлению изображения поверхности с открытыми входами и выходами; затем в проект добавляются ступенчатые функции Step для каждого входа, вида:

$$H(x) = \begin{cases} h, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где h – это значения входных параметров.

Особенностью является то, что только до запуска процедуры оптимизации значения входных параметров принимают некоторые начальные значения, например, из базовой термоупругой модели, сформированной в Ansys Workbench. Затем эти значения становятся оптимизируемыми параметрами и для них назначают параметрические ограничения.



а б
Рис. 3. Геометрическая и сеточная модели несущей системы станка

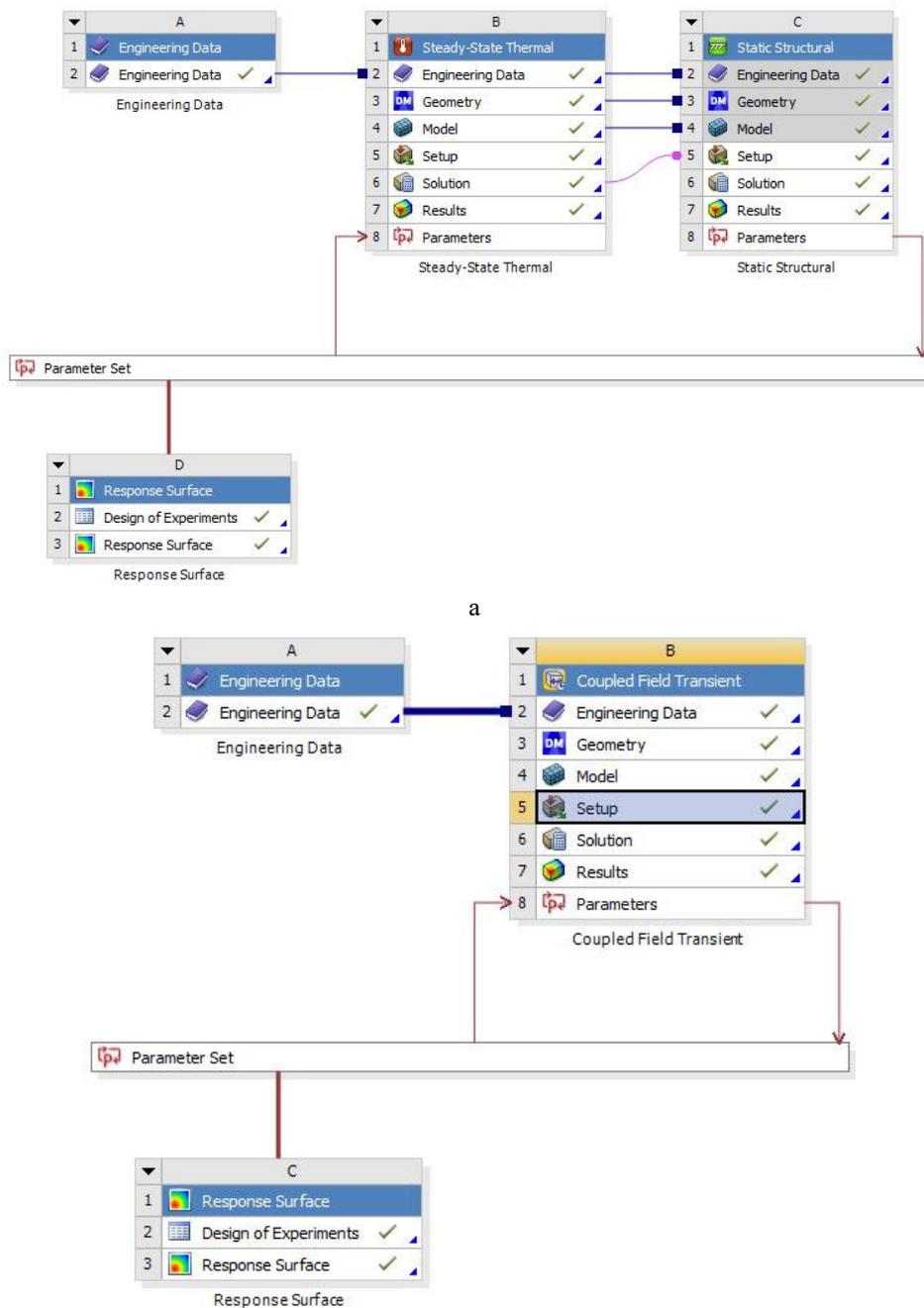


Рис. 4. Схемы проектов формирования fmu-моделей в Workbench для двух постановок задачи термоупругости: а – несвязанная; б – связанная

Особенностью использования этой модели является то, что её можно использовать как альтернативу для модели, реализованной в Workbench. При этом время моделирования существенно меньше. Этот способ использования модели позволяет получить экспресс-оценки влияния каждого входного параметра. Что позволяет более точно назначить параметрические ограничения.

3 этап – постановка задачи оптимизации.

На этом этапе вводятся дополнительные зависимые переменные, которые впоследствии используются в качестве целей или критериев оптимизации (идентификации) или в качестве критериальных ограничений. Данные зависимые переменные для каждой задачи задаются индивидуально. Формально они впоследствии участвуют в качестве целей для температур или для температурных перемещений. На рис. 5 эти зависимые переменные сведены в блок EQU. Здесь множество входных параметров: P121, ..., P129, а множество выходных параметров: P110, ..., P120 и P130, P131.

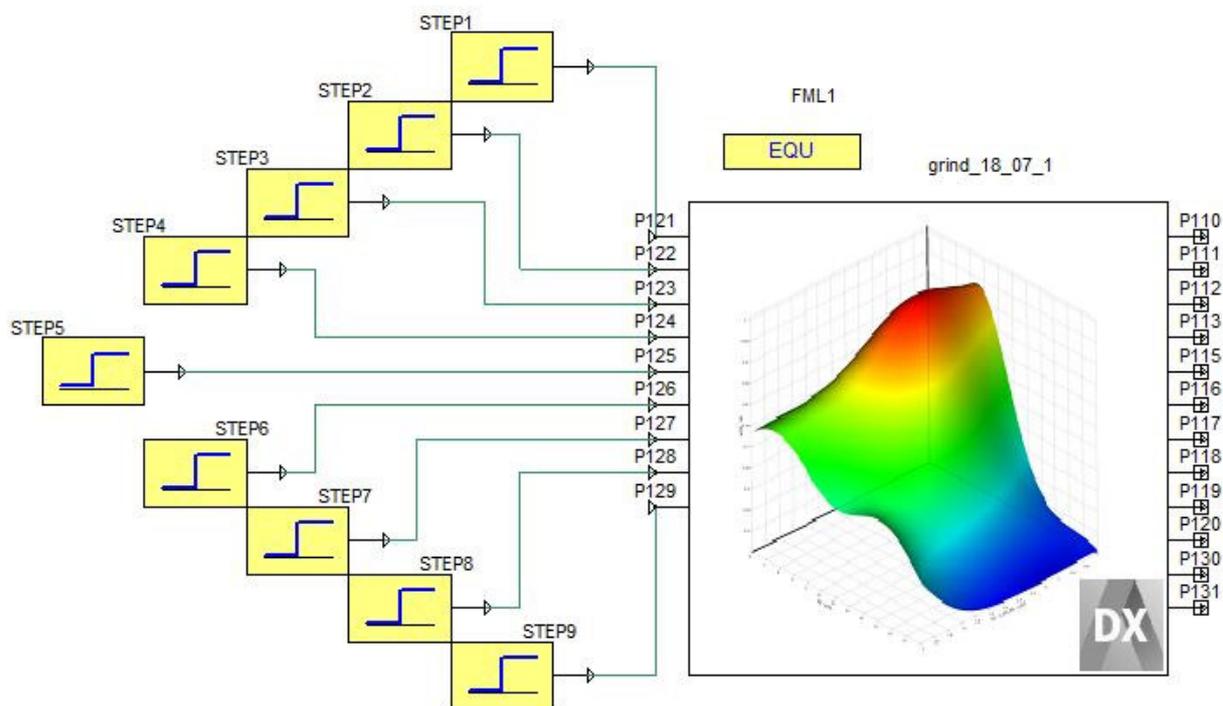


Рис. 5. Фрагмент проекта в Ansys Twin Builder

Это даёт возможность составить соотношения, которые в дальнейшем будут использоваться при задании целевой функции и других критериальных ограничениях:

$$\Delta_L = \delta'_{L,u} - \delta'_{L,d}; \quad \Delta_r = \delta'_{r,u} - \delta'_{r,d}, \quad (8)$$

$$\delta'_{L,u} = \delta_{L,u} - \delta_{rch,u}; \quad \delta'_{L,d} = \delta_{L,d} - \delta_{rch,d}, \quad (9)$$

$$\delta'_{r,u} = \delta_{r,u} - \delta_{rch,u}; \quad \delta'_{r,d} = \delta_{r,d} - \delta_{rch,d}, \quad (10)$$

При проведении идентификации термоупругой модели станка необходимо выбрать параметры, которые могут быть непосредственно или измерены в ходе эксперимента или получены в результате аналитических вычислений по имеющимся экспериментальным данным.

Экспериментальные исследования данной компоновки станка показали, что критическим для точности обработки является взаимное положение диска подачи и абразивного инструмента, возникающее из-за роста тепловых деформаций несущей системы станка. При этом наибольшее влияние на точность обработки оказывают перемещения в плоскости, проходящей через оси обоих шпиндельных узлов перпендикулярно станине [29]. Для оценки тепловых деформаций станка использовалась ранее апробированная в натурных испытаниях конструктивная схема установки датчиков, которая нашла отражение в геометрической модели станка в виде двух рычагов (рис. 3).

где Δ_L – смещения фланца левого шпинделя; Δ_r – смещения фланца правого шпинделя; $\delta'_{L,u}$ – смещения верхней точки фланца левого шпинделя относительно центральной точки цилиндра верхнего рычага (центральные точки цилиндра – это узлы расчетной модели, расположенные в центре основания цилиндра, обращен-

ного к фланцу шпинделя); $\delta'_{L,d}$ – смещения нижней точки фланца левого шпинделя относительно центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta'_{r,u}$ – смещения верхней точки фланца правого шпинделя относительно центральной точки цилиндра верхнего рычага; $\delta'_{r,d}$ – смещения нижней точки фланца правого шпинделя относительно центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta_{L,u}$ – абсолютное смещение верхней точки фланца левого шпинделя; $\delta_{rch,u}$ – абсолютное смещение центральной точки цилиндра верхнего рычага; $\delta_{L,d}$ – абсолютное смещение нижней точки фланца левого шпинделя; $\delta_{rch,d}$ – абсолютное смещение центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta_{r,u}$ – абсолютное смещение верхней точки фланца правого шпинделя; $\delta_{r,d}$ – абсолютное смещение нижней точки фланца правого шпинделя.

Имеющийся набор экспериментальных данных и специфика поставленной задачи идентификации позволяют решать её как задачу многоцелевой оптимизации. Для этого формируются

$$\Psi_i(u) = \left| \hat{T}_i(u) - T_i \right|, i = \overline{1,6} \text{ и } \Psi_7(u) = \left| \Delta_L(u) - D_1 \right|, \Psi_8(u) = \left| \Delta_r(u) - D_2 \right|, \quad (13)$$

где $\hat{T}_i(u)$ – модельные значения температур выбранной области геометрической модели; $\Delta_L(u), \Delta_r(u)$ – модельные значения относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя, соответственно.

$$\Psi_i(u) \leq \varepsilon_T, i = \overline{1,6} \text{ и } \Psi_7(u) \leq \varepsilon_\delta, \Psi_8(u) \leq \varepsilon_\delta. \quad (14)$$

Множество допустимых значений вектора параметров сужается из-за параметрических ограничений:

$$P = \{u : u_{id} \leq u_i \leq u_{iup}, i = \overline{1,9}\}, \quad (15)$$

где u_i –й аргумент; u_{id}, u_{iup} – нижняя и верхняя границы ограничений для аргумента; 9 – число

$$G = \{u : g_j(u) \leq 0; j = \overline{1,k}; g_j(u) \geq 0; j = \overline{r+1,z}\}, \quad (16)$$

где k, z – целочисленные значения; $g_j(u)$ – известные функции, позволяющие составить ограничения.

цели, критериальные ограничения и параметрические ограничения.

В качестве целей принимают две группы целей: температуры в шести точках несущей системы станка и относительные температурные смещения торцов фланцев левого и правого шпинделей. Значения температур и относительных температурных смещений были определены из натуральных экспериментов. Тогда вектор целей J примет вид:

$$J = \{J_i = T_i, i = \overline{1,6}, J_7 = D_1, J_8 = D_2\}, \quad (11)$$

где T_i – это экспериментальные значения температуры в фиксированных точках несущей системы станка; D_1, D_2 – экспериментальные значения относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя соответственно.

В общем виде вектор-функция целевых функционалов имеет вид:

$$\Psi(u) = (\Psi_1(u), \dots, \Psi_8(u)), \quad (12)$$

где $u \in R^m - m$ - мерный вектор входных параметров модели.

Для рассматриваемой задачи функционалы $\Psi_i(u)$ можно представить в виде:

Если выбрать некоторые значение погрешностей ε_T и ε_δ , то можно составить критериальные ограничения вида:

входных параметров 9 (в конкретной рассматриваемой задаче).

Несмотря на то, что при решении рассматриваемой задачи не требовалось задание функциональных ограничений, но для полноты представления модели представим их в общем виде:

Пересечение множеств P и G формирует новое множество допустимых значений вектора параметров $D = P \cap G$.

Таким образом, окончательно задача многоцелевой оптимизации при соблюдении критериальных ограничений (14) будет формулироваться следующим образом:

$$\min_{u \in D} \Psi(u) = \Psi(u^\circ), \quad (17)$$

где u° – вектор оптимальных значений параметров или координаты точки минимума для множества D .

4 этап – выбор метода оптимизации. На практике на выбор метода оптимизации влияют три основных фактора: особенность постановки задачи оптимизации, особенности собственно методов оптимизации и наличие готовой реализации метода оптимизации.

Был проведен анализ эффективности некоторых методов, реализованных в Ansys Twin Builder: квазиньютоновский метод оптимизации; поиск по шаблону; многоцелевой генетический алгоритм; метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; метод адаптивной многоцелевой оптимизации; метод адаптивной одноцелевой оптимизации.

Предварительно для всех выбранных методов оптимизации были проведены вычислительные эксперименты для большого числа итераций,

когда главным критерием выбора числа итераций являлась погрешность моделирования. Все методы оптимизации позволили обеспечить достаточную точность моделирования с погрешностью менее 5%. Однако для получения более характерных результатов было принято решение для всех методов назначить одинаковое число итераций и мониторить: погрешность моделирования и длительность вычислений. Для получения большей наглядности были выбраны три диапазона числа итераций 55, 80 и 100. Выбор минимального числа итераций, равного 55, является минимальным пороговым значением для некоторых методов оптимизации.

На рис. 6 приведены оптимальные решения в виде лепестковых диаграмм для всех выбранных методов оптимизации. Эти диаграммы позволяют наглядно оценить характер распределения решений в зависимости от используемого метода оптимизации. На рис. 7 приведены гистограммы параметров моделирования в зависимости от числа итераций. Первые четыре триады – это погрешность моделирования для четырех целей, в том числе для относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя, а также для температур поддона и торцевых поверхностей шкивов ремённых передач. Последняя триада показывает вычислительные затраты – время в секундах.

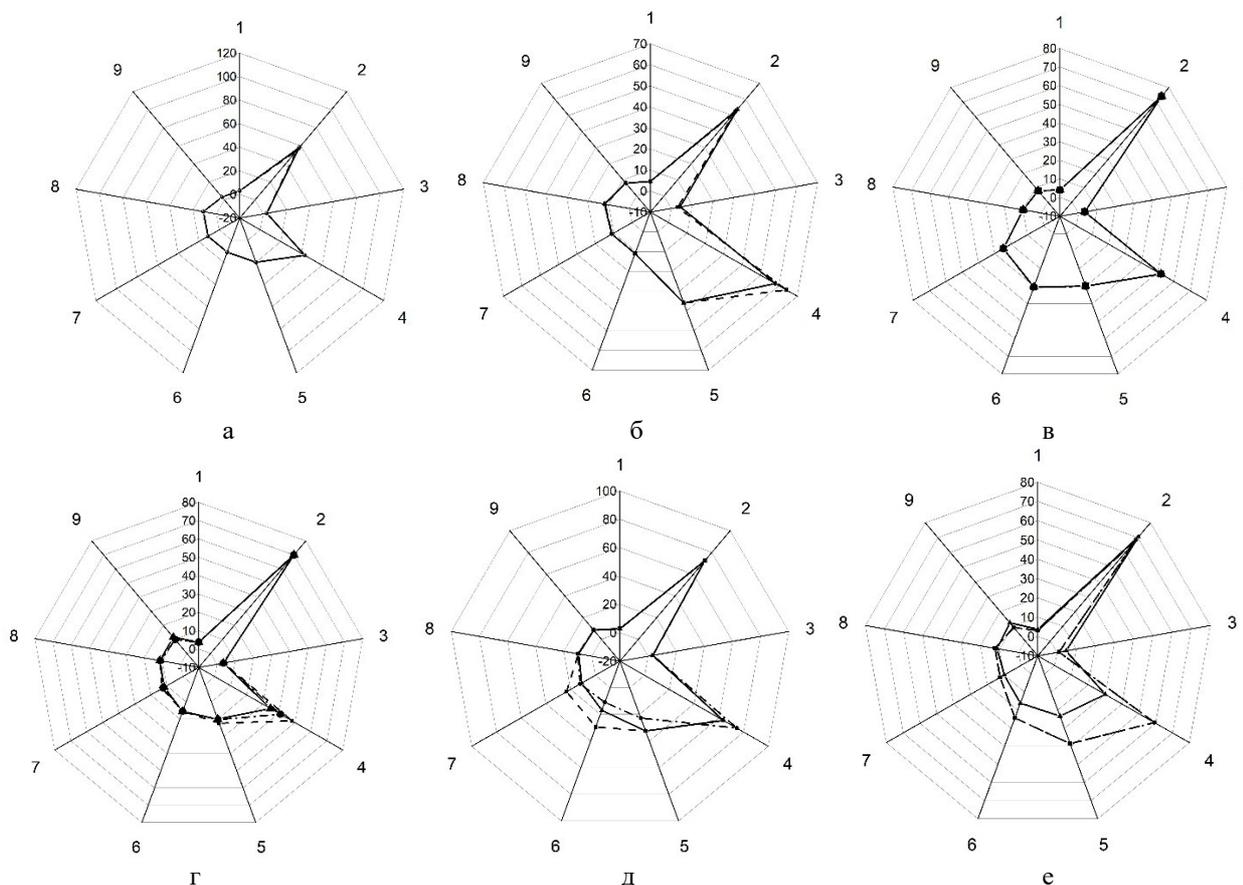


Рис. 6. Лепестковые диаграммы оптимальных решений:

а – квазиньютоновский метод; б – поиск по шаблону; в – многоцелевой генетический алгоритм;
 г – метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования;
 д – адаптивная многоцелевая оптимизация; е – адаптивная одноцелевая оптимизация

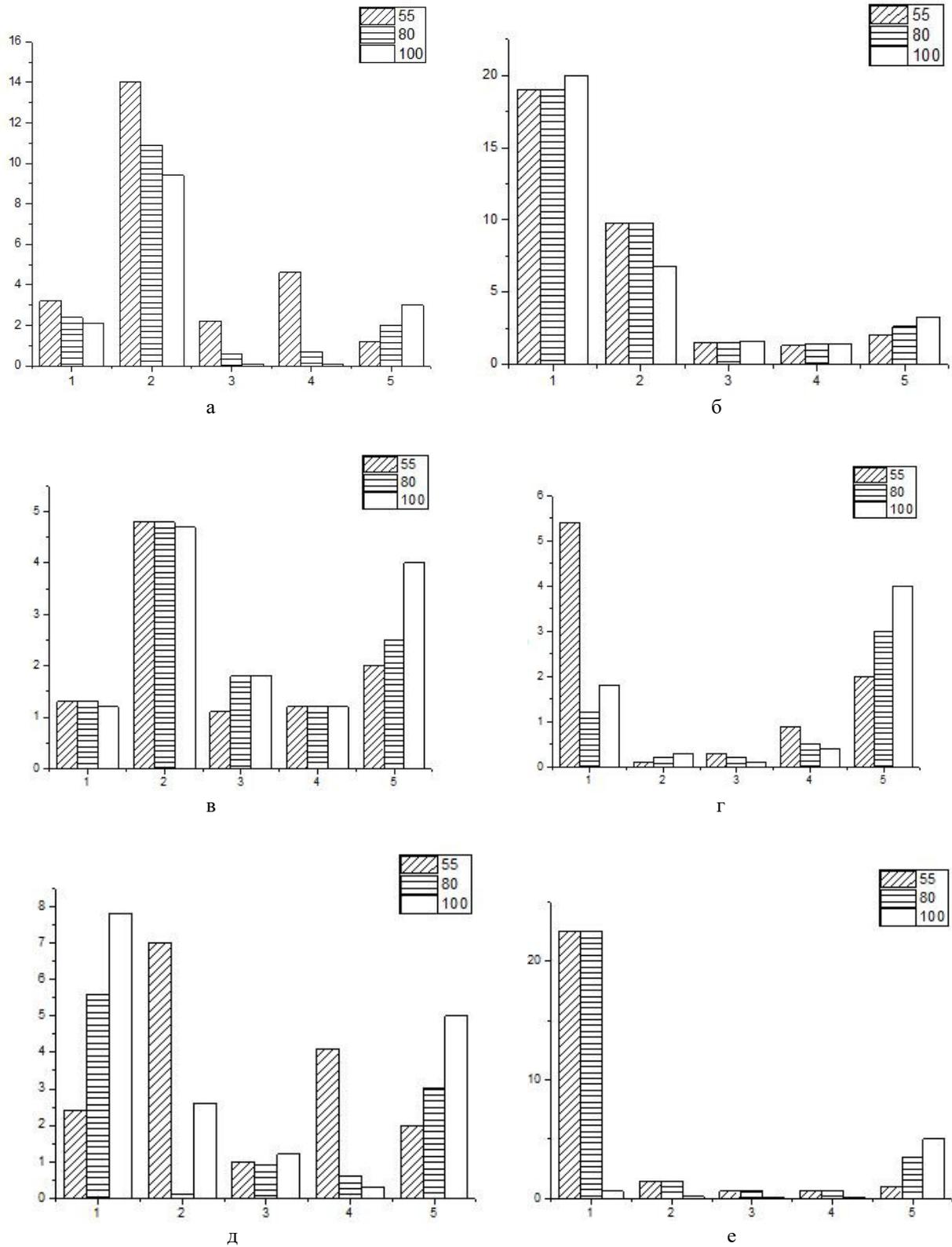


Рис. 7. Гистограммы параметров моделирования в зависимости от числа итераций:
 а – квазиньютоновский метод; б – поиск по шаблону; в – многоцелевой генетический алгоритм;
 г – метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования;
 д – адаптивная многоцелевая оптимизация; е – адаптивная одноцелевая оптимизация

В таблице 1 в качестве искоемых переменных (при решении задачи оптимизации) рассматриваются входные параметры модели для тепловых потоков, заданных на различных поверхностях геометрической модели станка. Нумерация первого столбца таблицы соответствует номерам переменных лепестковой диаграммы. Второй столбец содержит описание поверхностей, для которых заданы тепловые потоки. В общем случае можно было бы число искоемых переменных увеличить за счет коэффициентов теплоотдачи, задаваемых на поверхностях геометрической модели с конвективным теплообменом, но это существенно увеличивает вычислительные затраты на этапе формирования *fin*-файла. При проектировании расчётной модели станка передние и задние опоры шпиндельных узлов станка представлялись в виде двух цилиндров, с габаритными размерами подшипников, установленных в передних и задних опорах. Поэтому в параметрах с

4 по 7 используется термин «кольцо». Третий столбец содержит начальные значения входных параметров, а в четвертом и пятом столбцах приведены лучшие варианты оптимальных решений из анализа погрешности моделирования, приведенных на рис. 7.

Анализ полученных решений (рис. 7) показал, что при выборе относительно небольшого числа итераций наибольшую эффективность имеют методы адаптивной одноцелевой оптимизации и частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования. Для метода адаптивной одноцелевой оптимизации максимальная погрешность моделирования не превысила 1 %, а для метода частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования – не более 2 %. Вычислительные затраты по времени для второго метода оказались на 25 % меньше.

Таблица 1

Описание входных параметров

№ п/п входного параметра	Положение поверхности для теплового потока	Начальное значение, Вт	Решение для варианта «г» (оптимальное значение), Вт	Решение для варианта «е» (оптимальное значение), Вт
1	2	3	4	5
1	Поддон для сбора СОЖ	25	3,7	3,7
2	Внутренняя торцевая поверхность нижней части корпуса шпиндельной бабки	5	70,1	70,4
3	Фланцы шпинделей	25	3,5	4,7
4	Поверхность внутреннего кольца передней опоры	120	34,8	30
5	Поверхность наружного кольца передней опоры	80	20	23,3
6	Поверхность внутреннего кольца задней опоры	40	15,7	16,2
7	Поверхность наружного кольца задней опоры	20	11,6	10
8	Наружные поверхности рычага, на котором установлены два пневматических датчика перемещений	7	11,4	11,2
9	Торцевые поверхности шкивов ременных передач	4	11,4	12,4

Выводы.

1. Представлена методика построения цифровой модели станка с использованием FMI-стандарта на платформах Ansys Workbench и Ansys Twin Builder. Построенная цифровая модель показала эффективность решения задачи идентификации термоупругой модели. Представлены оптимальные решения для базовой термоупругой модели станка, построенной на решении нестационарной задачи термоупругости в связанной

постановке. При решении задачи идентификации в экстремальной постановке была обеспечена погрешность моделирования менее 1 %.

2. Проведен анализ эффективности шести методов оптимизации: квазиньютоновского метода; поиска по шаблону; многоцелевого генетического алгоритма; г) метода частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; д) метода адаптивной многоце-

левой оптимизации; е) метода адаптивной одноцелевой оптимизации. Наибольшую точность моделирования позволил обеспечить метод адаптивной одноцелевой оптимизации. При возможности допущения чуть меньшей точности моделирования, но с меньшими временными затратами следует отдавать предпочтение методу частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие технологии цифровых двойников в ОДК // Режим доступа: <https://www.aviaport.ru/digest/2021/12/16/702483.html?ysclid=legxvrx5rx159670883>.
2. ОДК внедряет технологию цифрового двойника в разработку газотурбинных двигателей // Режим доступа: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryaet-tekhnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinykh-dvigatelye/>.
3. «Цифровой двойник» двигателя Су-57. Ростех внедряет технологию виртуального моделирования // Режим доступа: <https://naukatehnika.com/cifrovoj-dvojnik-dvigatelya-su-57.html?ysclid=lehbu04mss202753555>.
4. Gönninger P., Hillenbrand J., Betz-Mors T., Bischof P., Mohr L., Fleischer J. Auto-configuration of a digital twin for machine tools by intelligent crawling // In: Wulfsberg J.P., Hintze W., Behrens B.A. (eds) *Production at the leading edge of technology*. 2019. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_54.
5. Surjya Kanta Pal, Debasish Mishra, Arpan Pal, Samik Dutta, Debashish Chakravarty, Srikanta Pal. *Digital Twin – Fundamental Concepts to Applications in Advanced Manufacturing*. Springer Cham. 2022. 465 p. DOI: 10.1007/978-3-030-81815-9
6. Рудской А.И. Цифровая промышленность на основе цифровых двойников // Приборы. 2021. № 3 (249). С. 9–16.
7. Тихонов А.И., Сазонов А.А., Кузьмина-Мерлино И. Цифровое производство и искусственный интеллект в авиастроении // СТИН. 2022. № 2. С. 38–43.
8. Armendia M., Ghassempouri M., Ozturk E., Peysson F. *Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle*. Springer. 2019. 296 p. DOI: 10.1007/978-3-030-02203-7.
9. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531
10. Лесковец И.В. Цифровой двойник рабочего оборудования бульдозера // *Global Journal of Researches in Engineering*. 2020. Т. 20. № 4-J. С. 3.
11. Kul'ga K.S., Siluyanova M.V., Krivosheev I.A., Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N., Valiev A.A. *Digital Twins of CNC Machine Tools in the Reconfiguring of Aircraft Factories* // *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. Pp. 715–720. DOI: 10.3103/S1068798X22070188
12. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 4. С. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
13. Трефилов С.А., Лecomцев П.В., Никитин Ю.Р. Цифровой двойник мехатронного устройства на основе алгоритма прогнозирования по малым обучающим выборкам // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2020. № 3 (11). С. 39–49.
14. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. Ю.Г. Кабалдина, Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. 2018. 271 с.
15. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Аносов М.С., Колчин П.В. Цифровой двойник оборудования как основа для потребителя в условиях цифрового производства // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 9. С. 394–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402
16. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М. Цифровой двойник процесса стружкообразования // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 81–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-11-81-8
17. Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Галкин А.А., Ключкова Н.С. Разработка цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием методов машинного обучения и численного моделирования // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67–2. С. 55–62. DOI: 10.18411/lj-11-2020-57
18. Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Чурсин А.А. Цифровой двойник 3D-печати на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 47–49.
19. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Известия высших учебных

заведений. *Машиностроение*. 2019. № 4 (709). С. 11–17. DOI:10.18411/lj-12-2018-177

20. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2019. Т. 19. № 1. С. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55

21. Ostasevicius V. *Digital Twins in Manufacturing. Virtual and Physical Twins for Advanced Manufacturing*. Springer. 2022. 365 p. doi.org/10.1007/978-3-030-98275-1

22. Xue R., Zhou X., Huang Z., Zhang F., Tao F., Wang J. Digital twin-driven CNC spindle performance assessment // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 1821–1833. DOI:10.1007/s00170-021-08403-6

23. Guo M., Fang X., Hu Z., Li Q. Design and research of digital twin machine tool simulation and monitoring system // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. Pp. 4253–4268. DOI:10.1007/s00170-022-09613-2

24. Wei Y., Hu T., Wei S., Ma S., Wang Y. Digital twin technology applicability evaluation method for CNC machine tool // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. Pp. 5607–5623. DOI:10.1007/s00170-022-10050-4

25. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using

strategy // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. Vol. 10. Pp. 1129–1140. DOI:10.1007/s12652-018-0946-5

26. Tong X., Liu Q., Pi S., Xiao Y. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31. Pp. 1113–1132. DOI: 10.1007/s10845-019-01500-0

27. Modelica Association. Functional mock-up interface for model exchange and co-simulation. Functional mock-up interface 2.0.2., Режим доступа: <https://fmi-standard.org/>.

28. Поляков А.Н. Идентификация термодинамической системы координатно-расточного станка // *Технология машиностроения*. 2003. №4. С. 12–19.

29. Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцешлифовального станка // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 11. С. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

30. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization: Second Edition*. Springer. 2005. 323 p.

31. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science: Advances in Geographic Information Science*. Springer. 2015. 335 p.

32. Штойер Р. *Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения*. М.: Радио и связь. 1992. 504 с.

Информация об авторах

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Никитина Инна Петровна, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Позевалкин Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной информатики в экономике и управлении. E-mail: vorgpost1@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 15.08.2024 г.

© Поляков А.Н., Никитина И.П., Позевалкин В.В., 2024

*Polyakov A.N., *Nikitina I.P., Pozevalkin V.V.*

Orenburg state University

**E-mail: innanikitina@list.ru*

CREATION OF A DIGITAL MODEL OF THE MACHINE TOOL THERMAL DEFORMATION SYSTEM

Abstract. *The paper presents a methodology for building a digital model of the thermo-deformation system of a machine tool used in the creation of digital twins of machine tools for which their thermoelastic behavior is relevant, based on the solution of the thermoelasticity problem. Ansys Workbench and Ansys Twin Builder platforms are used as special software that allows you to create a digital model. A double-sided face*

grinding machine was used as an object of modeling, for which experimental studies were conducted earlier. The experimental data allowed us to form the target values of the optimization problem. A general methodology for building a digital model based on the use of the FMI standard for the exchange of dynamic libraries has been developed. The paper shows the practical application of the digital model of the machine tool to solve the problem of identification of the thermo-deformation model of the machine tool. The identification problem was solved in an extremal formulation. The analysis of the effectiveness of the use of six optimization methods is presented: the Quasi-Newton method; Pattern search; Multi-Objective Genetic Algorithm; Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming; Adaptive Multiple-Objective; Adaptive Single-Objective. The methods of Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming and Adaptive single-Objective were preferred in terms of efficiency. Their application allows to obtain the refined parameters of the model with the error of achieving the target values of modeling less than 2 %.

Keywords: Digital Twins, Digital models, the thermo-deformation model of the machine tool, optimization methods

REFERENCES

1. Development of digital twin technology in UEC. Access mode: <https://www.aviaport.ru/digest/2021/12/16/702483.html?ysclid=legxvrx5rx159670883>. (rus)
2. UEC introduces digital twin technology in gas turbine engine development. Access mode: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryaet-tekhnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinnikh-dvigatelay/>. (rus)
3. «Digital Twin» of Su-57 Engine. Rostec Introduces Virtual Modeling Technology. Access mode: <https://naukatehnika.com/cifrovoy-dvoynik-dvigatelya-su-57.html?ysclid=lehbu04mss202753555>. (rus)
4. Gönninger P., Hillenbrand J., Betz-Mors T., Bischof P., Mohr L., Fleischer J. Auto-configuration of a digital twin for machine tools by intelligent crawling. In: Wulfsberg J.P., Hintze W., Behrens B.A. (eds) Production at the leading edge of technology. 2019. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_54
5. Surjya Kanta Pal, Debashish Mishra, Arpan Pal, Samik Dutta, Debashish Chakravarty, Srikanta Pal. Digital Twin – Fundamental Concepts to Applications in Advanced Manufacturing. Springer Cham. 2022. 465 p. DOI: 10.1007/978-3-030-81815-9
6. Rudskoj A.I. Digital Industry Based on Digital Twins [Tsifrovaya promyshlennost na osnove tsifrovyykh dvoynikov]. Pribory. 2021. No. 3 (249). Pp. 9–16. (rus)
7. Tikhonov A.I., Sazonov A.A., Kuzmina-Merlino I. Digital Manufacturing and Artificial Intelligence in Aviation [Tsifrovoe proizvodstvo i iskusstvennyj intellekt v aviastroenii]. STIN. 2022. No. 2. Pp. 38–43. (rus)
8. Mikel Armendia, Mani Ghassempouri, Erdem Ozturk, Flavien Peysson. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle. Springer. 2019. 296 p. DOI: 10.1007/978-3-030-02203-7
9. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, Use Cases [Tsifrovye dvoyniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsenarii ispolzovaniya]. Izvestiya vuzov. Priborostroenie. 2021. Vol. 64. No. 7. Pp. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (rus)
10. Leskovets I.V. Digital twin of a bulldozer's working equipment [Tsifrovoy dvoynik rabochego oborudovaniya buldozera]. Global Journal of Researches in Engineering. 2020. Vol. 20. No. 4-J. P. 3. (rus)
11. Kul'ga K.S., Siluyanova M.V., Krivosheev I.A., Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N., Valiev A.A. Digital Twins of CNC Machine Tools in the Reconfiguring of Aircraft Factories. Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42. Pp. 715–720. DOI: 10.3103/S1068798X22070188
12. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin of the shaping of the machined surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile during cylindrical plunge grinding [Tsifrovoy dvoynik formoobrazovaniya obrabatyvaemoj poverkhnosti nezhestkogo vala s ellipsnym profilom pri kruglom vreznom shlifovanii]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova]. 2021. Vol. 19. No. 4. Pp. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106. (rus)
13. Trefilov S.A., Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R. Digital twin of a mechatronic device based on a prediction algorithm using small training samples [Tsifrovoy dvoynik mekhatronnogo ustrojstva na osnove algoritma prognozirovaniya po malym obuchayushchim vyborkam]. Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii. 2020. No. 3 (11). Pp. 39–49. (rus)
14. Artificial Intelligence and Cyber-Physical Machining Systems in Digital Manufacturing: Monograph. Edited by Yu.G. Kabaldin. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev. 2018. 271 p. (rus)

15. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M., Anosov M.S., Kolchin P.V. Digital twin of equipment as a basis for the consumer in the context of digital production [Tsifrovoy dvojn timer oborudovaniya kak osnova dlya potrebitelya v usloviyakh tsifrovogo proizvodstva]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2020. Vol. 74. No. 9. Pp. 394–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402. (rus)
16. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. Digital twin of the chip formation process [Tsifrovoy dvojn timer protsessa struzhkoobrazovaniya]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020. No. 11. Pp. 81–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-11-81-8. (rus)
17. Shatagin D.A., Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Galkin A.A., Klochkova N.S. Development of a digital twin of the CNC arc welding 3D printing process using machine learning and numerical modeling methods [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer protsessy 3D-pechati elektrodugovoy naplavkoj na stanke s CHPU s ispolzovaniem metodov mashinnogo obucheniya i chislennogo modelirovaniya]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020. No. 67–2. Pp. 55–62. DOI: 10.18411/lj-11-2020-57. (rus)
18. Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Anosov M.S., Chursin A.A. Digital Twin of 3D Printing on CNC Machines [Tsifrovoy dvojn timer 3D-pechati na stankakh s CHPU]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. No. 7. Pp. 47–49. (rus)
19. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Development of a digital twin of a cutting tool for machining production [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer rezhushchego instrumenta dlya mekhanoobrabatyvayushchego proizvodstva]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye*. 2019. No. 4 (709). Pp. 11–17. DOI: 10.18411/lj-12-2018-177. (rus)
20. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. Development of a digital twin of a CNC machine based on machine learning methods [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer stanka s CHPU na osnove metodov mashinnogo obucheniya]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. Vol. 19. No. 1. Pp. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55. (rus)
21. Ostasevicius V. *Digital Twins in Manufacturing. Virtual and Physical Twins for Advanced Manufacturing*. Springer. 2022. 365 p. DOI: 10.1007/978-3-030-98275-1
22. Xue R., Zhou X., Huang Z., Zhang F., Tao F., Wang J. Digital twin-driven CNC spindle performance assessment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 1821–1833. DOI: 10.1007/s00170-021-08403-6
23. Guo M., Fang X., Hu Z., Li Q. Design and research of digital twin machine tool simulation and monitoring system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. Pp. 4253–4268. DOI: 10.1007/s00170-022-09613-2
24. Wei Y., Hu T., Wei S., Ma S., Wang Y. Digital twin technology applicability evaluation method for CNC machine tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. Pp. 5607–5623. DOI: 10.1007/s00170-022-10050-4
25. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. Vol. 10. Pp. 1129–1140. DOI: 10.1007/s12652-018-0946-5
26. Tong X., Liu Q., Pi S., Xiao Y. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31. Pp. 1113–1132. DOI: 10.1007/s10845-019-01500-0
27. Modelica Association. Functional mock-up interface for model exchange and co-simulation. Functional mock-up interface 2.0.2., Access mode: <https://fmi-standard.org/>.
28. Polyakov A.N. Identification of the thermodynamic system of a jig boring machine [Identifikatsiya termodinamicheskoy sistemy koordinatno-rastochnoy stanka]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2003. No. 4. Pp. 12–19. (rus)
29. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental study of temperature and precision characteristics of a double-sided end grinding machine [Eksperimentalnoye issledovanie temperaturnykh i tochnostnykh kharakteristik dvustoronney tortseshlifovalnoy stanka]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 11. Pp. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120. (rus)
30. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization: Second Edition*. Springer. 2005. 323 p.
31. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science: Advances in Geographic Information Science*. Springer. 2015. 335 p.
32. Shtojer R. *Multicriteria Optimization: Theory, Computations and Applications*. M.: Radio i svyaz. 1992. 504 p. (rus)

Information about the authors

Polyakov, Alexander N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University, Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Pozevalkin, Vladimir V. PhD, Senior lecturer. E-mail: vorgpost1@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 15.08.2024

Для цитирования:

Поляков А.Н., Никитина И.П., Позевалкин В.В. Создание цифровой модели термомодеформационной системы станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 116–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131

For citation:

Polyakov A.N., Nikitina I.P., Pozevalkin V.V. Creation of a digital model of the machine tool thermal deformation system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 116–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131