

## РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ СТАНКОВ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ РОБОТОВ ОТ СИЛ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

**Е.И. Щурова**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Расчет деформаций нежесткого технологического оборудования (специальных станков и обрабатывающих роботов) необходим для прогнозирования достижимости требуемой точности обработки. В настоящее время эта задача теоретически разрешима с применением численных методов расчета, в частности метода конечных элементов, для применения которого используются САД-модели устройств. Такие расчеты требуют многомиллионных конечно-элементных сеток и выполняются, как правило, на суперкомпьютерах крупных компаний по производству данного оборудования.

Применение этого подхода для решения этой же задачи в технологических службах машиностроительных предприятий вызывает как трудности вычислительного порядка, так и трудности с получением САД-моделей данного оборудования, поскольку они являются технической тайной их производителей. Для преодоления этих трудностей предлагается подход, в основу которого положены три решения. Первое решение связано с отказом от использования полноценных твердотельных САД-моделей оборудования. Вместо этого предлагается использовать STL-модели, в которых представлены лишь триангулированные поверхности сборок с перемещаемыми друг относительно друга узлами оборудования. Второе решение связано с использованием воксельного подхода и связанного с ним расчета кубических элементов конечно-элементных моделей. Третье решение связано с заменой реальных моделей деталей контактирующих пар приводов подач на их эквивалентные по жесткости модели эквивалентных деталей. Приведены примеры результатов перечисленных видов моделирования оборудования и расчеты его деформаций от сил резания. Показано, что такие расчеты доступны для современных персональных компьютеров технологических служб предприятий и не требуют раскрытия технических тайн производителей технологического оборудования. Данный подход имеет перспективы для использования в продвинутых САМ-системах расчета управляющих программ станков с ЧПУ с учетом влияния таких технологических факторов, как деформации оборудования.

*Ключевые слова: деформация станка, промышленный робот, точность обработки, STL-модель, метод конечных элементов, воксельное моделирование.*

**Введение.** Известно, что в процессе резания между инструментом и заготовкой всегда возникает сила резания, которая обуславливает их деформации, а также деформации удерживающего их оборудования. Как правило, жесткость типовых станков стандартной конструкции достаточно высока и не приводит к заметному уходу инструмента от его заданного положения. Однако жесткость специальных станков, которые нередко изготавливаются сварными из типовых прокатных профилей, намного меньше, и их деформации оказывают большее влияние на точность обработки. Наряду с этим обстоятельством необходимо учитывать и тот факт, что требования к точности обработки с течением времени постоянно повышаются. Все более актуальным сейчас становится достижение микронной точности. Поэтому в настоящее время приходится учитывать влияние деформаций типовых и специальных станков в прогнозах указанной точности обработки [1]. Теоретически для этих целей появилась возможность прогнозных расчетов с применением типовых процедур современной практики проектных работ, которые повсеместно основаны на САД/CAM/CAE-программном обеспечении [2]. Однако, несмотря на очевидность и простоту решения, данная практика все еще не получила распространения в технологических службах ма-

шиностроительных предприятий. Анализ позволил выявить три основные причины ограниченности этого распространения. Первая причина носит экономический характер и связана с сохранением технической тайны разработчиков и производителей обрабатывающего оборудования. Полные твердотельные CAD-модели сборок станков являются интеллектуальной собственностью производителей и не передаются третьим сторонам. Вторая причина связана с технической ограниченностью современной компьютерной техники, доступной технологическим службам предприятий. Полные CAD-модели сборок технологического оборудования содержат в себе тысячи деталей, в том числе как крупные, так и малоразмерные конструктивные элементы, что требует применения многомиллионных конечно-элементных сеток для расчетов деформаций. Даже линейные конечно-элементные расчеты с такими сетками не могут быть реализованы на современных компьютерах технологов за приемлемое время расчета. При этом появление компьютеров требуемой большей производительности в ближайшую и среднесрочную перспективу не ожидается. Третья причина носит научный характер, она связана с наличием соединений между собой всех деталей оборудования и в особенности – подвижных друг относительно друга деталей. Это обстоятельство требует применения контактных конечных элементов и формализации условий контакта, включая, например, параметры трения. Такая формализация затруднена прежде всего определением величин реальных зазоров, реальных коэффициентов трения, условий закрытия части таких зазоров при различных положениях узлов оборудования в разные моменты времени и различных нагрузках. Вышеописанная третья причина обуславливает нелинейность рассматриваемых расчетов деформаций, что существенно увеличивает требования к компьютерам и общее время вычислений [3–8]. По этой причине от учета контактных явлений зачастую отказываются и рассчитывают станок как одну деталь [3]. В других работах отмечается необходимость учета таких явлений, но сведений об этом найти не удается [4, 5]. Существенное увеличение времени вычислений отмечается в еще одной известной работе, в которой применяется понятие идеального стыка, что обуславливает погрешности вычислений до 25 % [6]. Применение идеальных (склеенных) контактных пар и скользящих пар рассмотрено в работе С.С. Довнар с соавторами [7]. Однако сила трения в скользящих парах принималась отсутствующей. В работе М.А. Рубцова часть контактных пар рассчитывалась с учетом коэффициентов трения [8]. Станок был упрощен до сотни деталей, при этом сведений о времени расчетов и размерах сетки в статье найти не удалось. Автор отмечает, что отклонения расчетных данных от экспериментальных составили 12–14 %. О необходимости замены в станках таких контактных пар, как подшипники и направляющие с каретками, отмечено в работе О.К. Акмаева с соавторами [9]. Такие работы выполнены с учетом замены подшипников эквивалентными конечно-элементными моделями [10]. Аналогичные проблемы описываются в публикациях, посвященных конечно-элементному моделированию (МКЭ) промышленных манипуляционных роботов [11–18]. Таким образом, все перечисленные выше причины, а также и другие особенности не позволили к настоящему времени обнаружить успешных результатов применения CAD/CAM/CAE-систем в решении деформационных задач для технологического оборудования в условиях технологической подготовки производства машиностроительных предприятий.

Как было отмечено выше, необходимость в решении задачи расчета деформаций оборудования существует не только для типовых станков и типовых технологических операций. Такое решение в большей степени необходимо для особых условий обработки, когда типовые рекомендации отсутствуют вообще. К таким особым условиям можно отнести обработку крупногабаритных заготовок, например, элементов крыльев, лонжеронов, обшивок и других деталей авиационной и ракетно-космической техники, крупного наземного транспорта, крупных технологических устройств. Применение типовых станков больших размеров (рис. 1а) для указанных крупногабаритных заготовок сопряжено с большими финансовыми расходами на такое оборудование. В связи с этим находят применение специальные станки рамных конструкций (рис. 1б). Такие станки зачастую используются для сверления отверстий под заклепочные или болтовые соединения. Требование высокой точности обработки в этом случае связано с обеспечением позиционного допуска на расположение отверстий для последующего соединения их с отверстиями таких же крупных сопряженных деталей. Также смещение оси отверстия при сверлении в этом случае связано с деформациями станка от радиальной составляющей суммарной силы резания на

сверле. Таким образом, прогнозный расчет деформаций специальных крупногабаритных станков в рамках технологической подготовки производства становится особенно актуальным.



Рис. 1. Станки для обработки крупногабаритных заготовок: а) традиционный порталного типа (Waldrich-Coburg 20-10 FP 280) и б) специальный рамной конструкции [19]

Для обработки указанных выше крупногабаритных заготовок целесообразно применение промышленных манипуляционных роботов. Такие роботы при сопоставимой зоне обработки имеют меньшую материалоемкость и, соответственно, стоимость. Однако это оборудование имеет также и меньшую жесткость. В этом случае прогнозный расчет смещений рабочего органа робота становится актуальным, но и такие расчеты в технологических службах предприятий сегодня не производятся по указанным выше причинам.

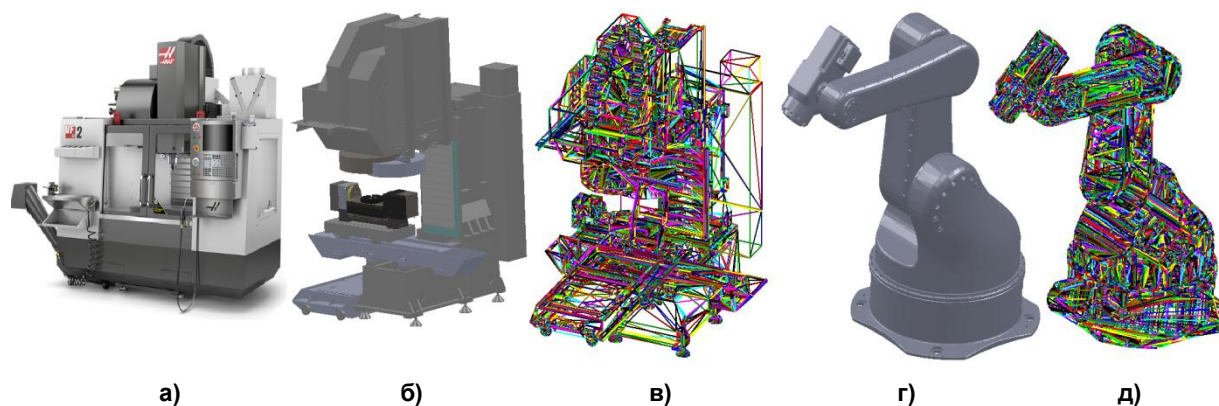
Исходя из этого, **целью** данной работы стала разработка методики расчета деформаций технологического обрабатывающего оборудования от прикладываемой к нему силы резания для специалистов технологической подготовки производства. Данная цель была достигнута решением ряда задач. Во-первых, решена геометрическая задача, а именно: в расчетах жесткости использованы не полноценные подробные твердотельные CAD-модели технологического оборудования, а его STL-модели, полностью соответствующие таким твердотельным моделям. Здесь же для получения конечно-элементных сеток было предложено первоначально заполнить пространство, ограниченное STL-моделями, воксельными сетками. Во-вторых, решена задача замены воксельных сеток их конечно-элементным аналогом с заданным количеством узлов, позволяющим выполнять расчеты на компьютерах специалистов технологической подготовки производства. В-третьих, решена задача замены контактных пар перемещающихся друг относительно друга деталей станков и роботов на эквивалентные по жесткости таким парам детали. Далее в расчетах жесткости была использована эквивалентная деталь станка или робота.

Решение последней задачи представлено в одной из ранних публикаций авторов [20], в связи с чем в следующем разделе статьи приведено решение только первых двух задач.

**1. Получение триангулированных поверхностей станочного и роботизированного технологического оборудования, расчет его воксельной и конечно-элементной сеток.** Как было отмечено выше, требование сохранения технической тайны разработчиков и производителей технологического оборудования обуславливают необходимость отказа от использования полноценных твердотельных CAD-моделей как в универсальных форматах файлов (IGES, STEP, Parasolid, ACIS и т. д.), так и в форматах отдельных коммерческих CAD-программ (SLDPRT, PRT, IV и т. д.) Вместо этого предлагается использовать CAD-файлы триангулированных поверхностей в STL-формате. Файл такого формата, в отличие от предыдущих форматов, не содержит сведений о канонических или сплайновых поверхностях каждой детали в ее твердотельном представлении. Соответственно, по нему нельзя определить, к какой именно детали относится любой треугольник триангулированной поверхности, поэтому нельзя определить ни эти детали,

ни сборки из них. Вместо этого используются только сведения о наборе треугольников, ограничивающих поверхности этих деталей или сборок.

**Формирование STL-модели.** STL-файлы могут быть сформированы в любой CAD-программе путем сохранения сборки как одной сложной детали. В качестве примера расчета рассмотрим станок с ЧПУ и манипуляционные роботы. В качестве примера станка рассмотрим американский станок HAAS VF-2-I (его фотография приведена на рис. 2а). Из Интернета была заимствована его относительно подробная твердотельная CAD-модель. Для наглядности в данной твердотельной модели все крышки и дверцы в CAD-программе автором были сняты, что показано на рис. 2б. Для данного станка была получена его STL-модель с использованием академической версии программы Solidworks. Триангулированные поверхности станка, отображенные в специально разработанной компьютерной программе автора, показаны на рис. 2в. Вторым примером реализации данного этапа расчета стал представленный в Интернете манипуляционный робот, разработанный Е. Черчелановым. Триангулированная поверхность этого робота, рассчитанная в Solidworks, приведена на рис. 2г. Та же самая триангулированная STL модель робота, считанная программой автора, показана на рис. 2е. Примеры расчета на данном этапе других технологических устройств также будут приведены ниже.



**Рис. 2. Станок HAAS VF-2-I (а) и его твердотельная CAD-модель (б); триангулированные поверхности данного станка из Solidworks и компьютерной программы автора (в), триангулированные поверхности робота из Solidworks (г) и программы автора (д)**

Таким образом, STL-модели оборудования, полученные из его полноценных твердотельных CAD-моделей, не раскрывают его технических подробностей и могут быть опубликованы производителями этого оборудования для свободного использования в проектных работах технологических служб машиностроительных предприятий. В первом приближении реализация данного этапа представляется достаточно тривиальной, однако здесь имеются и свои особенности. В частности, расчеты деформаций станков или роботов должны производиться в том положении их узлов или звеньев, в котором производится обработка данного участка поверхности детали. Соответственно, технолог, выполняя данный расчетный проект, должен иметь возможность расположить эти узлы и звенья в требуемом положении. Поскольку в данном месте рассматривается только компьютеризированное технологическое оборудование, то очевидным становится использование типовых САМ-систем. Такие системы позволяют не только получать траектории движения инструментов и связанных с ними узлов (звеньев) оборудования, но и получать расположение таких узлов (звеньев) в нужный момент времени обработки. В настоящее время такая возможность реализована лишь для упрощенных CAD-моделей данного оборудования. Используемые в САМ-моделировании CAD-модели станков имеют сборки узлов, каждый из которых представлен одной деталью, полностью заполненной внутри некоторым материалом станка. Расчеты деформаций таких узлов оборудования методом конечных элементов будут на порядок отличаться от его реальных деформаций. Вместо этого нами предлагается заменить такие узлы их аналогами с реальными деталями, но представленными как STL-модели. В таком случае с учетом отмеченного нами выше правила применения эквивалентных деталей контактных пар

[20] расчеты деформаций оборудования станут максимально адекватными. Именно доказательство данной гипотезы – гипотезы возможности замены типовых CAD/CAE-расчетов STL-моделями с эквивалентными деталями и последующим воксельным и конечно-элементным моделированием – стало предметом настоящего исследования.

**Формирование воксельной модели оборудования.** На следующем этапе расчетов необходимо заполнить пространство всех деталей технологического оборудования вокселями [21]. Такое заполнение можно выполнить, используя тривиальные зависимости:

$$x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \cup y_{\min} \leq y_e \leq y_{\max} \cup z_{\min} \leq z_e \leq z_{\max}, \quad (1)$$

$$x_{\min} = \min\{x(y_e, z_e)\}, \quad x_{\max} = \max\{x(y_e, z_e)\}, \quad (2)$$

$$y_{\min} = \min\{y(x_e, z_e)\}, \quad y_{\max} = \max\{y(x_e, z_e)\}, \quad (3)$$

$$z_{\min} = \min\{z(x_e, y_e)\}, \quad z_{\max} = \max\{z(x_e, y_e)\}, \quad (4)$$

где  $x_e$ ,  $y_e$  и  $z_e$  – координаты каждого  $e$  вокселя сетки воксельного пространства (здесь общий индекс  $e$  введен для сквозной нумерации всех вокселей, но в расчетах по компьютерным алгоритмам следует использовать индексы: для  $x_e$  –  $i$ , для  $y_e$  –  $j$ , для  $z_e$  –  $k$ , при этом

$$e_{\max} = i_{\max} \cdot j_{\max} \cdot k_{\max});$$

$x(y_e, z_e)$ ,  $y(x_e, z_e)$  и  $z(x_e, y_e)$  – координаты точек плоскостей, очерченных треугольниками триангулированных поверхностей STL-моделей для соответствующих значений последовательно выбираемых координат узлов вокселей: сначала выбирается значение  $x_e$ , затем для него перебираются все значения  $y_e$  и далее для каждого значения  $y_e$  перебираются все значения  $z_e$ . Отрезки пересечения с указанными треугольниками должны лежать на прямых линиях, параллельных координатным осям и проходящим через узел текущего вокселя с координатами  $(x_e, y_e, z_e)$ ;

$\min$  и  $\max$  означают: для  $x$  – соответственно слева и справа; для  $y$  – соответственно спереди и сзади; для  $z$  – соответственно снизу и сверху для каждого отрезка внутри пар треугольников, очерчивающих некоторое непрерывное пространство внутри деталей станка.

Для заполнения вокселями всего пространства воксельной сетки станка используются общеизвестные зависимости, применяемые в дискретном твердотельном моделировании [21]:

$$x_1 = x_{\min} + \Delta x, \quad y_1 = y_{\min} + \Delta y, \quad z_1 \leq z_{\min} + \Delta z \quad \text{и} \quad x_{i+1} = x_i + \Delta x, \quad y_{j+1} = y_j + \Delta y, \quad z_{k+1} \leq z_k + \Delta z, \quad (5)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  – шаги воксельной сетки.

Условия (2)–(4), связанные с треугольниками триангулированной модели оборудования, требуют процедуры их упорядочивания по значениям координат, например, по  $z$ . Такой порядок позволяет определить парные треугольники, которые ограничивают тело эквивалентной детали станка. Первый треугольник имеет номер «1» (нечетный), второй – номер «2» (четный). Все треугольники, которые пересекаются линией вдоль оси  $z$  как последовательности нечетных и четных номеров, ограничивают тело станка. А все треугольники как последовательности четных и нечетных номеров ограничивают пустое пространство между частями этого станка. Таким образом, в правильной STL-модели любая прямая линия вдоль оси  $z$  должна пересекать четное число треугольников триангулированной поверхности станка.

**Формирование конечно-элементной модели оборудования.** После определения множества вокселей, заполнивших пространство станка или робота, необходимо выполнить их преобразование в конечные восьмиузловые элементы. В простом случае расчет координат узлов таких элементов выполняется через координаты узловых точек вокселей по тривиальным зависимостям (6).

Такой подход дает восьмикратное увеличение количества узлов, однако их использование в таких программах, как Ansys, позволяет слить все узлы с одинаковыми координатами. После этой процедуры количество узлов становится примерно равным количеству конечных элементов, и последующая автоматическая перенумерация узлов дает оптимальный вариант для последую-



сих расчетов. Если количество конечных элементов и узлов оказывается чрезмерно большим и превышает возможности используемого компьютера, то такое количество можно уменьшить, увеличив шаги воксельной сетки в уравнениях (5). Другим вариантом является формирование конечных элементов по двум или нескольким, например восьми, вокселям. Если при определении узлов конечного элемента их оказывается ровно восемь в группе из предполагаемых восьми вокселей, то габаритные узлы такой группы становятся узлами данного конечного элемента, и он имеет форму куба. Если таких узлов в группе меньше восьми, то из габаритных узлов формируются элементы с количеством узлов от трех до семи или происходит загущение элементами данных областей пространства. В этом случае такие конечные элементы у поверхности будут отличаться по форме от кубических элементов внутри тела. Этот подход требует большего объема вычислений, однако по сравнению с предыдущим простым вариантом в этом случае аппроксимация поверхностей оборудования будет более точной при меньшем числе конечных элементов.

1-й узел, имеет координаты текущего вокселя:  $x_i, y_i, z_i$ ;

2-й узел:  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$ ;  $y_{i+1} = y_i$ ;  $z_{i+1} = z_i$ ;

3-й узел:  $x_{i+2} = x_i + \Delta x$ ;  $y_{i+2} = y_i + \Delta y$ ;  $z_{i+2} = z_i$ ;

4-й узел:  $x_{i+3} = x_i$ ;  $y_{i+3} = y_i + \Delta y$ ;  $z_{i+3} = z_i$ ; (6)

5-й узел:  $x_{i+4} = x_i$ ;  $y_{i+4} = y_i$ ;  $z_{i+4} = z_i + \Delta z$ ;

6-й узел:  $x_{i+5} = x_i + \Delta x$ ;  $y_{i+5} = y_i$ ;  $z_{i+5} = z_i + \Delta z$ ;

7-й узел:  $x_{i+6} = x_i + \Delta x$ ;  $y_{i+6} = y_i + \Delta y$ ;  $z_{i+6} = z_i + \Delta z$ ;

8-й узел:  $x_{i+7} = x_i$ ;  $y_{i+7} = y_i + \Delta y$ ;  $z_{i+7} = z_i + \Delta z$ .

Таким образом, из STL-модели технологического оборудования с положением звеньев или узлов для рассматриваемого момента обработки всегда можно рассчитать ее конечно-элементную модель с приемлемым для расчетов размером. Количество узлов в такой модели можно задавать определением шага воксельной сетки в формулах (5).

На основе данного подхода были разработаны специальные компьютерные программы, которые позволяют не только считывать STL-модели оборудования, что было показано выше (см. рис. 2), но и рассчитать воксельные и конечно-элементные сетки. С использованием данных программ далее были получены модели технологического оборудования, описанные в следующем разделе, и проверена выдвинутая выше гипотеза.

**2. Результаты STL-моделирования, воксельного и конечно-элементного моделирования технологического оборудования для расчета его деформация от сил резания на основе использования специально разработанных компьютерных программ.** На данном этапе исследования предполагается получить STL-модели, выполнить тестовые расчеты воксельной и конечно-элементной сеток промышленного робота и рассчитать его деформации от сил резания.

**Расчет воксельной и конечно-элементной сеток робота и тестовый расчет его деформаций.** В качестве примера для анализа эффективности и практичности предлагаемого подхода был использован промышленный манипуляционный 6-осевой робот модели ER-20-C10 от компании Efort (рис. 3а). Его CAD-модель, полученная с использованием программы Solidworks, показана на рис. 3б. Эта же модель, сохраненная в Solidworks в формате STL, показана на рис. 3в. Считанный программой автора STL-файл показан на рис. 3г. Узловые точки вокселей, полученные по формулам (1)...(5) с шагом 5 мм, также отображены программой автора и показаны на рис. 3д. Рассчитанные по формулам (6) в программе автора узлы и образованные ими конечные элементы показаны на рис. 3е.

На первом предварительном этапе всего было получено 436328 узлов, которые образуют 314347 конечных элементов. Такой объем сеток является приемлемым для любых компьютеров технологов, используемых в современной повседневной практике проектных работ. Поскольку задача расчета упругих деформаций относится к классу линейных задач, то для примера к месту крепления инструмента в расчетах была приложена вертикальная нагрузка от силы резания, равная 100 Н. Картина распределения деформаций вдоль вертикальной оси  $y$  показана на рис. 4б. Для того чтобы показать конструкцию робота изнутри, был выполнен разрез секущей плоскостью его предпоследнего звена. Увеличенные изображения этого участка робота из CAD-модели и конечно-элементной модели приведены соответственно на рис. 4в и рис. 4г. Как видно из рис. 4г, в целом сетка конечных элементов позволяет распознать основные детали робота.

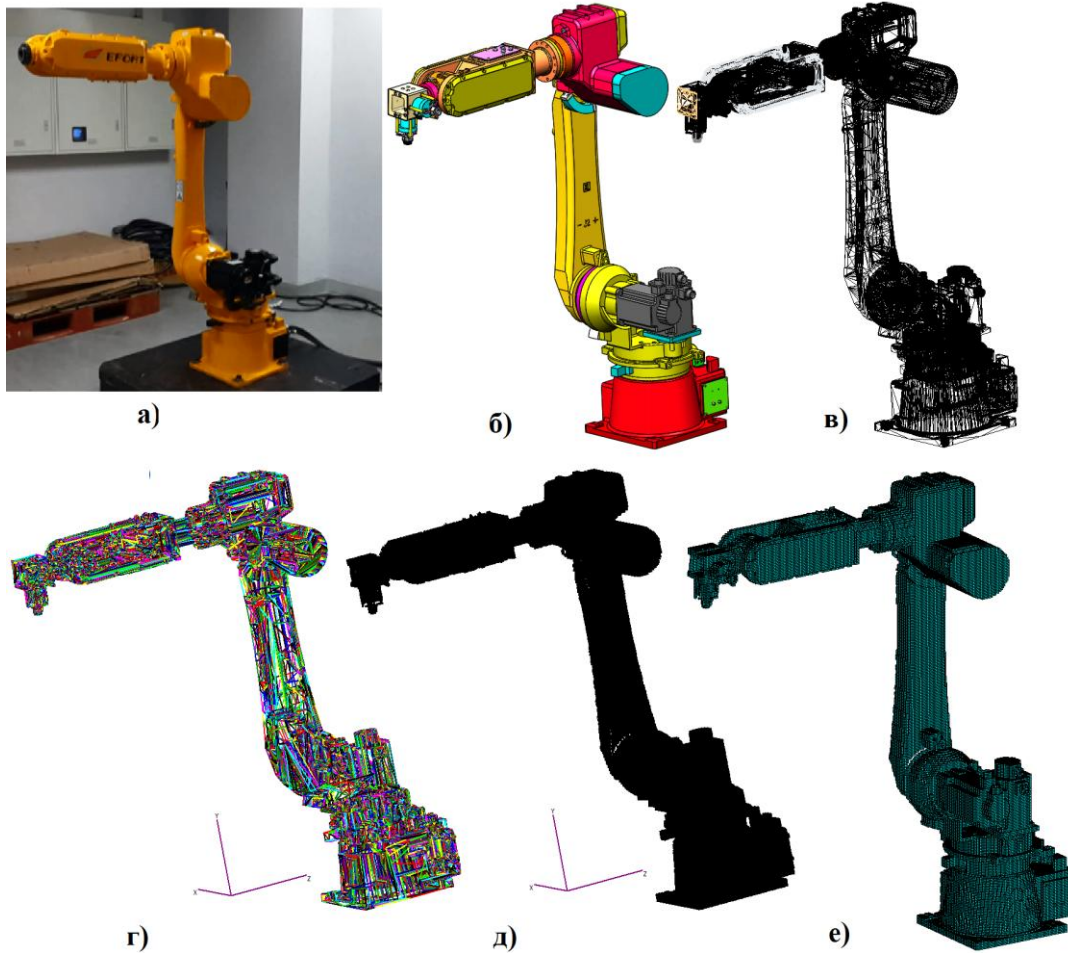


Рис. 3. Робот Efort ER-20-C10 (а), его твердотельная CAD-модель в Solidworks (б), STL-модель в Solidworks (в), STL-модель в программе автора (г), воксельная (д) и конечно-элементная (е) модели

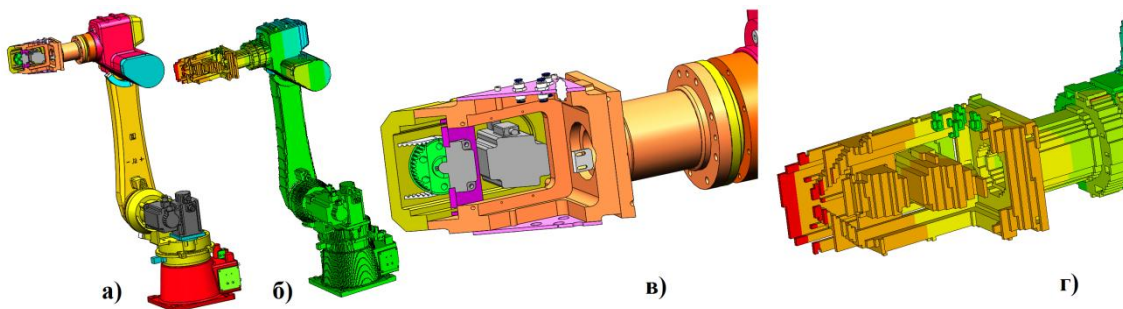


Рис. 4. Твердотельная CAD-модель робота ER-20-C10 с частичным разрезом предпоследнего звена (а), отображение картины деформаций в направлении вертикальной оси (б), увеличенное изображение CAD-модели разрезанного звена (в) и аналогичная конечно-элементная модель этого же звена с отображением деформаций (г)

Данный расчет позволил подтвердить, что использование STL-моделей оборудования, последующий расчет его вокселей и расчет на этой основе конечных элементов являются достижимыми и позволяют рассчитывать деформации оборудования на типовых компьютерах технологов.

*Сравнение результатов расчета деформаций робота традиционным методом и предлагаемым методом.* На данном этапе исследования планируется доказать, что предлагаемый метод расчета является достаточно адекватным и соответствующим традиционным методам расчета.

Таким образом должна быть подтверждена выдвинутая выше гипотеза. Расчет деформаций всего робота традиционным способом вызывает затруднения по причине получения конечно-элементных сеток с высоким количеством узлов конечно-элементной сетки. В целом нет необходимости рассчитывать весь робот, достаточно рассчитать его часть обоими методами и сравнить полученные таким образом результаты. В качестве примера далее рассмотрены последние звенья данного робота. Внешний вид звеньев робота представлен на рис. 5а, его разрез на рис. 5б. Расчет деформаций традиционным способом был произведен в САЕ-программе Ansys Workbench, в который была импортирована твердотельная модель из Solidworks (рис. 5в).

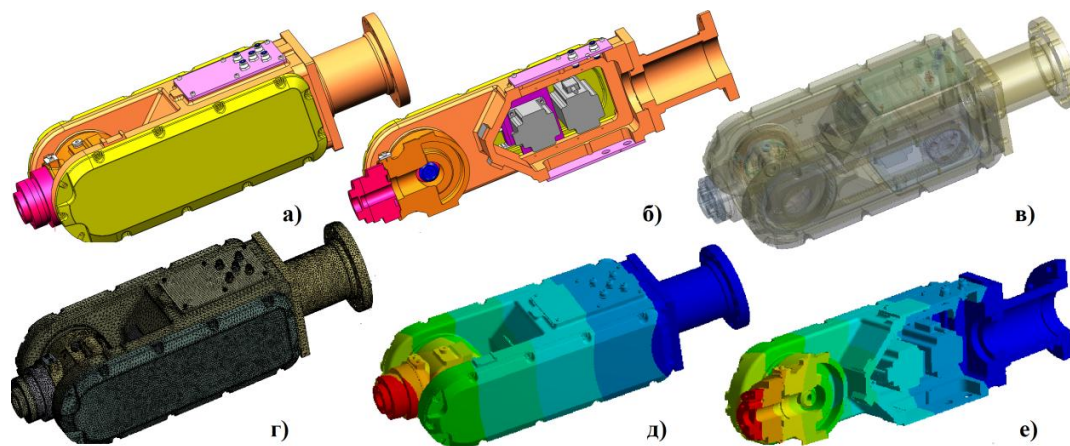


Рис. 5. Твердотельная модель Solidworks звеньев робота ER-20-C10 (а), его разрез (б) и эта же твердотельная модель, импортированная в Workbench (в), конечно-элементная модель (г), деформации в целом всех звеньев (д) и деформации в разрезе (е)

Для данной твердотельной модели была получена сетка конечных элементов типа «тетраэдр» (рис. 5в). Количество элементов составило 699391, из которых около 100 тыс. – контактные элементы, а количество узлов – 1308378. Вертикальная нагрузка на механическом интерфейсе робота составила 100 Н. Фланец присоединительного звена был закреплен по всем шести степеням свободы. Картины распределения деформаций на виде в целом всех рассматриваемых звеньев и в их разрезе представлены соответственно на рис. 5д и 5е. Максимальная деформация составила 14,9 мкм. Число итераций было более 170.

Далее аналогичные расчеты были выполнены по предлагаемому новому методу расчета. STL-модель звеньев робота, полученная в авторской программе, показана на рис. 6а. Рассчитанная в авторской программе сетка состояла из 802442 кубических конечных элементов и 966848 узлов (рис. 6б). В результате расчетов максимальные деформации в аналогичных условиях составили 11,9 мкм (рис. 6в), что на 20 % меньше результатов традиционного расчета. Одним из объяснений повышенной жесткости нового расчета по сравнению с традиционным может быть замена контактных пар с трением на жесткие соединения. Анализ таких соединений выходит за рамки данной работы, поскольку он требует отдельного изучения таких контактных явлений. Например, среди сообщений программы Workbench во время ее работы были и сообщения о взаимном проникновении узлов контактных элементов, что обуславливает завышение их жесткости. Тем не менее точность 20 % представляется достаточной для целей технологической подготовки производства. Такой целью является, например, прогнозная оценка жесткости оборудования и сравнение его деформаций с допуском на выполняемые поверхности деталей. Поскольку деформации оборудования являются лишь одним из многих других технологических факторов, обуславливающих погрешности обработки, которые в свою очередь еще мало формализованы (например, расчет самих сил резания), то даже такая точность в настоящее время представляется достаточной. Кроме того, в представленных расчетах не произведена замена деталей контактных пар на эквивалентные по жесткости монолитные детали. При такой замене точность еще более возрастет.



Таким образом, замена традиционного твердотельного САД-моделирования и традиционно-го САЕ-расчета технологического оборудования новым методом расчета, связанного с STL-моделями, воксельным и основанным на нем конечно-элементным моделированием оборудования представляется обоснованной и достаточной для целей технологов прогноза точности обработки.

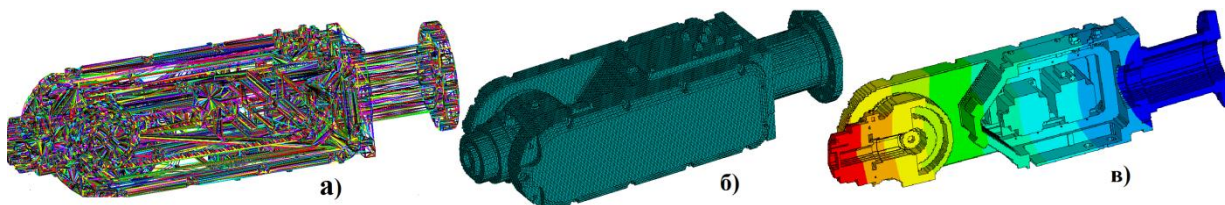


Рис. 6. STL-модель звеньев в авторской программе (а), полученная новая конечно-элементная модель (б) и расчеты деформаций с новой конечно-элементной сеткой (в)

**3. Обсуждение и применение.** Проведенные исследования направлены на замену твердотельных моделей деталей станков и роботов на их STL-модели. Соответственно, далее используется воксельное и основанное на нем конечно-элементное моделирование. Полученные восьми-узловые конечные элементы позволяют далее рассчитать типовым способом деформации оборудования от сил резания. Расчеты даже без использования эквивалентных контактным парам деталей позволяет получить приемлемые по точности результаты (в пределах десятков процентов). Детали, эквивалентные контактным парам, должны быть представлены разработчиками и производителями таких узлов. В этом случае точность расчетов может быть существенно повышена. Поскольку обрабатываемое оборудование изготавливается из разных материалов, то наряду с эквивалентными STL-моделями узлов (звеньев) оборудования его разработчики могут предоставить и входящие в него STL-модели со своими модулями упругости. В этом случае в расчетах будут учтены и разные материалы, применяемые в оборудовании. С повышением производительности компьютерной техники данный метод расчета может быть использован непосредственно в САМ-системах, что позволит получать управляющие программы податливых станков и роботов с учетом деформаций их узлов и звеньев в каждый момент времени обработки. Это, в свою очередь, позволит существенно сократить время и расходы, связанные с обработкой управляющих программ оборудования непосредственно в цехах.

**4. Вывод.** Предложенный способ расчета деформаций обрабатываемого оборудования специалистами технологических подразделений предприятий, основанный на использовании его STL-моделей, воксельного и основанного на нем конечно-элементного моделирования, является реализуемым на типовых компьютерах технологов и позволяет с приемлемой для практики таких расчетов точностью спрогнозировать погрешности обработки.

### Литература

1. *High-speed portal and 5-axis industrial milling machines. Germany: DATRON AG.– Cat 210419 EN Prosp. V4.1, 2021.– 64 p.*
2. *Milling Force Model for Aviation Aluminum Alloy / Z. Duan, C. Li, W. Ding et al. // Academic Insight and Perspective Analysis. Chin. J. Mech. Eng.– 2021.– Vol. 34, Iss. 18. – P. 1–35.*
3. *Василевич, Ю.В. Конечно-элементный анализ влияния бетонного наполнителя на динамическую жесткость портала тяжелого станка / Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, И.А. Карабанюк // Наука и техника.– 2016.– Т. 15, № 3.– С. 233–241.*
4. *Каменев, С.В. Методика анализа статической жесткости станка с учетом конфигурации его рабочего пространства / С.В. Каменев // Машиностроение и инженерное образование. – 2008.– № 1. – С. 12–21.*
5. *Туромшиа, В.И. Исследование жесткости продольно-фрезерного станка с подвижным порталом с помощью конечно-элементного моделирования / В.И. Туромшиа, С.С. Довнар, Туми Эль-Мабрук Абузафер Али // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БНТУ.– 2010. – Вып. 25. – С. 270–277.*

6. Поляков, А.Н. Методика выбора твердотельных конечно-элементных моделей несущих систем станков при проведении их инженерного анализа / А.Н. Поляков, А.И. Додоров // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2019. – № 6. – С. 102–116.
7. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ / С.С. Довнар, А.М. Якимович, И.Л. Ковалева и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2014. – Серия В. – С. 24–36.
8. Рубцов, М.А. Методика анализа силовых деформаций несущих систем станков при контактных взаимодействиях поверхностей / М.А. Рубцов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2016. – № 1 (35). – С. 35–41.
9. Akmaev, O.K. Static Stiffness Modeling of Parallel Kinematics Machine Tool Joints / O.K. Akmaev, B.A. Enikeev, A.I. Nigmatullin // Journal of Engineering Science and Technology. – 2015. – Rev. 8 (6). – P. 1–5. – DOI: 10.25103/jestr.086.01.
10. Molnar, R. Simplified modeling for needle roller bearings to analyze engineering structures by FEM / R. Molnar, K. Varadi, G. Bodai // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering 2010. – Vol. 54. – Iss. 1. – P. 27–33. – DOI: 10.3311/pp.me.2010-1.05.
11. Singh, A. Design and Static Analysis of Robotic Arm using Ansys / A. Singh, R. Arora, Y. Singh // International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 9. – No. 1. – P. 626–630.
12. Arora, R. Finite element analysis and multibody dynamics of 6-dof industrial robot / R. Arora, S.S. Dhama // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2017. – Vol. 7, Iss. 5. – P. 1–12. – DOI:10.24247/ijmperdoct20171.
13. Bugday, M. Design optimization of industrial robot arm to minimize redundant weight / M. Bugday, M. Karali // Engineering Science and Technology. – 2019. – Vol. 22. – P. 346–352.
14. Chander, P.R. Modeling and Model Analysis of an Industrial Robot Arm for Pick and Drop Circular Motion Using Different Materials / P.R. Chander, Y.M. M. Reddy, S.S. Ahmed // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2019. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 4514–4520.
15. Ghiorghe, A. Optimization design for the structure of an RRR type industrial robot / A. Ghiorghe // U.P.B. Sci. Bull., 2010. – Series D. – Vol. 72, Iss. 4. – P. 121–134.
16. Shape Design Optimization of a Robot Arm Using a Surrogate-Based Evolutionary Approach / J.C. Hsiao, K. Shivam, C.L. Chou et al. // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–17.
17. Jain, R. Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications / R. Jain, M.N. Zafar, J.C. Mohanta // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 691. – P. 1–8. – DOI:10.1088/1757-899X/691/1/012010.
18. Sahu, S. Static analysis of a 6 – axis industrial robot using finite element analysis / S. Sahu, B.B. Choudhury // Int. J. of Mechanical Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 49–55.
19. Bullen, G.N. Automated mechanized drilling and countersinking of airframes/ G.N. Bullen // SAE International. – 2013. – 262 p. – DOI 10.4271/R-416.
20. Щурова, Е.И. Расчетное и экспериментальное определение жесткости манипуляционных роботов, применяемых для операций сверления / Е.И. Щурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 60–71. – DOI: 10.14529/engin210207
21. Shchurova, E.I. Industrial Manipulating Robot Finite Element Mesh Generation Based on Robot Voxel Model/ E.I. Shchurova // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – pp. 232–239. DOI:10.1007/978-3-030-54817-9\_27.

**Щурова Екатерина Игоревна**, к.т.н., преподаватель, кафедра «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shchurovaei@susu.ru.

Поступила в редакцию 22 сентября 2022 г.

## CALCULATION OF MACHINE TOOLS AND MACHINING ROBOTS DEFORMATIONS CAUSED BY CUTTING FORCE UNDER CONDITIONS OF MANUFACTURING PROCESS DESIGN

*E.I. Shchurova, shchurovaei@susu.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The calculation of deformations of non-rigid technological equipment: special machine tools and processing robots is necessary to predict the achievability of the required machining accuracy. At present, this problem is theoretically solvable using numerical methods of calculation, in particular, the finite element method, for which machine tool CAD models are used. Such calculations require multi-million finite element meshes and are commonly performed using supercomputers of large companies which product this equipment.

The application of this approach to solve the same problem by the technological services of machine-building enterprises causes both computational difficulties and difficulties in obtaining CAD models of the equipment, which is the technical secret of its manufacturers. An approach based on three solutions is proposed to overcome these difficulties. The first solution is related to the refusal to use full-featured CAD models of the equipment. Instead, it is proposed to use STL models, which include only triangulated assembly surfaces with equipment parts moving relative to each other. The second solution is related to the use of the voxel approach and the associated calculation of the finite elements models. The third solution is related to the replacement of real models of the contacting pairs on their equivalent models with equivalent rigidity. The results of the equipment modeling and calculations of its displacements caused by cutting forces are presented. It is shown that such calculations can be made using modern personal computers of enterprise technological services and do not require the disclosure of commercial secrets of this technological equipment. This approach is promising for use in advanced CAM systems for calculating control programs of CNC machines considering the influence of such technological factors as equipment deformations.

*Keywords: machine tool deformation, industrial robot, machining accuracy, STL model, finite element method, voxel modeling.*

### References

1. High-speed portal and 5-axis industrial milling machines. Germany: DATRON AG. – Cat 210419 EN Prosp. V4.1, 2021, 64 p.
2. Duan Z., Li C., Ding W. et al. Milling Force Model for Aviation Aluminum Alloy. *Academic Insight and Perspective Analysis. Chin. J. Mech. Eng.*, 2021, vol. 34, iss. 18. pp. 1–35.
3. Vasilevich Yu.V., Dovnar S.S., Karabanyuk I.A. [Finite Element Analysis of the Effect of Concrete Filler on the Dynamic Stiffness of the Portal of a Heavy Machine]. *Science and Technology*, 2016. vol. 15, no. 3, pp. 233–241. (in Russ.)
4. Kamenev S.V. [The Method of Analysis of the Static Rigidity of the Machine, Taking into Account the Configuration of Its Working Space]. *Mechanical engineering and engineering education*, 2008, no. 1. pp. 12–21. (in Russ.)
5. Turomsha V.I., Dovnar S.S., Abuzhafer Ali Tumi El'-Mabruk [Study of the Rigidity of a Longitudinal Milling Machine with a Movable Portal Using Finite Element Modeling]. *Minsk, BNTU: Mechanical engineering: republican interdepartmental collection of scientific works*, 2010, iss. 25. pp. 270–277. (in Russ.)
6. Polyakov A.N., Dodorov A.I. [Method of Selection of Solid-State Finite Element Models of the Bearing Systems of Machine Tools During Their Engineering Analysis]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2019, no. 6, pp. 102–116. (in Russ.)

7. Dovnar S.S., Yakimovich A.M., Kovaleva I.L., Shumskij I.I. [Harmonic Analysis of the Portals of Heavy Longitudinal Milling Machines of the “Gentry” Type Using the FEM]. *Bulletin of the Polotsk State University*, 2014, vol. B. pp. 24–36. (in Russ).
8. Rubcov M.A. [Method of Analysis of Force Deformations of the Bearing Systems of Machine Tools at Contact Interactions of Surfaces]. *Vector of Science of Togliatti State University*, 2016, no. 1 (35). pp. 35–41. (in Russ).
9. Akmaev O.K., Enikeev B.A., Nigmatullin A.I.. Static Stiffness Modeling of Parallel Kinematics Machine Tool Joints. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2015, Rev. 8 (6). pp. 1–5. – DOI: 10.25103/jestr.086.01.
10. Molnar R., Varadi K., Bodai G. Simplified modeling for needle roller bearings to analyze engineering structures by FEM. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 2010, vol. 54, iss. 1. pp. 27–33. – DOI: 10.3311/pp.me.2010-1.05.
11. Singh A., Arora R., Singh Y. Design and Static Analysis of Robotic Arm using Ansys. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2020, vol. 9, no. 1. pp. 626–30.
12. Arora R., Dhama S.S. Finite element analysis and multibody dynamics of 6-dof industrial robot. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2017, vol. 7, iss. 5. pp. 1–12. – DOI:10.24247/ijmperdoct20171.
13. Bugday M., Karali M. Design optimization of industrial robot arm to minimize redundant weight. *Engineering Science and Technology*, 2019, vol. 22. pp. 346–352.
14. Chander P.R., Reddy Y.M.M., Ahmed S.S. Modeling and Model Analysis of an Industrial Robot Arm for Pick and Drop Circular Motion Using Different Materials. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, vol. 8, iss. 6. pp. 4514–4520.
15. Ghiorghe A. Optimization design for the structure of an RRR type industrial robot. *U.P.B. Sci. Bull*, 2010, Series D, vol. 72, iss. 4. pp. 121–134.
16. Hsiao J.C., Shivam K., Chou C.L., Kam T.Y. Shape Design Optimization of a Robot Arm Using a Surrogate-Based Evolutionary Approach. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10. pp. 1–17.
17. Jain R., Zafar M.N., Mohanta J.C. Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 691. pp. 1–8. – DOI:10.1088/1757-899X/691/1/012010.
18. Sahu S., Choudhury B.B. Static analysis of a 6 – axis industrial robot using finite element analysis. *Int. J. of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, iss. 3. pp. 49–55.
19. Bullen G.N. Automated mechanized drilling and countersinking of airframes. SAE International. – 2013. 262 p. – DOI 10.4271/R-416.
20. Shchurova E.I. [Computational and Experimental Determination of Manipulating Robots Rigidity in Drilling]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 60–71. (in Russ.) – DOI: 10.14529/engin210207
21. Shchurova E.I. Industrial Manipulating Robot Finite Element Mesh Generation Based on Robot Voxel Model. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020. pp. 232–239. – DOI:10.1007/978-3-030-54817-9\_27.

Received 22 September 2022

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Щурова, Е.И. Расчет деформаций станков и обрабатывающих роботов от сил резания в условиях технологической подготовки производства / Е.И. Щурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 30–41. DOI: 10.14529/engin220404

#### FOR CITATION

Shchurova E.I. Calculation of machine tools and machining robots deformations caused by cutting force under conditions of manufacturing process design. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 30–41. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220404