

УДК 621.6-52

UDC 621.6-52

05.00.00 Технические науки

Technical science

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
НАДЕЖНОСТИ ЗВЕНА ГИБКОГО  
МАНИПУЛЯТОРА МЕТОДОМ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**DEFINITION OF INDICATORS OF  
RELIABILITY OF THE LINK OF THE  
FLEXIBLE MANIPULATOR USING THE  
METHOD OF IMITATING MODELING**

Сидыганов Юрий Николаевич  
д.т.н., профессор

Sidyganov Yuri Nikolaevich  
Dr.Sci.Tech., professor

Онучин Евгений Михайлович  
к.т.н., доцент

Onyuchin Evgeniy Mikhailovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Осташенков Алексей Петрович  
аспирант

Ostashenkov Aleksey Petrovich  
Cand.Tech.Sci

Медяков Андрей Андреевич  
к.т.н., доцент

Medyakov Andrey Andreevich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Семенов Константин Денисович  
аспирант  
*Поволжский государственный технологический  
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Semenov Konstantin Denisovich  
Postgraduate student  
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,  
Russia*

В работе представлена математическая модель надежности гибкого манипуляционного робота, устанавливающая взаимосвязь между конструктивными параметрами отдельных элементов секции гибкого манипуляционного робота и показателями надежности секции в целом

The article presents a mathematical model of the reliability of the flexible robotic manipulator, which establishes the relationship between the design parameters of the individual elements of the flexible section of the handling robot and the indicators of reliability section

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ, ЗВЕНО,  
 ГИБКИЙ МАНИПУЛЯТОР, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: RELIABILITY, LINK, FLEXIBLE  
 MANIPULATOR, SIMULATION

**Введение**

Гибкий манипулятор – механизм для управления пространственным положением орудий, объектов труда, конструкционных узлов и элементов в соответствии с заданным технологическим процессом. Исполнительный орган гибкого манипулятора (манипулятора с управляемым изгибом) имеет сложную структуру, состоящую из множества звеньев. Звенья системы выполняют заведомо не жесткими, а упругими. Управляющее воздействие определяет нагружение звена, преобладающее над всеми остальными видами нагрузок, передаваемых звеном, и соответственно его деформацию, за счет которой меняется конфигурация манипуляционной системы [1]. Работа манипуляционных роботов с управляемой

деформацией основана на управлении изменением конфигурации статического равновесия упругого звена. Общим свойством гибких манипуляторов является то, что за счет управляемого изменения пространственной конфигурации отдельных звеньев осуществляется перемещение захвата или рабочего инструмента в пространстве [2]. Это определяет принципиальные преимущества манипуляторов с управляемым изгибом по сравнению с манипуляторами других классов (с жесткими звеньями, с использованием звеньев с контролируемой деформацией):

–меньшее количество звеньев для обеспечения эквивалентного количества степеней свободы;

–способность «обхватывать» объект [3].

Принципиальные преимущества манипуляторов с управляемым изгибом обуславливают перспективность применения данных устройств в промышленном производстве, что, в свою очередь, диктует необходимость повышения надежности манипуляторов [4]. Это требует разработки методики математического моделирования надежности гибких манипуляционных роботов.

**Предметом исследований** являются качественные и количественные закономерности и зависимости, связывающие конструктивные параметры отдельных элементов звена гибкого манипуляционного робота и показатели надежности звена в целом.

**Цель:** разработка математической модели надёжности гибкого манипуляционного робота.

**Задачи работы:**

–моделирование надежности элементов звена гибкого манипуляционного робота;

–моделирование надежности звена гибкого манипуляционного робота.

Исходя из цели моделирования надежности гибкого манипуляционного робота, была разработана методика, позволяющая оценить надежность элементов манипулятора при изменении их конструкции, материалов, условий эксплуатации, а также выявить оптимальные конструктивные решения [5]. Последнее достигается за счет использования методов моделирования сложных систем, в частности, изолированного рассмотрения моделей отказов отдельных элементов. При этом возможна оценка вклада отдельных изделий в надёжность всего манипуляционного робота. Кроме того использование данного подхода позволило учесть различную природу отказов и характер процессов, протекающих в элементах гибкого манипулятора.

В рамках моделирования надежности гибкого манипуляционного робота рассматриваются две модели надёжности: «нагрузка – прочность» и «параметр – поле допуска» [6]. В связи с тем, что начальные значения характеристик элементов манипулятора, а также динамика их изменения в процессе эксплуатации являются случайными величинами, при моделировании надежности были применены методы статистического имитационного моделирования. В частности был применен метод Монте-Карло [7]. При моделировании надежности гибкого манипулятора проводился многократный расчет выбранных определяющих параметров по функциональным зависимостям, описывающим процесс потери работоспособности манипулятора (его элементов). Причем учет случайных воздействующих факторов осуществлялся путем введения соответствующих аргументов, значения которых перебирались в соответствии с их законами распределения. Каждое статистическое испытание заключалось в выявлении одной из реализаций случайного процесса потери работоспособности манипуляционного робота. При этом совокупность испытаний использовалась для оценки хода процесса, его основных параметров. Анализ надежности гибкого манипуляционного

работа по определяющим параметрам проводилась путем исследования их распределений и оценки вероятности безотказной работы. Последнее подразумевает определение доли допустимых режимов (для которых ) из общего количества созданных реализаций и расчет вероятности безотказной работы:

$$P = \frac{N(X_{\min} \leq X \leq X_{\max})}{N}, \quad (1)$$

где  $N(X_{\min} \leq X \leq X_{\max})$  – число реализаций, для которых значение определяющего параметра находилось в диапазоне  $[X_{\min}; X_{\max}]$ ;

$N$  – общее количество реализаций.

Основными этапами моделирования надежности гибкого манипуляционного робота являются:

1. *Выбор количества реализаций ( $N$ ).* Число реализаций определяется исходя из требуемой точности определения характеристик надежности манипуляционного робота.

2. *Выбор по  $N$  значений каждого аргумента.* Значения выбираются случайным образом из заданного диапазона изменения каждого аргумента по соответствующим законам распределения (или дискретные значения, заданные вероятностями).

3. *Формирование  $N$  наборов значений аргумента.* В каждом наборе находится по одному значению каждого аргумента. Формирование наборов проводится случайным образом.

4. *Расчет определяющего параметра (параметров) для каждого набора.*

5. *Построение гистограммы частоты попадания значения определяющего параметра в  $i$ -й интервал ( $N_i/N$ ).*

Поскольку для ряда структурных элементов гибкого манипуляционного робота характерно изменение характеристик со временем, математическая модель учитывает изменения распределения параметров элементов и позволяет для каждого момента времени проводить расчет. Это позволяет получать зависимости вероятности безотказной работы от времени  $P=f(t)$ .

Блок-схема алгоритма расчета вероятности безотказной работы элементов гибкого манипуляционного робота по параметру прочности представлена на рисунке 1. В соответствии с перечнем этапов моделирования надежности сначала выбирается число реализаций  $N$ . Затем выбираются значения случайных параметров прочности ( $R$ ) и воздействующей нагрузки ( $S$ ) по соответствующим законам распределения с использованием генератора случайных чисел. После случайного формирования наборов значений параметров прочности и нагрузки, проводится проверка условия:

$$L = R - S \geq 0. \quad (2)$$

На следующем этапе рассчитывается вероятность безотказной работы (по формуле 1) как отношение количества реализаций, для которых выполняется условие (2), к общему числу реализаций  $N$ .

Блок-схема реализации вероятностно-статистического метода Монте-Карло при моделировании параметрической надежности элементов гибкого манипуляционного робота представлена на рисунке 2. Алгоритм позволяет учитывать случайный характер воздействующих факторов путем задания распределений случайных величин. Это позволяет оценить надежность элемента гибкого манипуляционного робота при изменении его конструкции, материалов, условий эксплуатации и т.д.

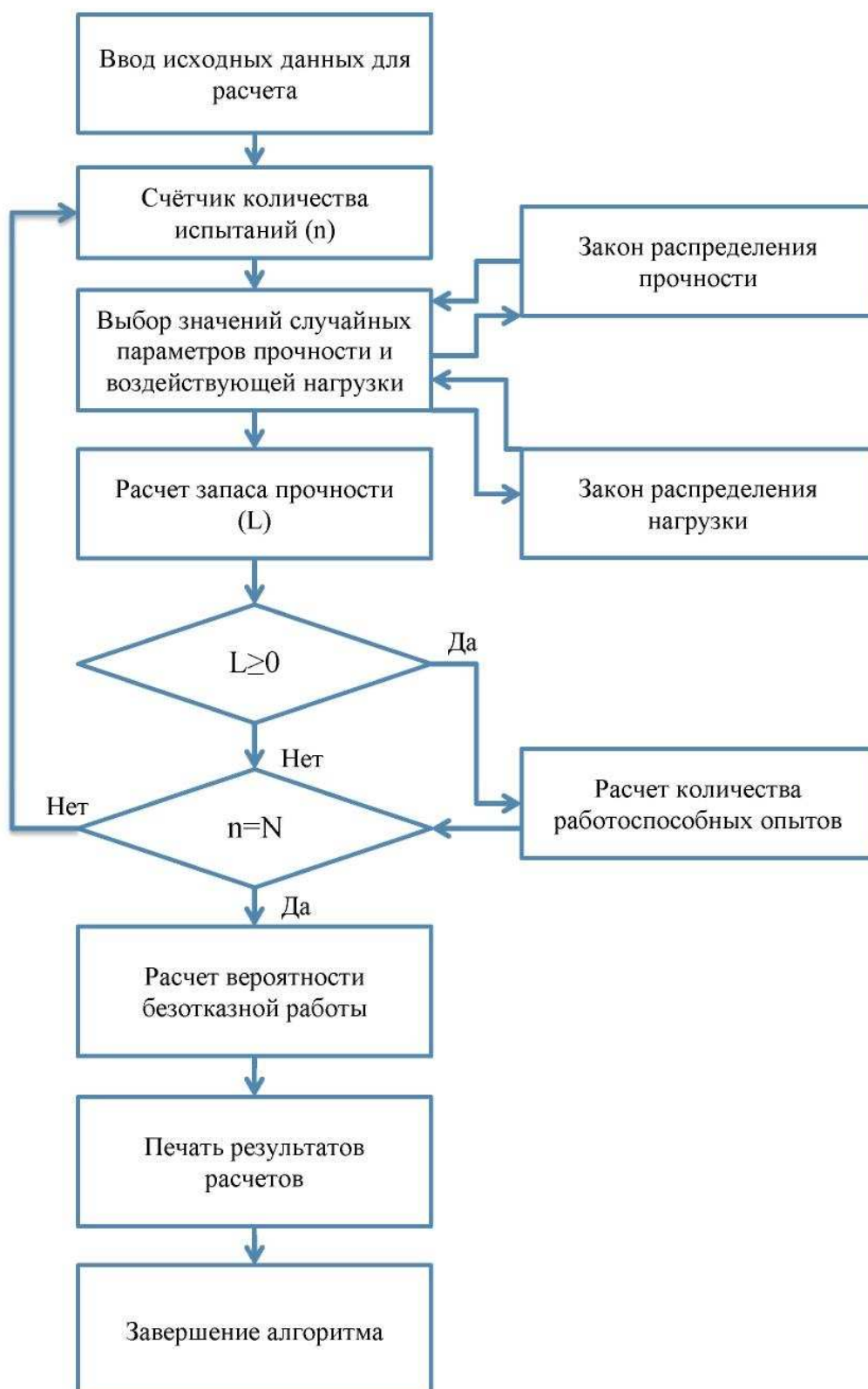


Рисунок 1 – Блок схема алгоритма расчета безотказной работы элемента по параметру прочности

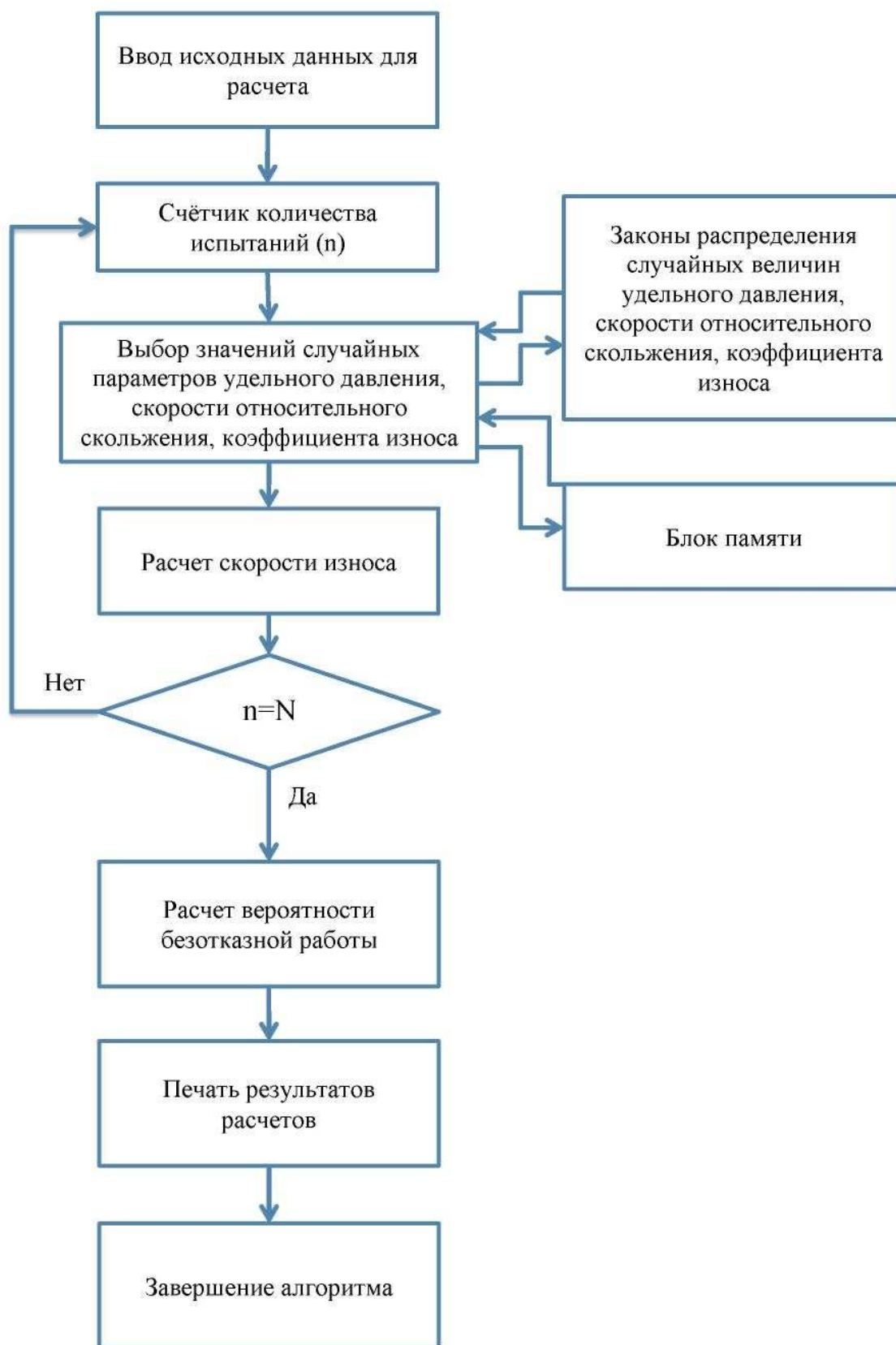


Рисунок 2 – Блок схема алгоритма расчета безотказной работы элемента по определяющему параметру

При проведении исследований надежности элементов секции гибкого манипуляционного робота использовались различные модели. Выбор конкретной модели осуществлялся на основе анализа физических процессов, происходящих в объекте исследования при его эксплуатации. По исходным данным было проведено исследование прочностной надежности основания секции, корпуса привода фиксации секции, параметрической надёжности механизма фиксации секции, шарнира секции. В рамках проведения исследований было создано 1000 реализаций конструкции каждого из вышеприведённых элементов с использованием генератора случайных чисел Microsoft Excel. Результаты анализа данных, полученных при моделировании надежности элементов секции гибкого манипуляционного робота, представлены соответственно в таблице 1 и рисунке 3.



Таблица 1 – Результаты моделирования надежности элементов секции манипулятора

Параметр	Основание секции	Механизм фиксации	Корпус привода	Шарнир секции
Минимальное значение запаса прочности, $L_{\min}$ , МПа	-3,96	-4,51	-2,71	-4,46
Максимальное значение запаса прочности, $L_{\max}$ , МПа	46,62	49,90	48,83	36,64
Среднее значение запаса прочности, $L_{\text{ср}}$ , МПа	21,06	22,46	22,57	16,18
Минимальное значение коэффициента запаса прочности, $K_{\min}$	0,95	0,94	0,96	0,97
Максимальное значение коэффициента запаса прочности, $K_{\max}$	2,55	2,66	2,63	1,33
Среднее значение коэффициента запаса прочности, $K_{\text{ср}}$	1,50	1,53	1,52	1,13
Количество реализации, при которых $L \geq 0$	950	971	977	939
Количество реализации, при которых $L < 0$	50	29	23	61
Экспериментальное значение вероятности безотказной работы	0,950	0,971	0,977	0,939

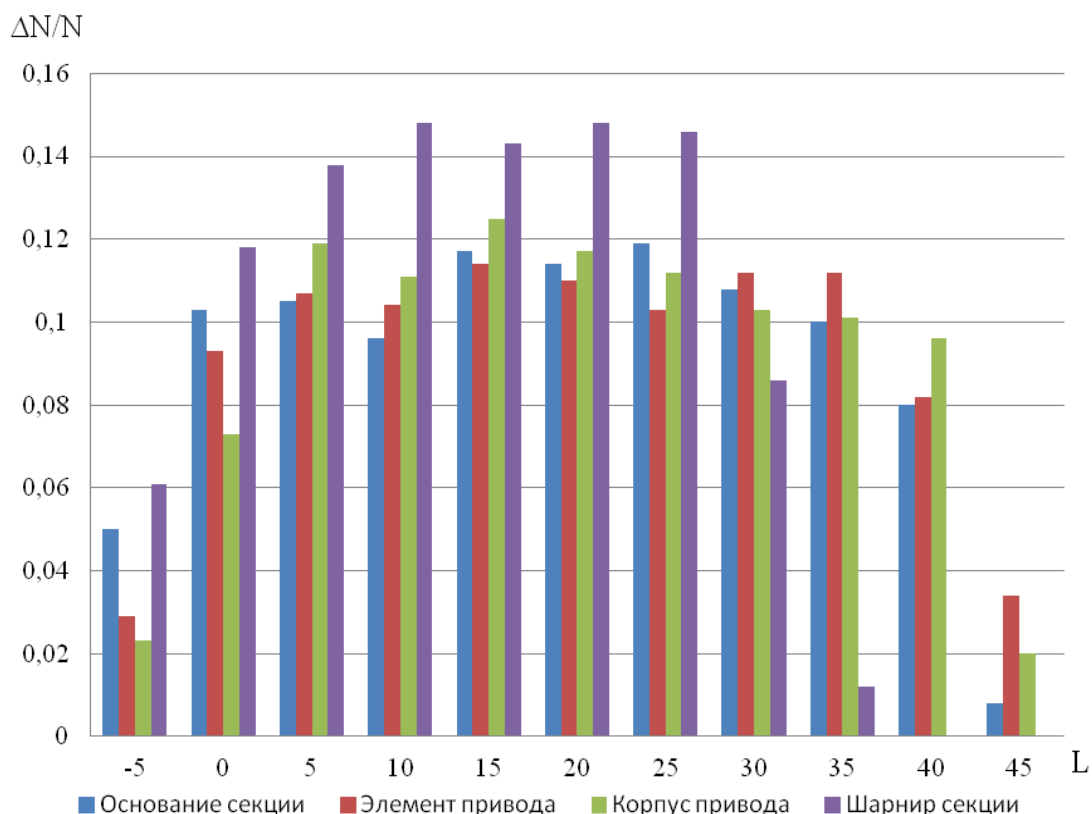


Рисунок 3 – Гистограмма распределения значений запаса прочности

Для расчета параметров надежности гибкого манипуляционного робота была разработана структурная схема надёжности его секции. При этом в рамках моделирования надежности были сформированы потоки событий отдельных элементов секции манипулятора с соответствующими законами распределения. По результатам проведенного анализа влияния потоков каждого из событий на работоспособность секции манипуляционного робота в целом был сформирован поток событий секции манипулятора. Затем была проведена статистическая обработка результатов и расчет параметров надёжности секции. Результаты анализа данных, полученных при моделировании надежности секции гибкого манипуляционного робота, представлены соответственно в таблице 2 и рисунке 4.

Таблица 2 – Результаты моделирования надежности секции манипулятора

Параметр	Значение
Минимальное значение запаса прочности, $L_{\min}$ , МПа	-4,51
Максимальное значение запаса прочности, $L_{\max}$ , МПа	33,13
Среднее значение запаса прочности, $L_{\text{ср}}$ , МПа	7,41
Количество реализации, при которых $L \geq 0$	847
Количество реализации, при которых $L < 0$	153
Экспериментальное значение вероятности безотказной работы	0,847

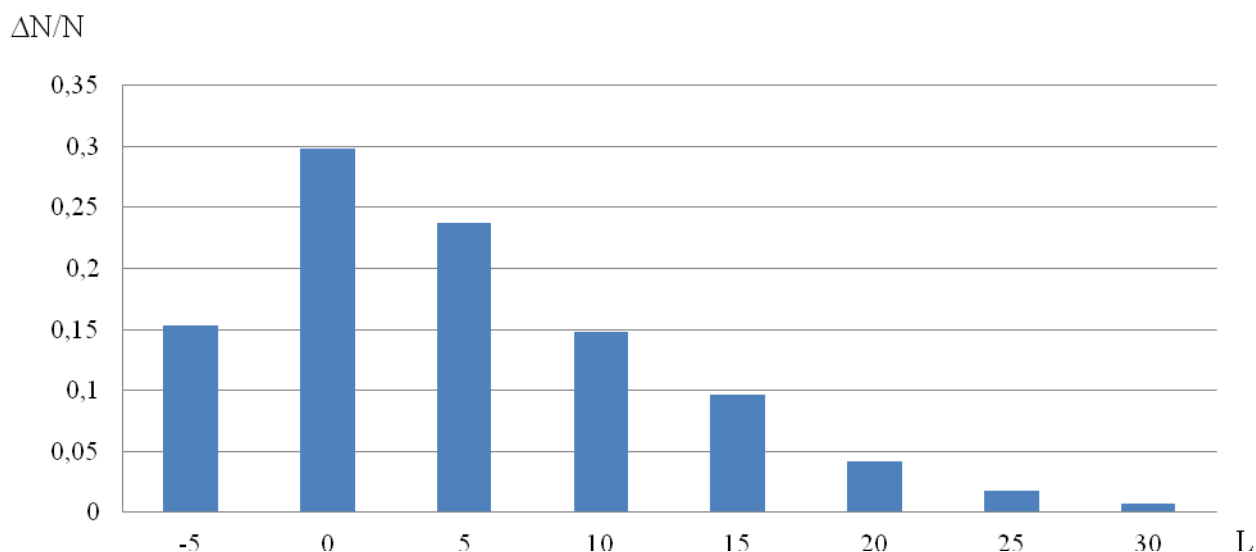


Рисунок 4 – Гистограмма распределения значений запаса прочности секции манипулятора

Модель секции гибкого манипуляционного робота, реализованная в системе автоматизированного проектирования SolidWorks, и исследованная на стойкость к внешней нагрузке представлена на рисунке 5. В результате анализа данных, полученных при моделировании воздействия нагрузки на деталь, можно сделать вывод о том, что максимальное механическое напряжение составляет 85 МПа.

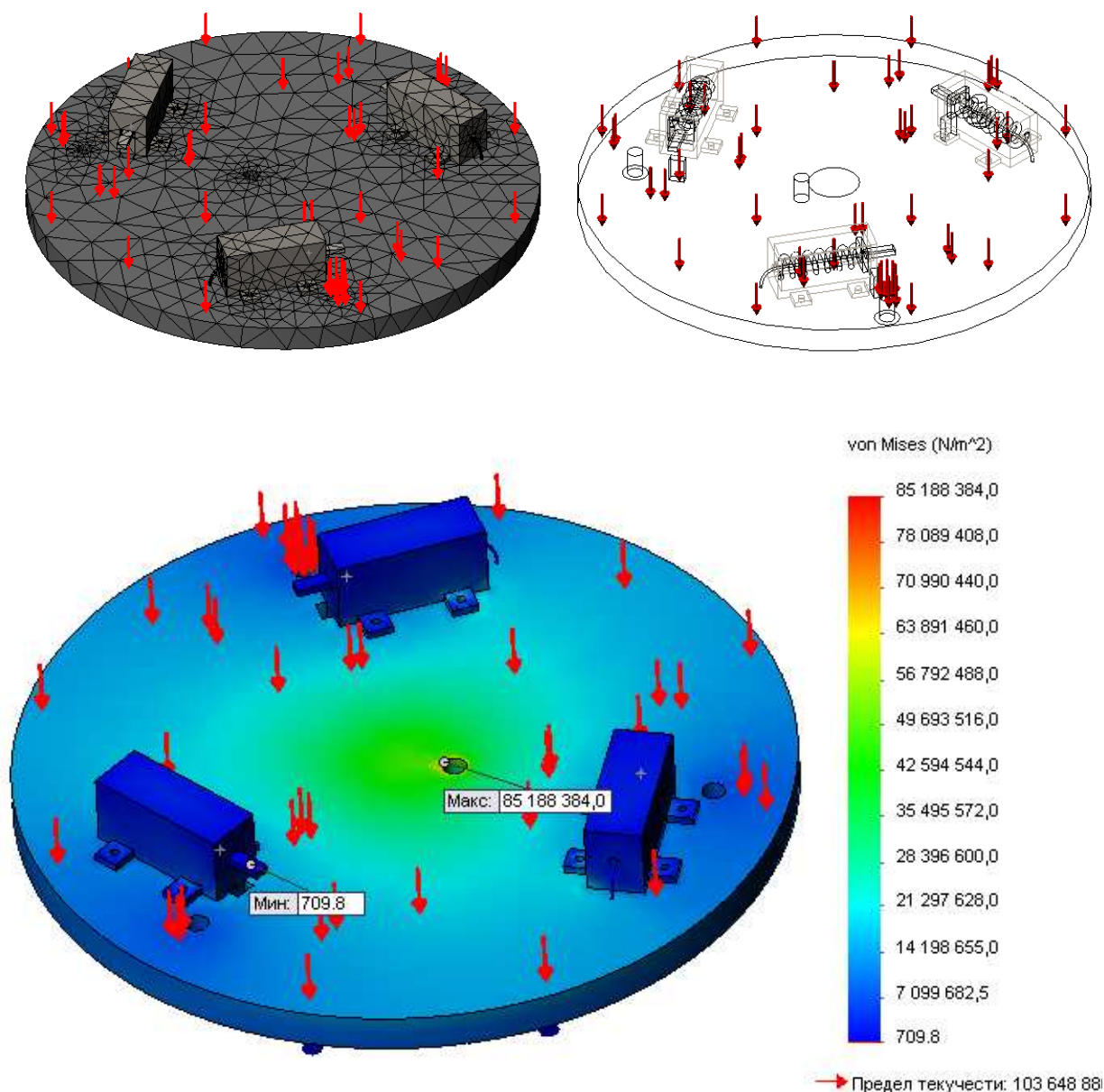


Рисунок 5 – Модель секции манипулятора

### Вывод

Разработанная математическая модель надежности гибкого манипуляционного робота позволяет определить качественные и количественные закономерности и зависимости, связывающие конструктивные параметры отдельных элементов звена гибкого манипуляционного робота и показатели надежности звена в целом.

### Библиографический список

1. Корендяев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники / Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова Р.А.Н. М.: Наука, 2006. 383 с.
2. Онучин, Е. М. Адаптивно-модульный лесохозяйственный агрегат для создания лесных культур на вырубках / Е. М. Онучин, А. Э. Алексеев // Актуальные проблемы лесного комплекса. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 30 [Текст] / Под общей редакцией Е. А. Памфилова. – Брянск: БГИТА, 2011. – С. 164–168.
3. Сидыганов, Ю.Н. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография / Ю.Н.Сидыганов, Е.М.Онучин, Д.М.Ласточкин. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. – 336 с.
4. Онучин, Е. М. Адаптивно-модульные технические средства для лесного комплекса [Текст] / Е. М. Онучин, В. А. Грязин // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование [Текст]. – 2011. – № 3. – С. 45–49.
5. Методы и модели надежности, эффективности и безопасности сложных технических систем в конфликтных ситуациях // DissersCat. URL: <http://www.disserscat.com/content/metody-i-modeli-nadezhnosti-effektivnosti-i-bezopasnosti-slozhnykh-tehnicheskikh-sistem-v-k>. (дата обращения 22.05.2015).
6. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с. .
7. Острейковский В.А. Теория надежности: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. С. 174.
8. Моделирование работы машины для обработки почвы на вырубках / Е.М. Онучин, А.Э. Алексеев, П.А. Перетягин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №08(82). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/23.pdf>, 0,813 у.п.л.

### References

1. Korendjasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Teoreticheskie osnovy robototehnika / In-t mashinovedenija im. A.A. Blagonravova R.A.N. M.: Nauka, 2006. 383 s.
2. Onuchin, E. M. Adaptivno-modul'nyj lesohozhajstvennyj agregat dlja sozdanija lesnyh kul'tur na vyrubkah / E. M. Onuchin, A. Je. Alekseev // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. Sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno- tehničeskoj konferencii. Vypusk 30 [Tekst] / Pod obshhej redakciej E. A. Pamfilova. – Brjansk: BGITA, 2011. – S. 164–168.
3. Sidyganov, Ju.N. Modul'nye mashiny dlja rubok uhoda i lesvosstanovlenija: monografija / Ju.N.Sidyganov, E.M.Onuchin, D.M.Lastochkin. – Joshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2008. – 336 s.
4. Onuchin, E. M. Adaptivno-modul'nye tehničeskie sredstva dlja lesnogo kompleksa [Tekst] / E. M. Onuchin, V. A. Grjazin // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie [Tekst]. – 2011. – № 3. – S. 45–49.
5. Metody i modeli nadezhnosti, jeffektivnosti i bezopasnosti slozhnyh tehničeskikh sistem v konfliktnyh situacijah // DissersCat. URL: <http://www.disserscat.com/content/metody->

i-modeli-nadezhnosti-effektivnosti-i-bezопасности-slozhnykh-tekhnicheskikh-sistem-v-k.  
(data obrashhenija 22.05.2015).

6. Ostrejkovskij V.A. Teorija nadezhnosti: Ucheb. dlja vuzov. M.: Vyssh. shk., 2003. S. 174.

7. Birger I. A., Mavljutov R. R. Soprotivlenie materialov: Uchebnoe posobie. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 560 s. .

8. Modelirovanie raboty mashiny dlja obrabotki pochvy na vyrubkah / E.M. Onuchin, A.Je. Alekseev, P.A. Peretjagin // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – №08(82). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/23.pdf>, 0,813 u.p.l.