ЖИЛКИБАЕВА САЛТАНАТ КУБЕЕВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ И МАНИПУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
6D060300 – «Механика»

Актуальность темы исследования. Одной из важных проблем при проектировании механизмов и манипуляторов является обеспечение прочности и жесткости их звеньев с помощью анализа напряженно-деформированного состояния в течение полного рабочего процесса.

Для анализа напряженно-деформированного состояния стержневых систем, в основном, имеются три подхода. Первый из них это графоаналитические методы для статически неопределимых и неподвижных стержневых систем, к которым относятся метод сил и метод перемещений. Второй подход к решению задачи динамического расчета упругих систем является метод сосредоточенных параметров, который основан на идее приближенной замены системы с бесконечной степенью свободы системой с конечной степенью, путем замены распределенной массы сосредоточенной. Третьим из наиболее распространённых современных численных методов позволяющий решать задачи статического, динамического напряжённо-деформированного состояния конструкций является метод конечных элементов.

Однако, все эти графоаналитические и численные методы расчета напряженно-деформированного состояния применялись к неподвижным стержневым системам и имеют свои ограничения и проблемы применения к подвижным стержневым системам. А также в этих методах не учитываются распределенные динамические нагрузки, зависящие от физических, геометрических и кинематических характеристик звеньев, которые появляются во время движения стержневых механизмов и манипуляторов. Эти нагрузки оказывают большое влияние на напряженно–деформированное состояние звеньев.

Чтобы более корректно анализировать характер напряженно-деформируемого состояния для полного рабочего цикла механизмов и манипуляторов необходимо учитывать кроме приложенных к системе

сосредоточенных сил, и распределенные динамические нагрузки, которые меняют свои значения и направления в зависимости от физических, геометрических и кинематических характеристик звеньев. Следовательно, необходимо, в первую очередь, установить интенсивности распределения динамических распределенных нагрузок.

Степень свободы стержневых систем равна бесконечности, так как они имеют распределенную массу. Поэтому, необходимо разработать дискретную модель механизма, в котором внутренние усилия для любого поперечнего сечения звена однозначно определялись значениями этих усилий в конечном числе расчетных сечений этого звена.

Поэтому актуальна разработка метода аналитического определения внутренних усилий и перемещений в звеньях манипуляционных систем. Преимущество аналитического метода в точности и скорости расчета. А также актуальна разработка алгоритма подбора рациональных форм и определения линейных размеров поперечных сечений звеньев с наименьшей площадью, обеспечивающие прочность звеньев в течение полного рабочего процесса проектируемых стержневых механизмов и манипуляторов под действием сосредоточенных и распределенных динамических нагрузок.

Цель данной диссертационной работы заключается в разработке методики расчета прочности и жесткости плоских механизмов и манипуляторов с учетом распределенных динамических нагрузок.

Объектом исследования являются плоские стержневые механизмы и манипуляторы.

Предмет исследования – прочность и жесткость плоских стержневых механизмов и манипуляторов.

В соответствии с поставленной целью определяются следующие **задачи исследования:**

- разработка алгоритмов определения кинематических характеристик плоских механизмов и манипуляторов с применением известных методов, необходимых для определения продольных и поперечных распределенных динамических нагрузок и разработка компьютерных программ, позволяющих производить анимацию движения механизма и манипулятора с автоматическим построением на звеньях эпюр продольных и поперечных распределенных динамических нагрузок;
- получить разрешающие динамические уравнения равновесия элементов и узлов дискретной модели механизма и манипулятора и разработка компьютерных программ, позволяющих производить анимацию движения механизма и манипулятора с автоматическим построением на звеньях эпюр изгибающих моментов, поперечных и продольных сил;

- разработка методики аналитического определения продольных, поперечных перемещений (прогибов) и углов поворота поперечных сечений звеньев и разработка компьютерных программ, позволяющих производить анимацию движения механизма с автоматическим построением на звеньях эпюр продольных, поперечных перемещений и углов поворота поперечных сечений звеньев;
- разработать алгоритмы и компьютерные программы автоматизации методики оптимизации массы механизма по допускаемым напряжениям в звеньях и получить численные результаты, с помощью которых будут подобраны формы поперечных сечений и определены их линейные размеры, обеспечивающие прочность звеньев в полном цикле рабочего процесса.

Методы исследования: современные аналитические и численные методы решения задач механики машин.

Научная новизна работы заключается в следующем:
- разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие производить анимацию движения механизма и манипулятора с автоматическим построением на звеньях эпюр распределенных динамических нагрузок и внутренних усилий;
- разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие производить анимацию движения механизма с автоматическим построением на звеньях эпюр деформаций звеньев;
- разработаны алгоритмы и компьютерные программы автоматизации методики оптимизации массы механизма по допускаемым напряжениям и реализованы численные результаты, т.е. подобраны формы поперечных сечений звеньев и определены их линейные размеры, обеспечивающие прочность звеньев в течение полного рабочего процесса на примере плоского шестизвенного механизма.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Разработанную методику можно использовать для проведения дальнейшего теоретического исследования напряженно–деформируемого состояния элементов пространственных подвижных систем (пространственные стержневые механизмы, манипуляторы, фермы, рамы и т.д.) со статической определимой и неопределимой структурами и автоматизации этого исследования с помощью современных компьютерных программ. Практическая значимость исследования состоит в применении разработанной методики при исследовании напряженно–деформируемого состояния проектируемых, а также существующих стержневых систем (плоские стержневые механизмы, манипуляторы, фермы, рамы и т.д.).

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации. Основные расчетные уравнения, использованные

в диссертационной работе, получены с корректным использованием основных положений теоретической механики, теории машин и механизмов и механики деформируемого твердого тела.

При разработке алгоритмов и при создании компьютерных программ использованы полученные в диссертационной работе расчетные уравнения и возможности программной среды Maple. Достоверность результатов наглядно видна при анимации движения рассматриваемых механизма и манипулятора с построением на звеньях эпюр внутренних усилий и деформаций по следующим признакам: (а) между интенсивностью поперечных динамических нагрузок, поперечных сил, изгибающих моментов и интенсивностью продольной динамической нагрузки, продольной силы, а также между изгибающим моментом, углом поворота сечений и прогибом, продольной силой и продольными перемещениями сечений звеньев имеются дифференциальные зависимости, которые можно использовать для проверки полученных результатов; (б) граничные условия в стойках, шарнирных узлах и т.д.

Полученные линейные размеры поперечных сечений звеньев можно проверить, определив напряжение в любом сечении любого звена и в любом положении механизма, это значение не должно превышать допускаемого напряжения.

Связь диссертационной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная диссертационная работа выполнялась в рамках научного проекта программы грантового финансирования фундаментальных исследований в области естественных наук МОН РК «Разработка аналитической теории прогнозирования прочности и жесткости робототехнических систем и механизмов» (2015-2017 гг., № ГР 0115РК00783).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Международная научно-практическая конференция: «Сто конкретных шагов. Современное государство для всех» - стратегический путь индустриально-инновационного развития страны (Шымкент, Казахстан, 29-30 октября 2015 г.);
- 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2016) (Crete, Greece, June 5-10, 2016);
- Республиканская научно-методическая конференция «Актуальные вопросы механики и математики», посвященная 20-летию Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева и 10-летию основания кафедры «Механика» механико-

математического факультета Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, 14-15 ноября 2016 г.);
- 2nd International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA 2017) (Kitakyushu, Japan, September 15-18, 2017);
- научные семинары кафедры механики КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, 2015-2018 гг.).

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 8 работ, в том числе 3 публикации в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 3 публикации в научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science и 2 публикации в сборниках международных отечественных конференций.

Личный вклад автора состоит в:

- участии на всех этапах процесса разработки методики расчета прочности и жесткости плоских механизмов и манипуляторов с учетом распределенных динамических нагрузок;
- непосредственном участии соискателя в разработке программ, позволяющих производить анимацию движения механизма и манипулятора с построением на звеньях эпюр – продольных и поперечных распределенных динамических нагрузок; изгибающих моментов, поперечных и продольных сил; продольных, поперечных перемещений и углов поворота поперечных сечений звеньев и определении линейных размеров сечений с наименьшей площадью, обеспечивающие прочность звеньев в полном рабочем процессе механизма;
- личном участии в апробации результатов исследования;
- подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает титульный лист, содержание, введение, пять разделов, заключение и список использованных источников, состоящий из 65 наименований. Общий объем диссертации составляет 91 страниц, включая 45 иллюстраций и 2 таблиц.

Основное содержание диссертации. Введение включает анализ современного состояния исследуемой проблемы с обзором существующих работ, обоснование актуальности темы диссертационного исследования, цель работы, объект, предмет, задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимости, основные положения, выносимые на защиту, сведения об опубликованных работах по теме диссертации и степень ее разработанности.

Первый раздел диссертации посвящен кинематическому анализу и определению закономерностей распределения поперечных и продольных динамических распределенных нагрузок по длине звеньев. Разработаны

компьютерные программы, позволяющие производить анимацию движения механизма и манипулятора с построением на звеньях эпюр продольных и поперечных распределенных динамических нагрузок.

Во втором разделе диссертации приведены матрицы аппроксимаций звеньев и внутренние усилия, выраженные с помощью матрицы аппроксимаций и искомых векторов усилий в расчетных сечениях, а также приведены расчетные и условные схемы для построения дискретных моделей элементов и механизмов. Для упругого расчета стержневых механизмов, на основе принципа Даламбера, механизмы приводились к конструкциям (расчетным схемам механизма), степень подвижности которых равна нулю. Для определения внутренних усилий в звеньях (в элементах) расчетной схемы механизма, конструкция разделена на элементы и узлы. Для построения дискретной модели элементов были применены условные схемы, которые показывают, какие искомые величины внутренних усилий определяются в рассматриваемом сечении. Построены дискретные модели элементов с постоянными сечениями и дискретная модель всего механизма.

В третьем разделе приведены динамические уравнения равновесия элементов и узлов дискретной модели механизмов находящегося под действием сосредоточенных сил и распределенных динамических нагрузок. С помощью этих уравнений получены разрешающие уравнения, аналитически определяющие внутренние усилия в звеньях шестизвенного механизма. Разработаны компьютерные программы и приведены решения для шестизвенного механизма и манипулятора с двумя степенями свободы в виде движущегося механизма и манипулятора, на звеньях которых автоматически построены эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил для наглядного изображения и правильного понимания этих параметров.

В четвертом разделе для определения поперечных перемещений и углов поворота сечений звеньев использовано основное дифференциальное уравнение упругой линии балки, а для определения продольных перемещений точек звеньев использован закон Гука. Разработаны алгоритмы определения постоянных интегрирования в уравнениях прогибов и продольных перемещений в звеньях. Звенья рассматриваются как элементы с закреплениями, приведенные в расчетной схеме механизма. Определение постоянных интегрирования в этих уравнениях позволяет определить углы поворота поперечных сечений, поперечные (прогибы) и продольные перемещения точек звеньев. Разработаны компьютерные программы, позволяющие производить анимацию движения механизма с автоматическим построением на звеньях эпюр углов поворота поперечных сечений, поперечных (прогибы) и продольных перемещений точек звеньев под действием распределенных динамических и внешних нагрузок.

В пятом разделе разработан алгоритм автоматизированного расчета оптимизации массы проектируемых механизмов и манипуляторов по допускаемым напряжениям в звеньях. Результаты этих исследований позволяют подобрать рациональную форму и определить линейные размеры сечений звеньев с наименьшей площадью, обеспечивающие прочность звеньев в полном рабочем процессе проектируемых стержневых механизмов и манипуляторов под действием сосредоточенных сил и распределенных динамических нагрузок. Получены численные результаты – определены геометрические характеристики, линейные размеры сечений, максимальные значения внутренних усилий и оптимальные веса звеньев шестизвенного механизма.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационного исследования, оценка полноты решения поставленных задач, рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов, оценка технико-экономической эффективности внедрения, оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.