

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149

**Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: anciferov.sergey@gmail.com

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье представлен инженерный анализ роботизированной ячейки. Рассматриваются определения CAD/CAM/CAE-системы. Представлены основные разработчики специализированного программного обеспечения для инженерного анализа, к которым относятся: Siemens PLM Software; ANSYS; Научно-технический центр «АПМ»; ТЕСИС; NUMECA. В современное время, конструкции и изделия эволюционировали с рекордным темпом, а это говорит о том, что их состав стал наиболее сложным и более эффективным. Инженерный анализ роботизированной ячейки выполняется в консолидированной платформе Simcenter 3D. Представленная платформа включает в себя огромный список CAE-приложений, с помощью которых есть возможность соответствовать современным требованиям, предъявляемым проектированию и совершенствованию изделий. Основными отраслями, которые используют программное обеспечение для структурного анализа, являются аэрокосмическая промышленность, машиностроение, медицина, робототехника и другие. В работе, описаны основные этапы инженерного анализа и что он под собой подразумевает. Вовремя подготовки к расчету была создана расчетная схема и были определены эксплуатационные нагрузки. Также назначен материал на основные элементы конструкции и направляющие с каретками. В конце инженерного анализа произведены расчеты коэффициентов прочности и жесткости. Сделаны обобщающие выводы, что расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

Ключевые слова: CAE, компьютерный дизайн, инженерный анализ, роботизированные ячейки, нагрузки, ограничения, Simcenter 3D, CAD/CAM/CAE-система.

Введение. В настоящее время из-за современных технологий, производство стало основываться на устоявшемся электронном дизайне, который позволяет ускорить процесс разработки нового и качественного изделия при этом снизить стоимость его изготовления. За счет компьютерного моделирования можно выбрать оптимальный дизайн изделия и уменьшить количество испытаний, заменив их тестированием виртуальной модели [1–5]. На сегодняшний день актуальной проблемой в разработке роботизированных ячеек необходимо специализированное программное обеспечение (ПО) для создания CAD-моделей (CAD – Computer Aided Design – система автоматизированного проектирования) всех узлов. Затем необходимо произвести численный анализ (CAE – Computer-Aided Engineering) полученной конструкции. В основном всегда CAD и CAE системы используются совместно, как взаимно дополняющие друг друга на различных этапах создания дизайна изделия [6–8].

Для инженерного анализа в роботизированной области применяют специализированное программное обеспечение, которое позволяет определить прочностные характеристики изделия. Главными разработчиками программного обеспечения для инженерного анализа, являются: Siemens PLM Software; ANSYS; Научно-

технический центр «АПМ»; ТЕСИС; NUMECA [6–8].

Сфера разработки конструкций и изделий за небольшой период эволюционировала с рекордным темпом. Конструкция большинства изделий стали более сложными. Они включают в себя не только механические компоненты, но и электронику, программное обеспечение (ПО) и различные датчики [9].

Большая часть компаний сталкивается с проблемами в инженерных отделах. Основная часть проблем начинается в области прочностных расчетов, так как растет сложность изделия и растут требования к безопасности и сертификации.

Комплексный подход подразумевает под собой плотное сотрудничество инженерных команд на всех этапах от создания CAD-моделей до подготовки CAE-моделей и осуществления расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС).

Также для определения наибольшей точности конструкции, необходимо подобрать материал и размер деталей в соответствии с требованиями к сертификации и провести огромное количество расчетов [10–12].

Методика. В современном мире мировым лидером в области CAD/CAM/CAE-систем считается компания Siemens. Для совершенствования практики создания изделия они разработали консолидированную платформу Simcenter 3D.

Он способствует эффективной работе со сборкой изделия, которая содержит различные компоненты. Simcenter 3D - это открытая среда, которая способна подключаться к внешним источникам данных и решателям, что позволяет ей интегрироваться в любой процесс разработки. Данная платформа включает в себя огромное количество CAE-приложений, которые позволяют соответствовать современным требованиям проектирования и совершенствования изделий, также при помощи нее можно решить такие проблемы, как [6, 7]:

- отсутствие интеграции и прозрачности рабочего процесса;
- недостаток необходимых знаний, которые препятствуют коллаборации;
- трата огромного количества времени для перестройки CAE-модели для каждого изделия из сборки;
- достаточно высокая стоимость лицензирования, которая образуется из-за применения множества других инструментов.

При выполнении инженерного анализа в данной работе используется CAD/CAM/CAE-система NX [6, 7].

При проектировании оборудования необходимо произвести статический анализ конструкции на прочность и жесткость, так как основной задачей является убедиться в надёжности изделия. В данном расчете рассматривается конструкция гибкой производственной платформы

роботизированной системы. Установка представляет собой стойку, состоящую из тележки и опоры, приваренную к ней, соединённую с колонной при помощи болтового соединения, на которой находится тележка с роботом KUKA. Первоначально необходимо определить эксплуатационные нагрузки, действующие на данную конструкцию [13–15].

Эксплуатационные нагрузки – это комплекс нагрузок, которым подвергается материал, изделие или конструкция в процессе эксплуатации.

1. На платформу действует сила, происходящая от собственного веса – сила тяжести, вектор которой направлен строго вниз, и прикладывается к центру масс конструкции. Значение данной силы определяется с помощью инструмента «Измерение» CAD/CAM/CAE – системы NX. Для более точного определения значения, при создании ЭЦМ были заданы материалы на все детали. Исходя из рисунка 1, значение веса конструкции приблизительно равно 8244 Н.

2. Вес робота KUKA также является эксплуатационной нагрузкой. KUKA KR 16 R2010 – это 6-осевой робот (робот-манипулятор), работающий с нагрузкой до 16 кг на дистанции до 2013 мм. Повторяемость KUKA KR 16 R2010 составляет 0,04 мм, а масса робота равна 255 кг. Соответственно значение веса робота с навесным оборудованием приблизительно равно 2600 Н. Вектор силы прикладывается к центру масс робота KUKA и направлен строго вниз.

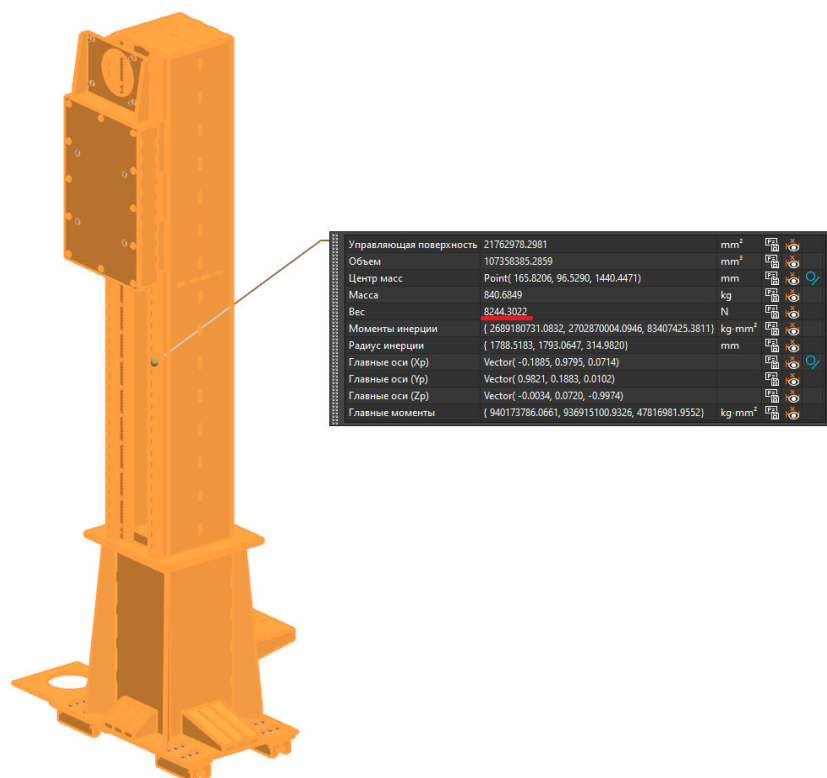


Рис. 1. Вес роботизированной ячейки

3. На тележку стойки и тележку робота действует такая эксплуатационная сила, как вес мотор-редуктора. Мотор-редуктор GUDEL HPG используются в машиностроении, технологии обработки и различных технологических процессов, и характеризуется высоким качеством, длительным сроком службы и минимальными требованиями к обслуживанию. Сила, происходящая от веса принятой модели (HPG120-C1-60), согласно паспорту, равна 500Н, вектор которой направлен строго вниз.

4. Вес блока, системы противовеса и катушки с проволокой также являются эксплуатационными нагрузками и рассчитываются в соответствии со своими массами. Блок расположен на верхнем листе конструкции стойки и его вес распределённо «давит» на всю площадь грани. Система противовеса крепится с помощью болтового соединения к задней грани стойки. Сила, происходящая от веса катушки с проволокой, равномерно распределяется по подставке, пред-

назначенной для неё. Значение веса блока, системы противовеса и катушки: 300Н, 2300Н и 3000Н соответственно.

5. Также при движении тележки стойки или тележки робота возникает сила от мгновенного ускорения робота KUKA, которую можно рассчитать по формуле:

$$F = m \cdot a; \quad (1)$$

где m – масса конструкции роботизированной ячейки, кг;

a – ускорение, действующее на конструкцию, м/с.

Соответственно:

$$F = 260 \cdot 1 = 260 \text{ Н.}$$

Вектор действия силы прикладывается к центру масс робота KUKA, и противоположно направлен к вектору ускорения элемента конструкции роботизированной ячейки.

Наименование, обозначение и значение всех эксплуатационных нагрузок, действующих на конструкцию роботизированной ячейки, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эксплуатационные нагрузки

№	Наименование	Обозначение	Значение, Н
1	Собственный вес конструкции	F1	8244
2	Вес робота KUKA	F2	2600
3	Вес мотор-редуктора	F3	500
4	Вес блока	F4	300
5	Вес системы противовеса	F5	2300
6	Вес катушки с проволокой	F6	3000
7	Сила от мгновенного ускорения*	F7	260

* – вектор силы инерции принимает направление в соответствии с направлением движения тумбы и тележки робота, которая зависит от рассматриваемого случая.

Основная часть. После определения эксплуатационных нагрузок начинается следующий этап структурного анализа является разработка расчётной схемы роботизированной ячейки.

Расчетная схема – это упрощенная, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности объекта, определяющие его поведение под нагрузкой.

На рисунке 2 представлена расчётная схема роботизированной ячейки, из которой видно:

1. Конструкция ячейки жестко закреплена нижней частью кареток, а именно поверхностями соприкасаемые с направляющими.

2. С помощью функционала CAD/CAM/CAE – системы NX были определены центры масс робота KUKA и системы противовеса, и к ним, соответственно, заданы силы, такие как вес робота KUKA, вес системы противовеса и сила от мгновенного ускорения робота.

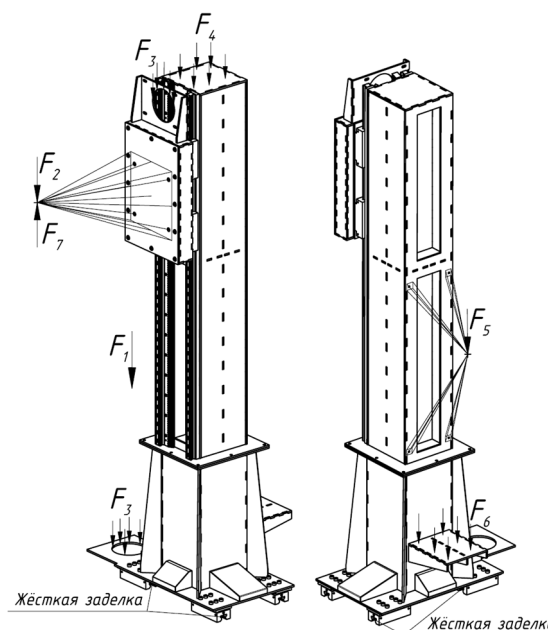


Рис. 2. Расчетная схема

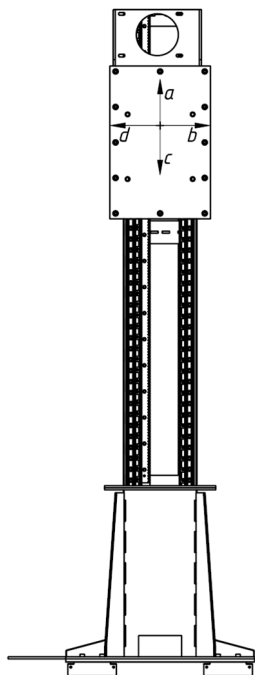


Рис. 3. Направление векторов силы от мгновенного ускорения элементов.

3. Также был определён центр масс всей конструкции, и задан вес роботизированной ячейки.

4. Вес мотор-редуктора задаётся распределённой силой к посадочным поверхностям тележки робота и тележки стойки, вектор которой направлен строго вниз.

Также в ходе расчета необходимо рассмотреть несколько случаев нагружения конструкции роботизированной ячейки, которые зависят от направления движения тележки робота и тележки стойки. В данном случае выбраны:

- для тележки робота направления вверх и вниз;
- для тележки стойки направления влево и вправо.

Вектор силы от мгновенного ускорения робота KUKA направлен противоположно направлению движения элементов конструкции, соответственно рассмотрим следующие случаи нагружения (рис. 3):

- 1) конструкция находится в неподвижном состоянии, сила не действует;
- 2) тележка робота движется вниз, вектор силы сонаправлен с вектором \bar{a} ;
- 3) тележка робота движется вверх, вектор силы сонаправлен с вектором \bar{c} ;
- 4) тележка стойки движется влево, вектор силы сонаправлен с вектором \bar{b} ;
- 5) тележка робота движется вниз, вектор силы сонаправлен с вектором \bar{d} ;

Таким образом, было определено 5 основных расчетных случаев нагружения роботизированной ячейки с целью наиболее точного определения прочностных показателей конструкции.

Следующим этапом структурного анализа является разработка конечно-элементной сборки с помощью функционала приложения «Пре/пост-процессор» в CAD/CAM/CAE – системе NX.

Адекватность расчета во многом зависит от назначенных материалов, так как физико-механические свойства напрямую влияют на результаты анализа. Соответственно, первым этапом является назначение материалов на детали конструкции (рис. 4).

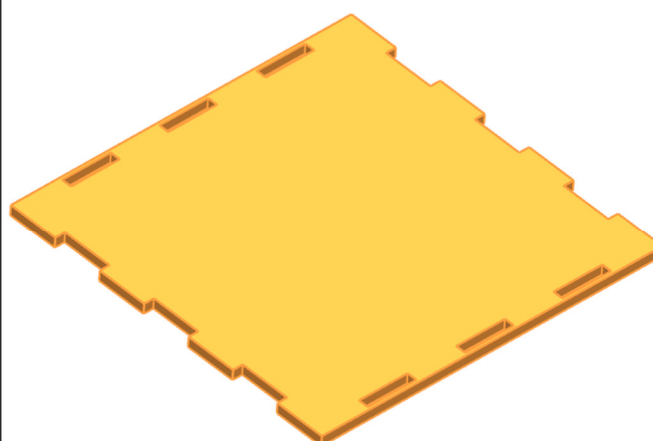
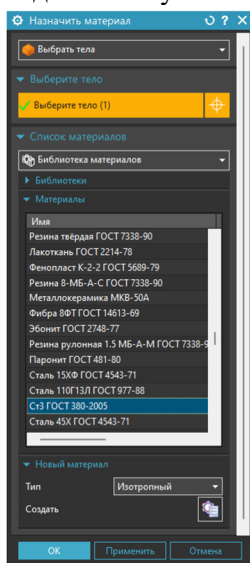


Рис. 4. Назначение материала

Все основные несущие элементы роботизированной ячейки изготавливаются из Ст3, но такие детали, как направляющая и каретка изготавливаются из антикоррозийной нержавеющей

стали – AISI 304 (08X18H10T). В таблице 2 приведены основные физико-механические свойства стали Ст3.

Таблица 2
Физико-механические свойства стали Ст3

Наименование параметра	Значение параметра
Массовая плотность, кг/м ³	7800
Модуль Юнга, МПа	200000
Коэффициент Пуассона	0,27
Предел текучести, МПа	390
Предел прочности на растяжение, МПа	530

Следующим этапом разработки является идеализация (упрощение) геометрии деталей конструкции. Она необходима для того, чтобы исключить маловлияющие на процесс расчёта конструктивные элементы деталей в пользу сокращения времени анализа.

После назначения материала и идеализации геометрии необходимо создать таблицу физических свойств и коллектор сеток (рис. 5). Коллектор сеток содержит информацию о физических свойствах, параметрах отображения сетки, и назначает соответствие типа конечного элемента таблице физических свойств (рис. 6).

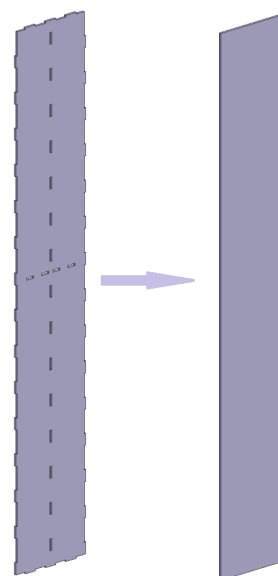


Рис. 5. Идеализация геометрии

Следующим этапом необходимо задать конечно-элементную сетку. В данном анализе в большинстве случаев была выбрана 3D гексаэдральная сетка, так как детали имеют «простую» геометрию (рис. 7).

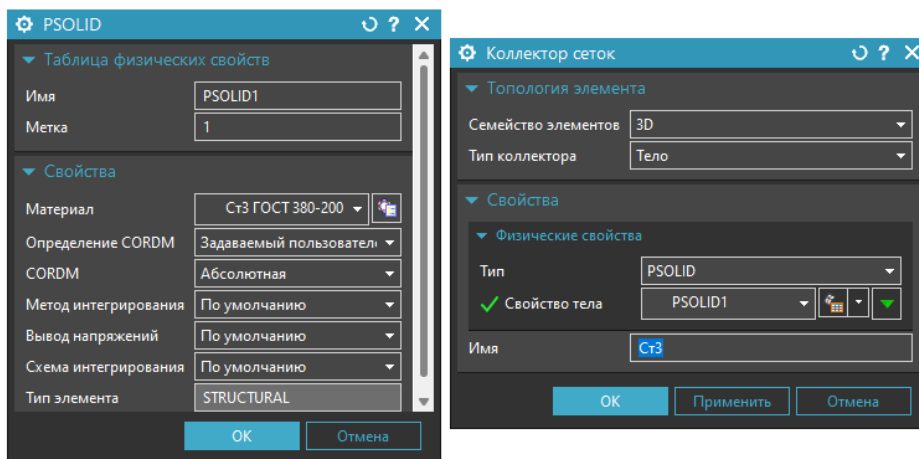


Рис. 6. Создание таблицы физических свойств и коллектора сеток

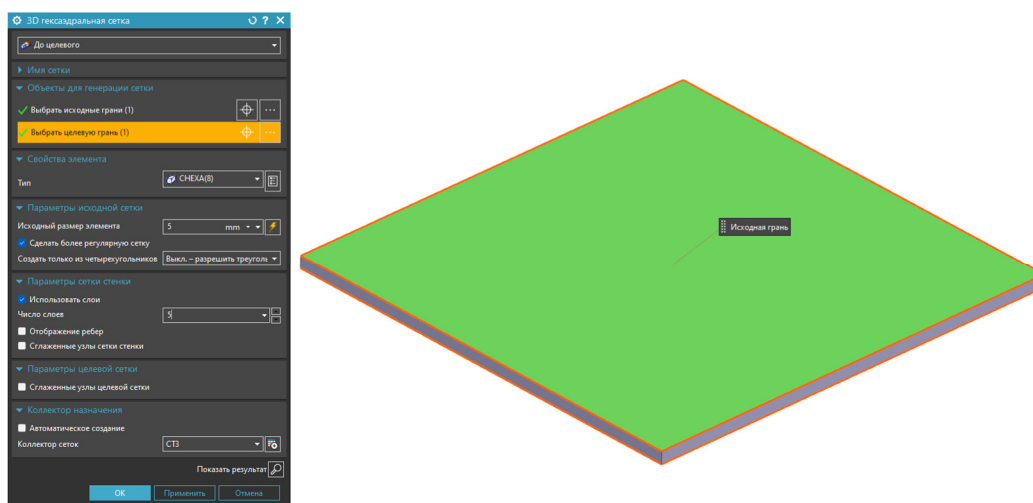


Рис. 7. Создание конечно-элементной сетки

Аналогичным образом создаются КЭ модели остальных компонентов сборки.

Затем создается конечно-элементная сборка, в которую добавляются созданные ранее КЭ модели (рис. 8).

Важным этапом разработки данной конечно-элементной сборки является создание универсального соединения «Сосредоточенная масса» (рис. 9) и 1D соединения между центром масс робота KUKA и гранью тележки робота (рис. 10). Также 1D соединение было задано между центром масс системы противовеса и стойкой.

Когда КЭ-сборка готова, создается набор данных расчетной модели. При создании расчетной модели основными шагами является задание условий контактного взаимодействия между компонентами, ограничений и нагрузок.

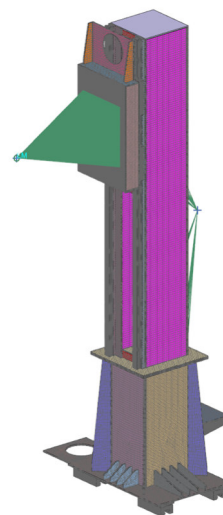


Рис. 8. Конечно-элементная сборка роботизированной ячейки

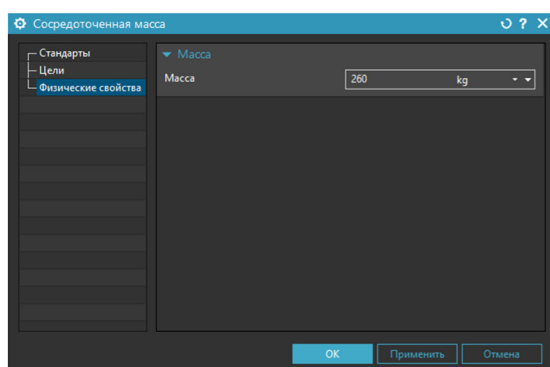


Рис. 9. Универсальное соединение «Сосредоточенная масса»

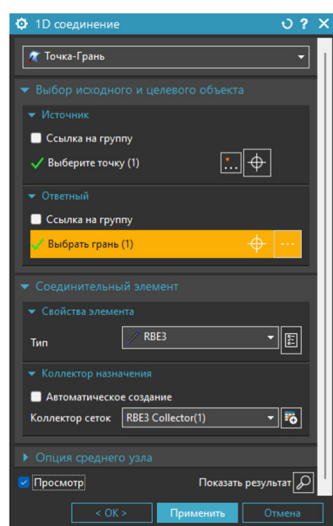
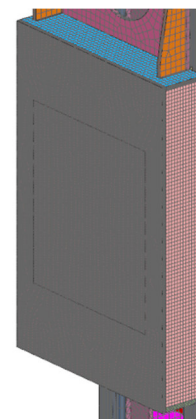
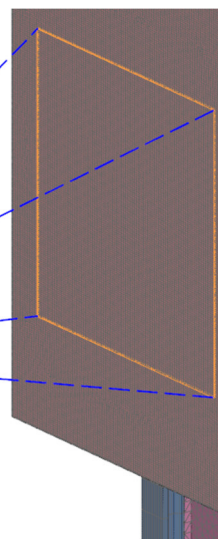


Рис. 10. 1D соединение



При задании условий контактного взаимодействия между компонентами используется команда «Склеивание поверхности с поверхностью» и «Контакт поверхности с поверхностью» (рис. 11). Склеивание позволяет моделировать поведение конструкции с условием соединения

компонентов между собой за счет сварки. Контакт поверхностей позволяет моделировать поведение конструкции за счет передачи нагрузки от одного тела к другому через контактирующие поверхности, с учетом сил трения (рис. 12).

Затем задаются ограничения, ограничивающие количество степеней свободы сборки. В данном решении с помощью команды «Заделка»

ограничиваются грани кареток, касающиеся направляющих (рис. 13).

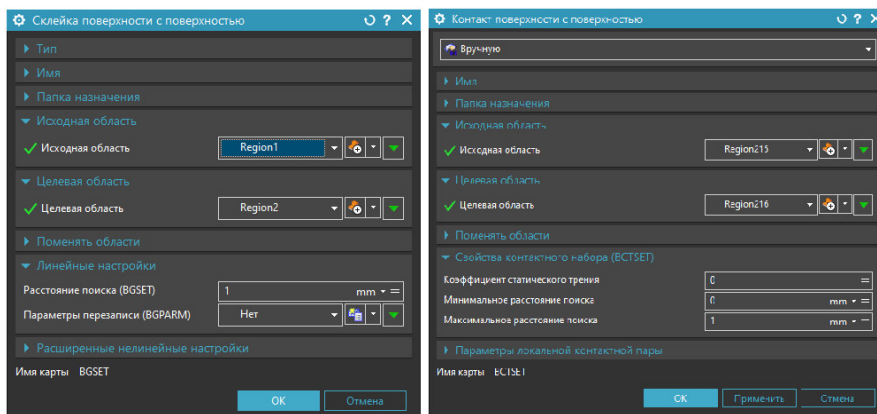


Рис. 11. Команды склейка и контакт поверхности с поверхностью

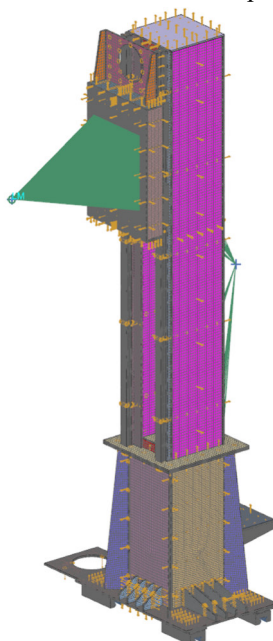


Рис. 12. Результат задания условий контактного взаимодействия

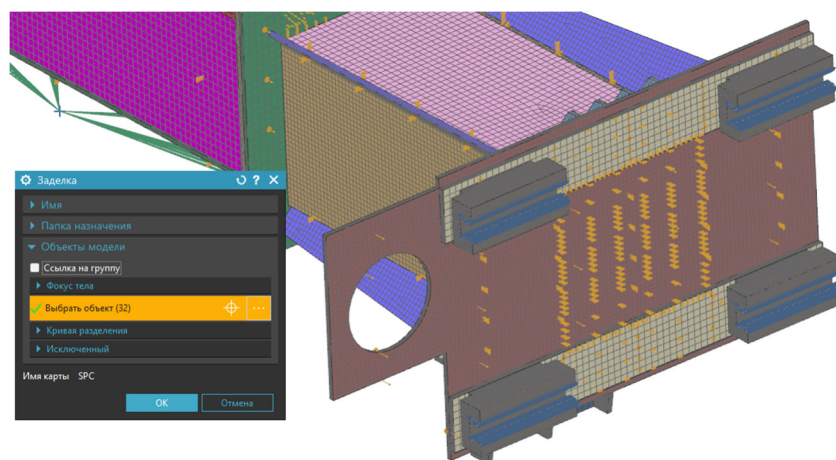
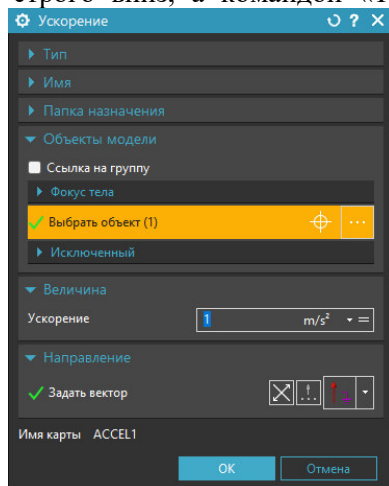


Рис. 13. Задание ограничения «Фиксация»

С помощью команды «Тип нагрузки: Сила» задается нагрузка от веса мотор-редукторов, блока, системы противовесов и веса катушки с

проволокой. Также командой «Тип нагрузки: Сила тяжести» задаётся нагрузка от веса кон-

струкции роботизированной ячейки, вектор которой направлен строго вниз, а командой «Тип



нагрузки: Ускорение» задаётся сила от мгновенного ускорения робота KUKA (рис. 14).

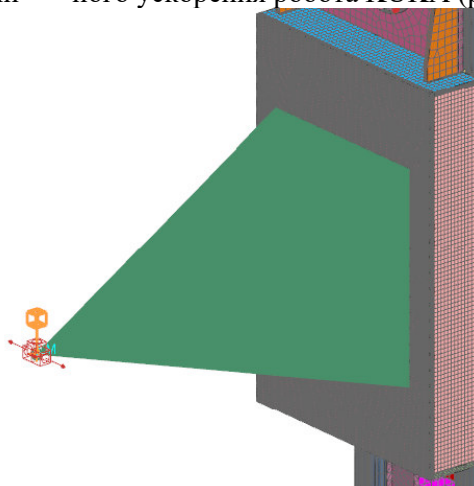


Рис. 14. Задание нагрузки «Ускорение»

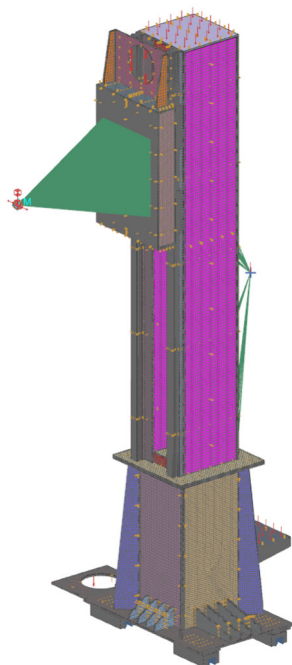


Рис. 15. Финальный вид КЭ сборки

Для того, чтобы сделать вывод о работоспособности конструкции (рис. 15) при выбранных ограничениях и нагрузках, необходимо произвести проверку условий прочности и жесткости. Для этого были рассмотрены результаты случая расчёта с наибольшим значением напряжений и перемещений, а именно случая, при котором вектор силы от мгновенного ускорения робота KUKA направлен горизонтально влево.

На рисунке 16 представлена диаграмма распределения напряжений в конструкции роботизированной ячейки, из которой видно, что максимальное значение напряжений находится в области соприкосновения каретки тележки робота и направляющей стойки, а значение составляет

26,24 МПа. На рисунке 17 представлена диаграмма распределения перемещений в конструкции роботизированной ячейки, из которой видно, что максимальное значение перемещений находится в области посадочной поверхности тележки стойки и составляет 0,439 мм.

Условие прочности предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n]; \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса прочности; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для выбранного материала, σ_{\max} – максимальные расчетные напряжения, $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 1 \dots 2$.

Условия жесткости есть сравнение максимальных перемещений с допускаемыми:

$$\delta_{\max} \leq [\delta]; \quad (2)$$

где δ_{\max} – максимальные расчетные перемещения, $[\delta]$ – допускаемые перемещения.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot a; \quad (3)$$

где a – габаритный размер конструкции.

$$n = \frac{205}{26,24} = 7,8;$$

$$7,8 < 4,7.$$

Условие прочности выполняется.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 1175 = 4,7;$$

$$0,439 < 4,7.$$

Условие жесткости выполняется.

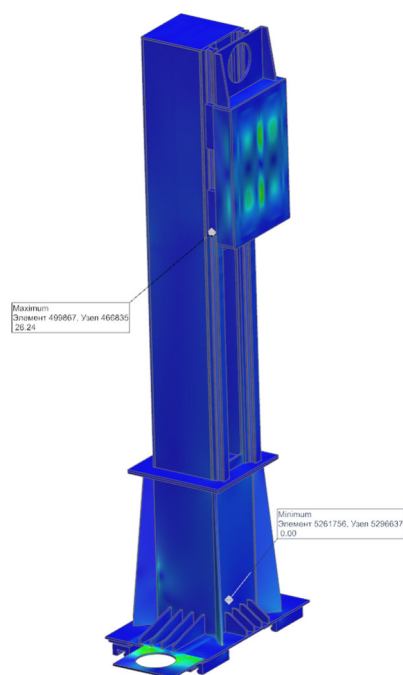


Рис. 16. Диаграмма распределения напряжения по Мизесу

Выводы. В статье был рассмотрен структурный анализ роботизированной ячейки. Интеграция его в жизненный цикл изделия, позволяет выпускать инновационные изделия в срок и с требуемыми характеристиками. Был выполнен структурный анализ роботизированной ячейки, проанализировав который, можно сделать вывод, что коэффициент запаса прочности и жесткости конструкции полностью удовлетворяет предельным условиям, а это означает, что конструкция работоспособна.

Полученные в статье расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы для верификации более сложных математических моделей.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белецкая С.Ю., Иевлев П.В., Муратов А.В., Тураева Т.Л., Турецкий А.В., Худяков Ю.В. Средства инженерного анализа конструкций радиоэлектронных модулей третьего уровня // НиКа. 2017. №. 2. С. 2–4.
2. Лоборева Л.А. Программное обеспечение ОЛР промышленных роботов-манипуляторов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2018. №4. С 108–116.

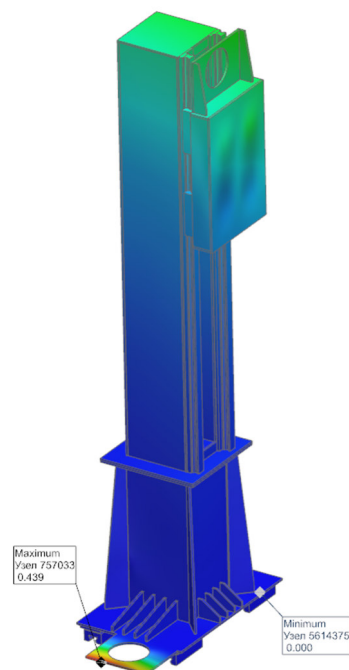


Рис. 17. Диаграмма распределения перемещений

3. Шагисултанова Ю.Н., Панфилов А.В.К вопросу о структурном анализе сооружений для формирования расчётной конструктивной схемы // Мир науки. Педагогика и психология. 2022. № 6. С. 1–12.

4. Тимофеев Г.А., Самсоненко Д.М. Структурный анализ ромбического механизма с развитым шатуном рабочей группы двигателя стирлинга // Известия вузов. Машиностроение. 2021. №8 (737). С. 20–26. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-20-26

5. Божко А.Н. Структурный анализ машиностроительных конструкций. Перебазирование и линеаризация // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. 2018. № 2. С. 28–34.

6. Павлов С. Системы электронного и электротехнического проектирования в 2015 году: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2016. № 3 (103). С. 6–17.

7. Павлов С.И. САЕ-технологии в 2015 году: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2016. №4 (104). С. 6–16.

8. Kodirov Nodirbek, Mirzahidova Ozoda Finite Element Analysis of Track Structure // Univer-sum: технические науки. 2022. № 9-5(102). Рр. 46–49.

9. Бергер Ф., Такер С. Интегрированный инжиниринг и анализ авиационных конструкций //

Машиностроение и смежные отрасли. 2018. № 2 (119). С. 25–31.

10. Md Nahid Hasan, MA Muktadir, Manjurul Alam. Comparative study of tapered shape bimorph piezoelectric energy harvester via finite element analysis // Force in Mechanics. 2022. № 9. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100131

11. Yachong Xu, Yan Zhuge, Md. Rajibul Karim. Structural analysis of a 3D dry-stack tyre wall by finite-discrete element method // Engineering Structures. 2023. № 281. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.11578

12. James D.S. Hooton, David E.P. Gonçalves, Carlos M.C.G. Fernandes. Experiments and finite element analysis on a hybrid polymer gear rack // Mechanism and Machine Theory. 2023. № 186. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105363

13. Fernandes C.M., Rocha D.M., Martins R.C. Finite element method model to predict bulk and flash temperatures on polymer gears. Tribol. 2018 № 120. Pp 255–268. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.027

14. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M., Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case studies in construction materials. 2023. № 19. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02360

15. Yongqiang Chen, Zhaoguo Ye, Zhuanzhe Zhao. Design and simulation analysis of physical heat dissipation structure for welding robot controller // Results in Physics. 2023. № 54. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107056

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Сычёв Евгений Андреевич, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.syhov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Литвишко Александр Александрович, магистр кафедры «Механическое оборудование». E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила в 20.10.2023 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А., 2023

**Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

ENGINEERING ANALYSIS OF A ROBOTIC CELL OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION

Abstract. *The article presents an engineering analysis of a robotic cell. Definitions of CAD/CAM/CAE systems are considered. The main developers of specialized software for engineering analysis are presented, which include: Siemens PLM Software; ANSYS; APM Scientific and Technical Center; TESIS; NUMECA. In modern times, designs and products have evolved at a record pace, and this suggests that their composition has become the most complex and more effective. The engineering analysis of the robotic cell is performed in the consolidated Simcenter 3D platform. The presented platform includes a huge list of CAE applications, which allows meeting modern requirements for the design and improvement of products. The main industries that use software for structural analysis are the aerospace industry, mechanical engineering, medicine, robotics and others. The paper describes the main stages of engineering analysis and what it implies. During preparing for the calculation, a calculation scheme is created and operational loads are determined. The material is also assigned to the main structural elements and guides with carriages. At the end of the engineering*

analysis, the strength and stiffness coefficients are calculated. The conclusions are generalized that the calculated and experimental data can be used to verify more complex mathematical models.

Keywords: CAE, computer design, engineering analysis, robotic cells, loads, constraints, Simcenter 3D, CAD/CAM/CAE-system.

REFERENCES

1. Beletskaya S.Yu., Ievlev P.V., Muratov A.V., Turaeva T.L., Turk A.V., Khudyakov Yu.V. Means of engineering analysis of designs of radio-electronic modules of the third level [Sredstva inzhenernogo analiza konstrukcij radioelektronnykh modulej tret'ego urovnya]. NiKa. 2017. No. 2. Pp. 2–4. (rus)
2. Lobareva L.A. Software for OLP industrial robot manipulators [Programmnoe obespechenie OLP promyshlennykh robotov-manipulyatorov]. Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences. 2018. No. 4. Pp. 108–116. (rus)
3. Shagisultanova Yu.N., Panfilov A.V. On the question of structural analysis of structures for the formation of a design design scheme [K voprosu o strukturnom analize sooruzhenij dlya formirovaniya raschyotnoj konstruktivnoj skhemy]. Mir nauki. Pedagogy and Psychology. 2022. No. 6. Pp. 1–12. (rus)
4. Timofeev G.A., Samsonenko D.M. Structural analysis of a rhombic mechanism with a broken connecting rod of the Stirling engine working group [Strukturnyj analiz rombicheskogo mekhanizma s razvitym shatunom rabochej gruppy dvigatelya stirlinga]. News of universities. Mechanical Engineering. 2021. No. 8 (737). Pp. 20–26. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-20-26. (rus)
5. Bozhko A. N. Structural analysis of machine-building structures. Rebasng and linearization [Strukturnyj analiz mashinostroitel'nykh konstrukcij. Perebazirovanie i linearizaciya]. Management systems for the full life cycle of high-tech products in mechanical engineering: New sources of growth. 2018. No. 2. Pp. 28–34. (rus)
6. Pavlov S. Systems of electronic and electro-technical design in 2015: review of achievements and market analysis [Sistemy elektronnoho i elektrotekhnicheskogo proektirovaniya v 2015 godu: obzor dostizhenij i analiz rynka]. CAD/CAM/CAE Observer. 2016. No. 3 (103). Pp. 6–17. (rus)
7. Pavlov S.I. CAE-technologies in 2015: review of achievements and market analysis [CAE-tekhnologii v 2015 godu: obzor dostizhenij i analiz rynka]. CAD/CAM/CAE Observer. 2016. No.4 (104). Pp. 6–16. (rus)
8. Kodirov Nodirbek, Mirzahidova Ozoda Finite Element Analysis of Track Structure. Univer-sum: technical science. 2022. No. 9-5 (102). Pp. 46–49.
9. Berger F., Tucker S. Integrated engineering and analysis of aircraft structures [Integrirovannyj inzhiniring i analiz aviacionnykh konstrukcij]. Mechanical engineering and related industries. 2018. No. 2 (119). Pp. 25–31. (rus)
10. Md Nahid Hasan, MA Muktadir, Manjurul Alam. Comparative study of tapered shape bimorph piezoelectric energy harvester via finite element analysis. Force in Mechanics. 2022. No. 9. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100131
11. Yachong Xu, Yan Zhuge, Md. Rajibul Karim. Structural analysis of a 3D dry-stack tyre wall by finite-discrete element method. Engineering Structures. 2023. No. 281. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.11578
12. James D.S. Hooton, David E.P. Gonçalves, Carlos M.C.G. Fernandes. Experiments and finite element analysis on a hybrid polymer gear rack. Mechanism and Machine Theory. 2023. Vol. 186. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105363
13. Fernandes C.M., Rocha D.M., Martins R.C. Finite element method model to predict bulk and flash temperatures on polymer gears. Tribol. 2018. No. 120. Pp. 255–268. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.027
14. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M., Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure. Case studies in construction materials. 2023. No. 19. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02360
15. Yongqiang Chen, Zhaoguo Ye, Zhuanzhe Zhao. Design and simulation analysis of physical heat dissipation structure for welding robot controller. Results in Physics. 2023. No. 54. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.107056

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Sychev, Evgeniy A. Post-graduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Litvishko, Alexander A. Master of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: alex.litvishko@bk.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 20.10.2023

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Сычев Е.А., Литвишко А.А. Инженерный анализ роботизированной ячейки машиностроительного производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 138–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Sychev E.A., Litvishko A.A. Engineering analysis of a robotic cell of machine-building production. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 138–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-138-149