

О.П. Гойдин, А.Б. Журавлев, Е.В. Кураев,
И.С. Никитин, В.Л. Якушев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Исследована вторая типовая конфигурация робототехнического комплекса, определена дислокация области потенциального разрушения и величина предельно допустимой нагрузки, представлены распределения напряжений в узлах конструкции в предельном состоянии.

Напряженно-деформированное состояние, робототехнический комплекс, манипулятор робототехнического комплекса, предельно допустимая нагрузка

Введение

Проблема определения предельно допустимых нагрузок (ПДН) является важнейшей при разработке и эксплуатации робототехнических комплексов (РТК). Под ПДН понимается величина нагрузки, при которой в каком-либо малом элементе конструкции реализуются условия разрушения или перехода материала в пластическое состояние. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к потере работоспособности манипулятора РТК.

В современных РТК величина суммарного усилия на исполнительное устройство манипулятора (схват, резак и т.п.), связанного с весом груза или контактным воздействием на объект при той или иной технологической операции, как правило, выводится на пульт управления оператора. Знание ПДН для различных конфигураций и исполнительных устройств позволяет оператору избегать недопустимых по критерию локального разрушения операций. В идеале границы рассчитанных зон допустимых нагрузок должны быть выведены на пульт управления для всего набора насадок (исполнительных устройств) манипулятора и технологических операций.

Очевидно, что величина ПДН зависит от способа ее приложения, т.е. точки приложения и направления воздействия, а также от того, какие именно элементы конструкции испытывают максимальные нагрузки, поскольку прочностные свойства различных элементов могут значительно отличаться. В связи со сказанным был определен ряд типовых конфигураций конкретного РТК, характеризующихся определенным взаиморасположением узлов манипулятора и соответствующим способом приложения нагрузки. Величина предельно допустимой нагрузки определяется отдельно для каждой типовой конфигурации.

Типовые конфигурации РТК представлены и описаны в [1]. В настоящей работе рассматривается вторая типовая конфигурация. С учетом опыта расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции со сложной 3D-геометрией и множественными контактными парами [2, 3] в качестве инструмента был выбран программный комплекс [4].

Описание геометрической и расчетной модели манипулятора РТК

Манипулятор РТК состоит из семи узлов (рис. 1). Узел основания, к которому крепится плечо, скрыт внутри корпуса. Подвижное соединение узлов обеспечивает изменение формы манипулятора в пространстве.

Соединение и взаимное перемещение узлов осуществляется с помощью комбинированных редукторов с автономными электроприводами.

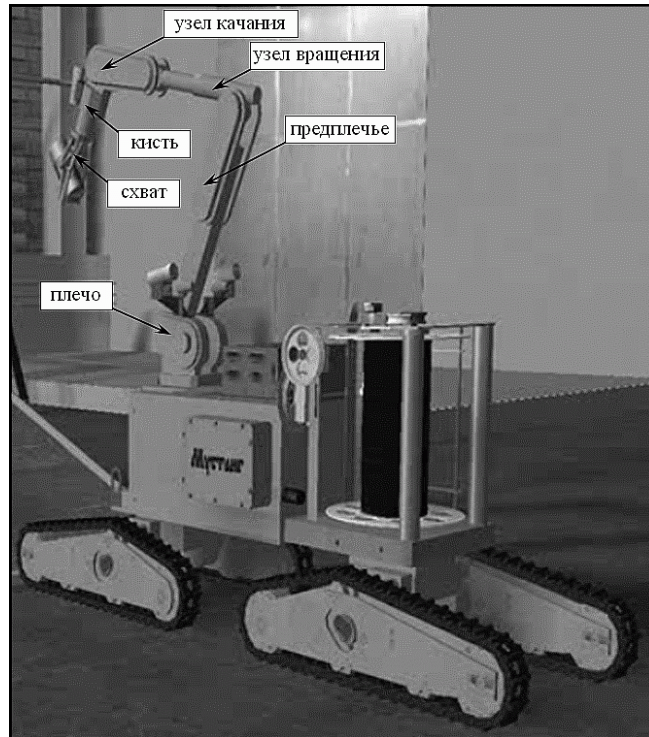


Рис. 1. Узлы манипулятора

Практика показывает, что наиболее уязвимыми элементами являются контактирующие зубья редукторов. Поэтому при анализе напряженного состояния основное внимание будет сосредоточено на них. В результате приложения ПДН на одном из контактирующих зубьев реализуется состояние текучести. В качестве критерия текучести выберем принятый для металлов изотропный критерий Мизеса: интенсивность напряжений равна пределу текучести $\sqrt{\frac{3}{2}} S_{jk} S_{jk} = \sigma_Y$. Предел текучести материала зубчатых колес (сталь 20×13) равен $\sigma_Y = 500$ МПа.

Величину ПДН и соответствующее ей напряженное состояние определяем следующим образом. Выполняем расчет для произвольной нагрузки P_0 , заведомо меньшей предельной. Находим положение и величину максимума интенсивности напряжений σ_0^{\max} . Определяем коэффициент, на который нужно умножить напряжения в данной точке, чтобы выполнилось условие текучести. Поскольку конструкция в целом находится в упругом состоянии, находим величину ПДН и напряжений посредством умножения фактических значений на найденный коэффициент (масштабирование).

Вес конструкции и длина стрелы манипулятора достаточно велики (~ 35 кг и ~ 1990 мм соответственно), поэтому существенный вклад в напряженное состояние может вносить гравитация.

Найдем коэффициент масштабирования с учетом гравитационной нагрузки. Суммарное напряжение² на контактирующих зубьях равно: $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, где σ_2 — напряжения под действием гравитации, σ_1 — напряжения под действием нагрузки. Поскольку пропорциональность величине нагрузки имеет место только для составляющей σ_1 , а гравитационная составляющая σ_2 постоянна, то условие предельного состояния: $k \cdot \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_Y$, где σ_Y — предел текучести. Отсюда коэффициент масштабирования: $k = \frac{\sigma_Y - \sigma_2}{\sigma - \sigma_2}$.

Анализируя решение, находим минимальное значение k_{\min} . Тогда предельно допустимая нагрузка: $P_{\lim} = k_{\min} \cdot P_0$, соответствующее напряженное состояние: $\sigma_{\lim} = k_{\min} \cdot \sigma_1 + \sigma_2$.

Создание цифровой модели для определения напряженного состояния конструкции включает следующие этапы:

- разработка геометрической 3D-модели деталей и сборок;
- определение внутренних связей элементов конструкции;
- генерация сетки;
- расчет упругого НДС, определение нагрузок и ограничений.

Геометрическая модель создана в среде САПР Solid Works, включает более 250 деталей, не считая крепежных элементов и электрооборудования (не рассматриваются).

Последующие этапы выполнены с помощью конечноэлементного приложения Cosmos Works.

Внутренние связи. Для обеспечения относительной подвижности колес и подшипников редукторов зоны их посадки или касания определяются как контактные пары с условием взаимного непроникновения и законом сухого трения на контактной поверхности. Коэффициент трения для контактирующих зубьев выбран $k_f = 0.05$ (сталь по стали), для подшипников $k_f = 0.01$. Общее количество контактных пар конструкции составляет ~ 70.

Генерация сетки для такого объекта — отдельная сложная задача. Детали конструкции значительно различаются по размерам и форме. Соотношение характерных размеров деталей достигает величины 1:100. Корпуса и кожухи имеют множество естественных концентраторов напряжений: выточки, выступы, отверстия. Определенные контактные пары порождают дополнительные элементы на поверхностях контакта. Кроме того, с целью более детального отображения контактных усилий необходимо обеспечить достаточное сгущение сетки на контактирующих поверхностях зубьев.

Перечисленные особенности задачи привели к необходимости создания нескольких десятков элементов управления сеткой (зон искусственного сгущения). Расчетная сетка содержит около 700 000 элементов (рис. 2).

Далее приведены примеры расчетных сеток для некоторых элементов конструкции, на рис. 3 — для узла качания, на рис. 4 — для основания. На поверхности контактных зубьев выполнено сгущение сетки.

² Под напряжением здесь и далее подразумевается интенсивность напряжений по Мизесу.

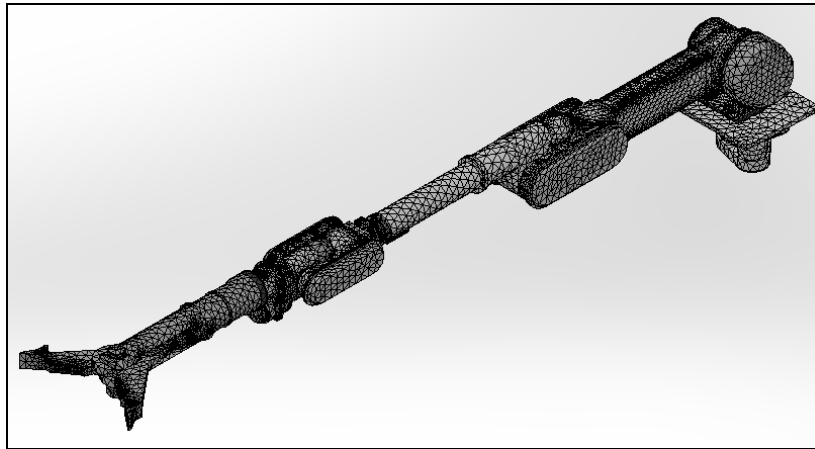
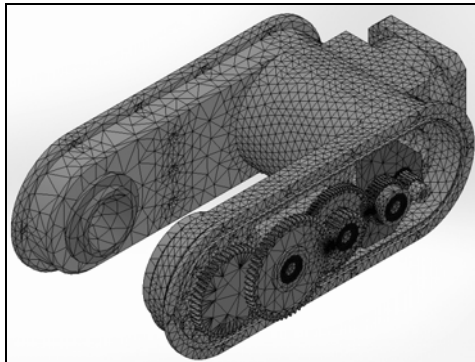
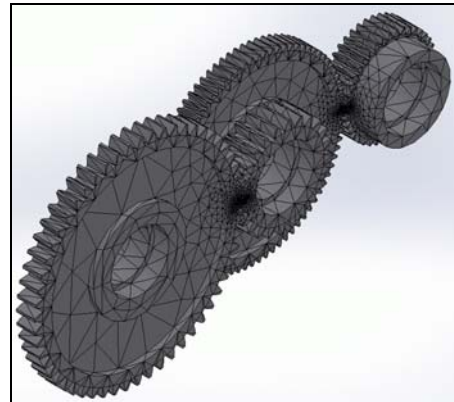


Рис. 2. Расчетная сетка

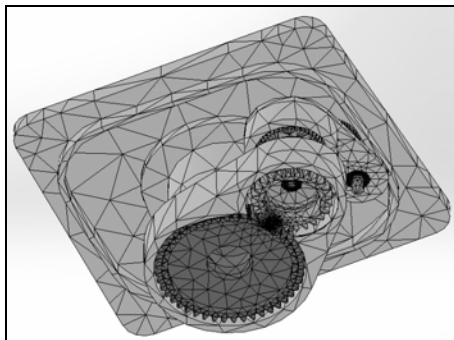


а)

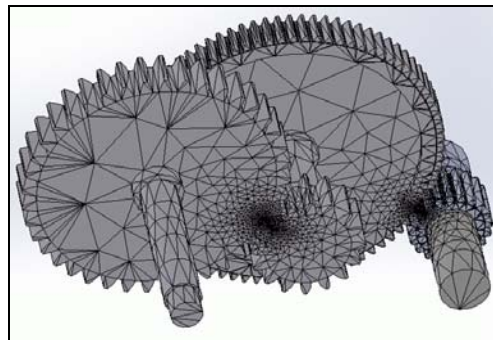


б)

Рис. 3. Расчетная сетка для узла качания (а) и для редуктора узла качания (б)



а)



б)

Рис. 4. Расчетная сетка для фрагмента основания (а) и для фрагмента редуктора основания (б)

Расчет НДС производится отдельно для каждой типовой конфигурации. Общей опцией является фиксация плиты основания (рассматриваются перемещения манипулятора относительно шасси).

Постановка задачи и результаты расчетов

Конструкция нагружена силой тяжести и горизонтальной силой, приложенной к губке резака перпендикулярно режущей кромке (рис. 5).

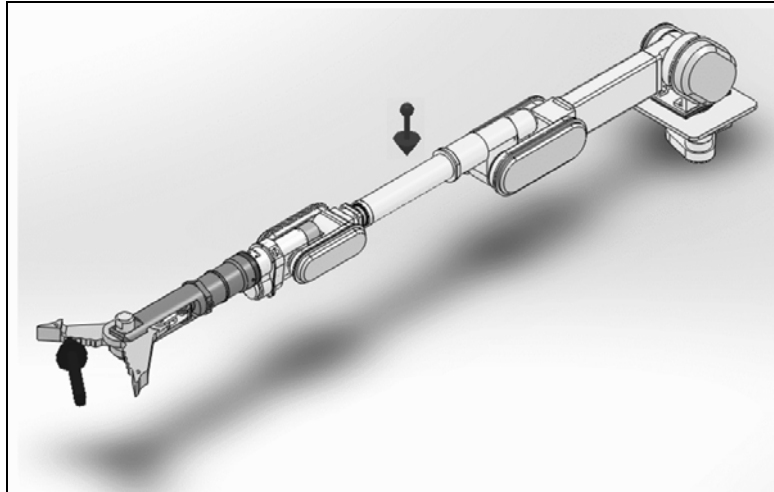


Рис. 5. Исследуемая типовая конфигурация манипулятора

Исполнительным устройством манипулятора в данной конфигурации является *резак*. Такое усилие возникает в начальный момент резки вертикальной цилиндрической трубы при одновременном касании губками поверхности трубы. Величина пробного усилия 100 Н.

Установлено, что зона максимального напряжения расположена в зацеплении колес планетарного редуктора (ПР) основания (рис. 6).

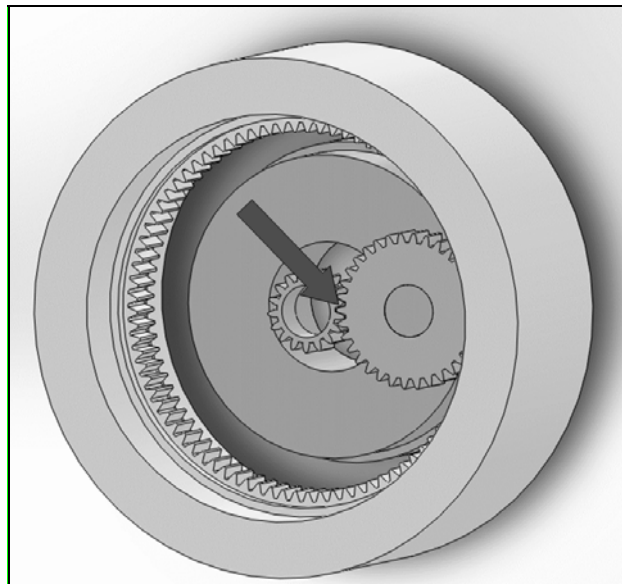


Рис. 6. Зона максимального напряжения — контактные зубья планетарного редуктора основания

Среднее напряжение на поверхности контактирующего зуба составляет 65 МПа, гравитация влияния на эту зону не оказывает, т.о. $k = 7.69$, следовательно, максимально допустимая для данной конструкции боковая нагрузка составляет 769 Н.

Далее представлены уровни напряжений в элементах конструкции в предельном состоянии.

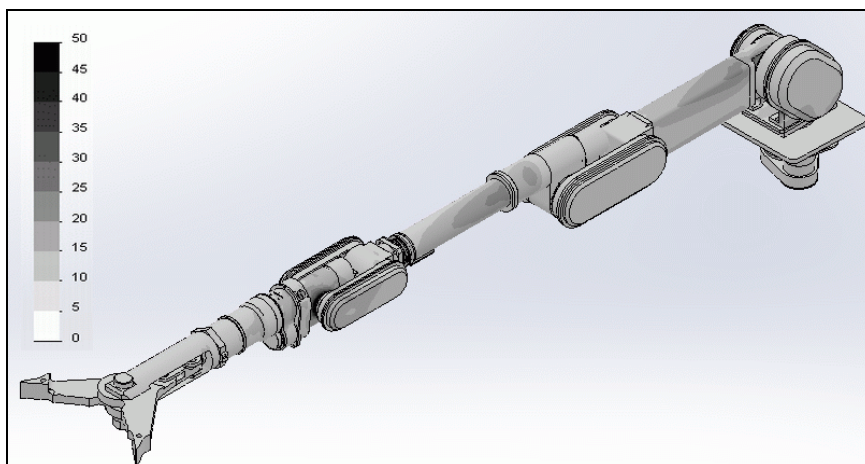


Рис. 7. Общий вид

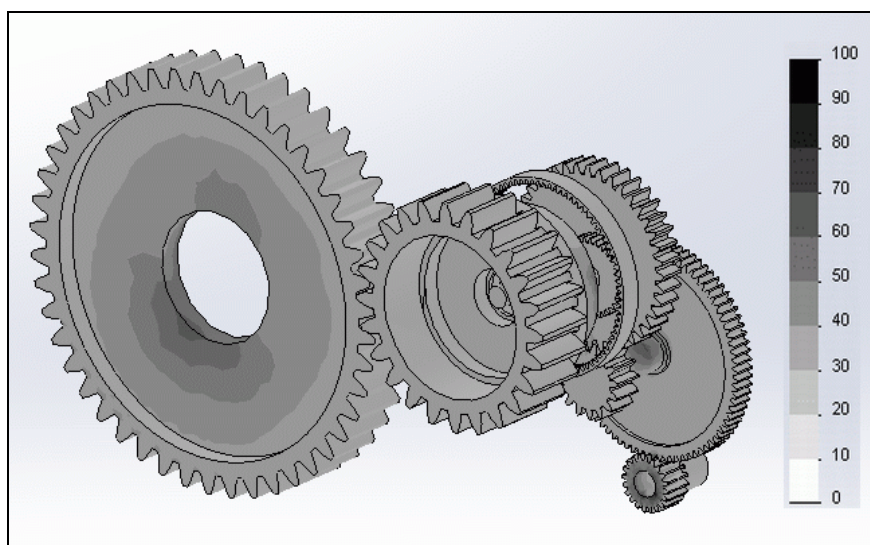


Рис. 8. Редуктор основания

Основную нагрузку принимает на себя ось сателлита ПР.

Заметные нагрузки на колесах обусловлены изгибом осей в результате кручения редуктора вокруг центрального корпуса. Значительная нагрузка на всем сателлитном колесе обусловлена изгибом его оси в результате вращения водила как вокруг своей оси, так и относительно неподвижных осей внутреннего каскада.

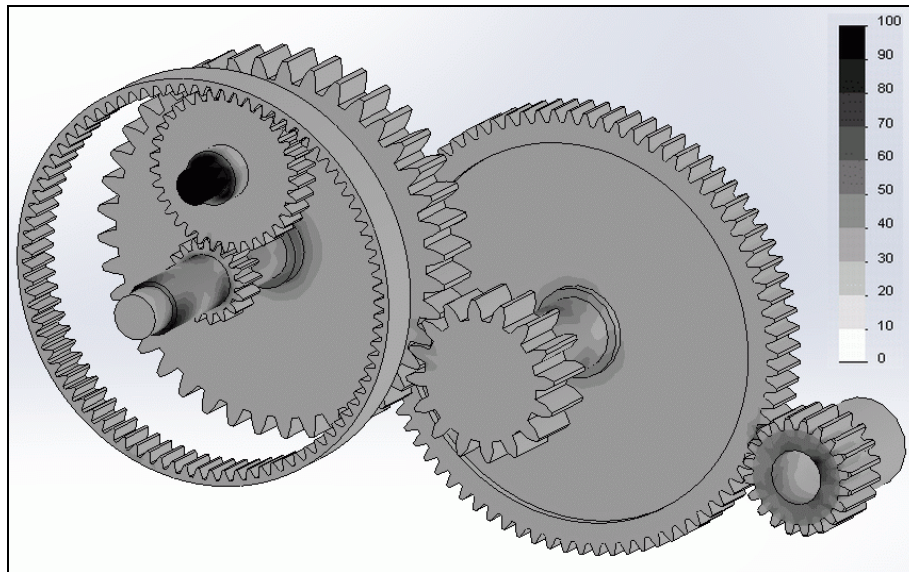


Рис. 9. Редуктор основания. Нижняя часть и ПР

Вертикально расположенные редукторы плеча, предплечья и узла качения не работают при боковой нагрузке. Незначительная нагрузка на неподвижное центральное колесо обусловлена деформированием корпусов. Сами редукторы узлов практически свободны от нагрузок.

Далее представлено распределение горизонтальных перемещений манипулятора под действием боковой нагрузки. При пробной нагрузке 100 Н получено $u_{\max} = 1.08$ мм. Перемещения, соответствующие предельному состоянию, определяются как: $u_{\lim} = k \cdot u$, поскольку гравитация не вызывает горизонтальных перемещений. Таким образом, при предельно допустимой нагрузке: $u_{\max} = 8.307$ мм.

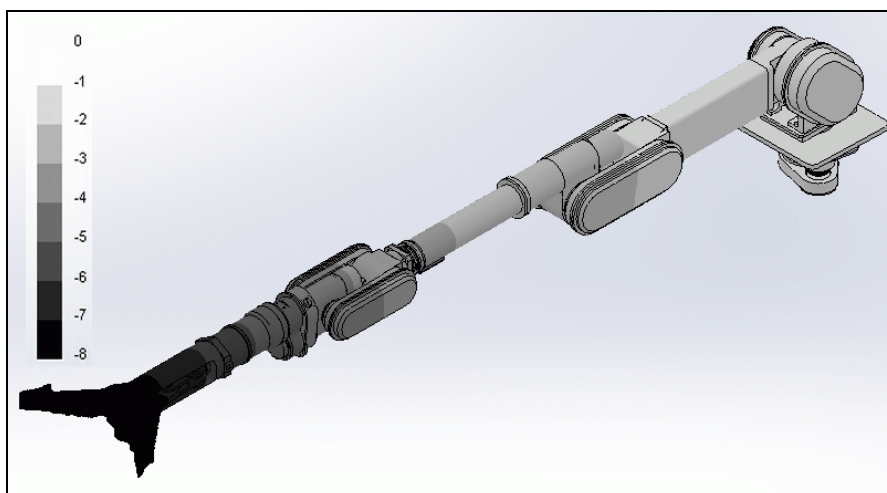


Рис. 10. Уровни горизонтальных перемещений в предельном состоянии

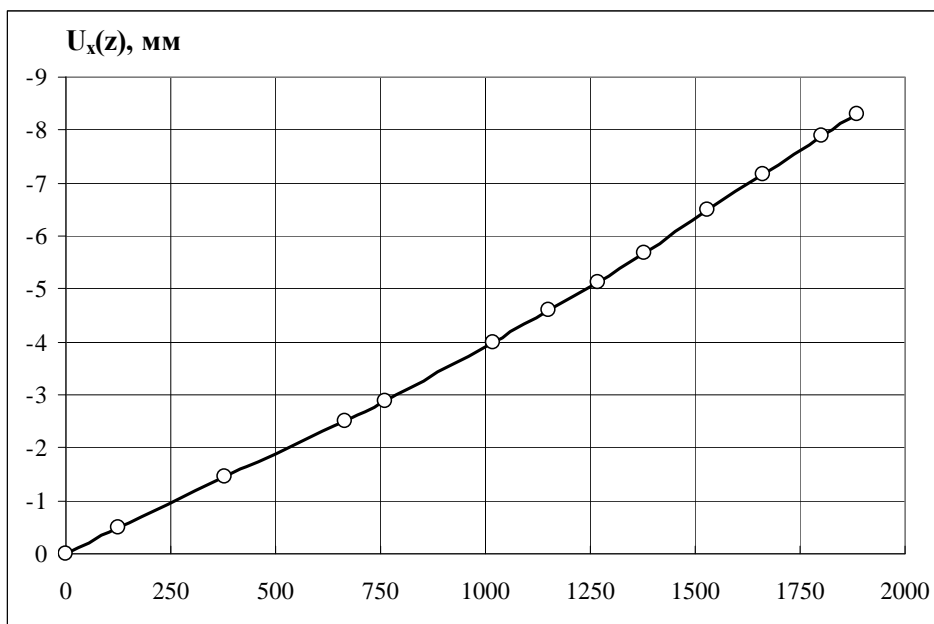


Рис. 11. Распределение горизонтальных перемещений вдоль оси манипулятора

Заключение

Построены пространственные геометрические, конечноэлементные и расчетные модели типовых конфигураций манипулятора робототехнического комплекса РТК. Проведены расчеты упругого напряженно-деформированного состояния и на этой основе определены предельно допустимые нагрузки для ряда технологических операций по локальному критерию пластичности. Полученные результаты могут послужить основой методики построения зон допустимых нагрузок для всего набора исполнительных устройств манипулятора и технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев А.Б., Никитин И.С., Якушев В.Л. Исследование предельных силовых воздействий на манипулятор робототехнического комплекса. Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация проектирования: Сб. статей / Под ред. А.С. Холодова. М.: МАКС Пресс. 2013. Вып. 3.
2. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Анализ напряженного состояния контактной системы «диск — лопатка» газотурбинного двигателя // Вычислительная механика сплошных сред. 2011. Т. 4. № 2. С. 5–16.
3. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 6. С. 22–33.
4. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 799 с.

Goydin O.P., Zhuravlev A.B., Kuraev E.V., Nikitin I.S., Yakushev V.L.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE ULTIMATE LOADING
OF THE ROBOTIC COMPLEX MANIPULATOR**

The second typical configuration of the robotic system is investigated, the location of the potential destruction zone and the value of the ultimate load are determined, the stress distributions of the elements of structures in the ultimate state are represented

The stress-strain state, robotic complex, manipulator of the robotic complex, the ultimate load.