

Комплексная методика обеспечения безотказности и долговечности металлоконструкции манипулятора при проектировании

Костюкевич В.М.¹
Герасимов Ю.Ю.
Сюнев В.С.
Давыдков Г.А.

Петрозаводский государственный университет

Предлагается иерархическая методика оценки уровня надежности манипуляторного технологического оборудования с учетом специфики эксплуатационных нагрузок, технологии изготовления и конструктивных особенностей. В основу положено комплексное использование методов конечных элементов, механики разрушения и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: метод конечных элементов, механика разрушения, имитационное моделирование, технологическая несплошность.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование показателей надежности на стадии проектирования является достаточно сложной задачей. Для определения показателей надежности манипуляторного технологического оборудования необходимо представить в виде отдельных элементов. Вычислив вероятность безотказной работы и наработку каждого элемента, можно найти надежность всей конструкции, используя известные зависимости для определения надежности систем с последовательными соединениями элементов.

Статистические наблюдения и опыт проверочных расчетов металлоконструкции манипуляторов свидетельствуют о том, что показатели надежности зависят от небольшого числа элементов. Это обстоятельство позволяет существенно сократить объем вычислений при прогнозировании надежности металлоконструкции манипулятора, сведя их к расчету по условию сохранения прочности механизма поворота (в большинстве случаев реечной передачи) и двух - трех сечений колонны, стрелы, рукояти с наибольшим уровнем действующих рабочих напряжений, концентрации напряжений, остаточной сварочной напряженности и вероятности появления технологических несплошностей.

СТРУКТУРА МЕТОДИКИ

В общем случае при проектировании манипуляторного технологического оборудования предлагается сле-

дующая комплексная методика оценки уровня надежности с учетом специфичности эксплуатационных нагрузок, технологии изготовления и конструктивных особенностей (рис.).

Исследование напряженно-деформированного состояния

Для определения пиковых динамических нагрузок на элементы манипулятора при пуско-тормозных режимах работы целесообразно составить уточненную модель манипулятора для исследования нагруженности элементов манипуляторного технологического оборудования.

В результате оснащения научно-исследовательской и производственной отраслей производительными персональными компьютерами, рабочими станциями в нашей стране и за рубежом появляется ряд работ прикладного характера, посвященных динамическому анализу механизмов на основе метода конечных элементов (МКЭ). При выводе нелинейных уравнений движения звеньев механизмов учитывается взаимовлияние номинального и упругого движений. В настоящее время МКЭ широко используется в практических расчетах динамических характеристик сложных конструкций. Исходная система представляется в виде совокупности простых элементов (типа балок, пластин), каждый из которых характеризуется распределенной массой и жесткостью. МКЭ позволяет определить относительную эквивалентную жесткость между узлами, а также распределить эквивалентные сосредоточенные массы по узловым точкам. В результате исходная континуальная модель преобразуется в дискретно-континуальную упруго-массовую модель, которая позволяет рассчитать динамические характеристики аппроксимированной исходной модели. Задача проведения динамического анализа значительно упрощается при наличии типовых конечных элементов гидропривода в программном обеспечении.

Использование МКЭ в задачах динамики механизмов позволяет более точно учесть такие факторы, как упругость звеньев, зазоры и трение в кинематических парах, переменность структуры моделируемого объекта и поглощение энергии. МКЭ обеспечен численными процедурами исследования математической модели объекта - наличием устойчивых методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений движения, описывающих движение механизмов и составленных с учетом упругости звеньев.

В связи с этим на первом этапе строится стержневая или пластинчатая дискретно-континуальная динамическая модель манипулятора на основе МКЭ. Она используется для оценки величины максимальных действующих нагрузок в узловых точках стержневой конструкции манипулятора при наиболее нагруженных режимах работы (например, подъем-опускание сортирента при максимальном грузомоменте и перенос сортирента поворотом манипулятора на максимальном вылете). Значения этих пиковых нагрузок в элементах манипулятора (поворотная

¹ Авторы, соответственно, старший преподаватель кафедры технологии металлов и ремонта, профессор, доцент и преподаватель кафедры тяговых машин © В.М.Костюкевич, Ю.Ю.Герасимов, В.С.Сюнев, Г.А.Давыдков, 1996

колонка, стрела, рукоять, реечная передача механизма поворота) используются на нижнем иерархическом уровне математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) (см. рис.).

На втором этапе, используя значения пиковых узловых усилий, определяются пиковые напряжения в "опасных" сечениях при самых неблагоприятных режимах работы и сравниваются с характеристиками несущей способности элементов металлоконструкции манипулятора. Определение напряжений может производиться двумя способами:

- классическими методами сопротивления материалов;
- с использованием уточненных методов расчета на прочность.

Для определения НДС элементов сложной геометрической формы, каковыми являются рукоять, стрела, поворотная колонка и реечная передача опорно-поворотного устройства, целесообразно использовать уточненные методы расчета НДС, например МКЭ.

В настоящее время для инженерных расчетов имеются и широко используются комплексы пакетов прикладных программ с использованием МКЭ - "COSMOS", "ПРЕЛЮД", "ЗЕНИТ", "ЛИРА". Использование графического препроцессора "GEOSTAR", графической системы "AUTOCAD" позволяет упростить процедуру подготовки исходных данных, обеспечивает автогенерацию сетки конечных элементов.

Предложенный метод, помимо оценки НДС и выявления "опасных" зон элементов металлоконструкции манипулятора в наиболее "тяжелых" режимах работы, позволяет произвести оценку предельной разрушающей нагрузки, дает возможность анализировать влияние свойств материала и различных видов упрочняющей обработки на эпюру напряжений, что дает возможность выбрать оптимальное сочетание геометрии детали и технологии изготовления.

Определение вероятности безотказной работы и гаммапроцентного ресурса элементов манипулятора

Для расчета показателей надежности элементов ОПУ необходимы вероятностные характеристики эксплуатационных нагрузок. Они определяются экспериментально или путем составления адекватной математической модели нагруженности. Помимо технологии лесозаготовки на характер и уровень нагрузок на элементы ГМ оказывают влияние природно-климатические условия: время года, характер лесонасаждений (таксационные показатели), рельеф местности, квалификация оператора, определяющая среднее число включений гидропривода элементов манипулятора, система управления гидроприводом и т.д. В силу разнообразия факторов, определяющих характер нагруженности элементов ГМ, экспериментальный метод определения статистических характеристик эксплуатационных нагрузок связан с большими материальными затратами. Также необходимо учитывать

сложность проведения натурных испытаний в условиях лесосеки и возможность применения этого метода только к аналогичному проектируемому технологическому оборудованию. Поэтому возникает необходимость в расчетном определении эксплуатационных нагрузок при помощи адекватных математических моделей нагруженности.

Аналитические методы определения вероятностных характеристик эксплуатационных нагрузок могут быть определены в результате составления расчетных схем динамических систем, математического описания их рабочих процессов дифференциальными уравнениями [1]. Но их применение осложняется в случаях учета множества действующих факторов, что имеет место при учете зазоров в шарнирных соединениях, совмещения поворота колонны с подъемом стрелы манипулятора и т.д. Тогда движение механизма в расчетной схеме будет описываться нелинейными дифференциальными уравнениями. При этом большинство уравнений не имеют общего решения и, кроме того, нелинейность исключает возможность сложения общих и частных решений. В таких случаях используются приближенные методы, которые обладают достаточной для инженерной практики точностью [2, 3].

В связи с использованием метода статистического моделирования для определения характеристик эксплуатационной нагруженности, предусматривающего многократное решение дифференциальных уравнений движения, предпочтение отдается использованию расчетных схем с дискретными массами и упругими связями [2].

На третьем этапе составляется динамическая модель лесной машины. Экспериментальные исследования динамики лесных машин манипуляторного типа показали, что в большинстве случаев могут быть сформированы адекватные расчетные схемы этого вида [4]. Для получения вероятностных характеристик нагрузочного режима и определения вероятности безотказной работы составляется динамическая модель нагруженности с дискретными массами и упругими связями. Для определения вероятности безотказной работы необходимо знать закон распределения (ЗР) эксплуатационных нагрузок в режимах подъема пачки сортиментов стрелой и переноса пачки сортиментов с учетом условий эксплуатации и ЗР несущей способности металлоконструкции манипулятора. ЗР эксплуатационных нагрузок определяется в ходе имитационного моделирования.

Основными этапами применения имитационного метода являются [5]:

- составление расчетной схемы;
- составление дифференциальных уравнений, описывающих движение расчетной схемы;
- определение начальных условий, внешних воздействий.
- многократное решение на ЭВМ дифференциальных уравнений с дальнейшим получением массива данных о действующих на элементы манипулятора нагрузках;

- статистическая обработка полученного массива реализаций.

Результаты расчетов, представленные в виде блоков нагружения, являются входными данными для расчета ресурса сварной металлоконструкции манипулятора и реечной передачи механизма поворота.

Для определения статистических характеристик процесса нагруженности с использованием метода Монте-Карло необходимо многократное решение уравнений, следовательно, требуются значительные затраты машинного времени, поэтому расчетная схема должна быть достаточно простой. Поэтому предпочтение отдается 2-3 массовым динамическим моделям лесных машин с дискретными массами и упругими связями.

При имитационном моделировании широко используется метод случайных параметров [6,7]. Суть его заключается в многократном решении дифференциальных уравнений, описывающих динамику манипулятора при случайным образом заданных управляющих воздействиях оператора, предмета труда и т.п. Очевидно, применение этого метода является возможным лишь при условии статистической устойчивости задаваемых случайных величин.

При определении вероятности безотказной работы в качестве характеристик внешней нагрузки и несущей способности используются значения действующих напряжений и предел прочности (текучести) материала детали. В случае присутствия в элементах металлоконструкции манипулятора технологических несплошностей требуется использовать значения действующего коэффициента интенсивности напряжений и вязкости разрушения.

В ходе реализации динамической модели нагруженности с дискретными массами с использованием метода статистического моделирования может быть получен закон распределения значений эксплуатационных (действующих) напряжений в виде гистограммы или известного теоретического закона распределения. Предполагая закон распределения несущей способности элементов манипуляторного технологического оборудования известным, вычисляется суммарная вероятность безотказной работы.

На четвертом этапе определяется ресурс элементов металлоконструкции манипулятора с позиции механики разрушения при учете технологических дефектов. Исходными данными для математической модели определения гаммапроцентного ресурса металлоконструкции манипулятора являются закон распределения эксплуатационных напряжений в "опасных" сечениях, полученный в ходе реализации динамической модели нагруженности с дискретными массами и упругими связями, и закон распределения дефектов, полученный по результатам статистической обработки экспериментальных исследований дефектности сварных швов металлоконструкции манипулятора, литейных дефектов, дефектов от механической обработки.

В основу математической модели зарождения и развития усталостных трещин из технологических дефектов, используемых при оценке ресурса, положено уравнение Коффина-Мэнсона [8]. По форме оно близко к широко известной зависимости Пэриса, но в отличие от нее позволяет определить число циклов до зарождения макротрещины и учитывает асимметрию цикла. Трещина считается макроскопической, если ее длина достигает размера пластической зоны около концентратора, в роли которого выступает технологическая несплошность. Полное разрушение происходит в тот момент, когда длина трещины достигнет критического значения, т.е. когда коэффициент интенсивности напряжений превысит критический циклический коэффициент интенсивности напряжений. Достижение предельного состояния в зоне разрушения по моменту возникновения макротрещины и превышения трещиной критического размера определяется на основе гипотезы линейного суммирования повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная комплексная модель исследования надежности отличается использованием взаимодействующих двухуровневых иерархических моделей оценки напряженно-деформированного состояния элементов манипулятора (детерминированная модель) и определения показателей надежности (вероятностная). Использование разработанной комплексной методики оценки уровня надежности манипулятора позволяет еще на этапе проектирования получить объективную оценку работоспособности манипуляторного технологического оборудования и на ее основе проанализировать и выбрать конструкторско-технологические мероприятия, обеспечивающие функционирование манипулятора с заданным уровнем надежности.

Реализация данной методики на примере манипуляторного технологического оборудования ЛТ-82 позволила выявить наиболее "опасные", с точки зрения нагруженности, зоны элементов манипуляторного технологического оборудования, оценить уровень пиковых напряжений в наиболее нагруженных режимах, получить оценки суммарной вероятности безотказной работы и гаммапроцентного ресурса манипулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин. М.: Экология, 1995. 256 с.
2. Брауде В.И., Тер-Мхитаров М.С. Системные методы расчета грузоподъемных машин. Л.: Машиностроение, 1985. 181 с.
3. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. Л.: Машиностроение, 1986. 183 с.

4. Баринов К.Н., Александров В.А. Проектирование лесопромышленного оборудования. Л.: ЛГУ, 1988. - 240 с.

5. Повышение качества и надежности манипуляторного технологического оборудования лесных машин при проектировании. Часть 2 / Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. / Петрозаводский гос.ун-т. Петрозаводск, 1995. 139 с.

6. Герасимов Ю.Ю. Качество и надежность проектируемых изделий лесного машиностроения: теоретиче-

ские основы. / ЛТА. СПб. 1994. 241 с. Деп. в ВИНТИ 28.01.94. N 258 - В 94.

7. Анспокс Я.П. Повышение эффективности управления лесозаготовительными машинами для рубок ухода на этапе проектирования. Автореф. дис. ...канд. техн. наук / ЛТА. Л., 1988. 16 с.

8. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения. Киев: Наук. думка, 1991. 416 с.

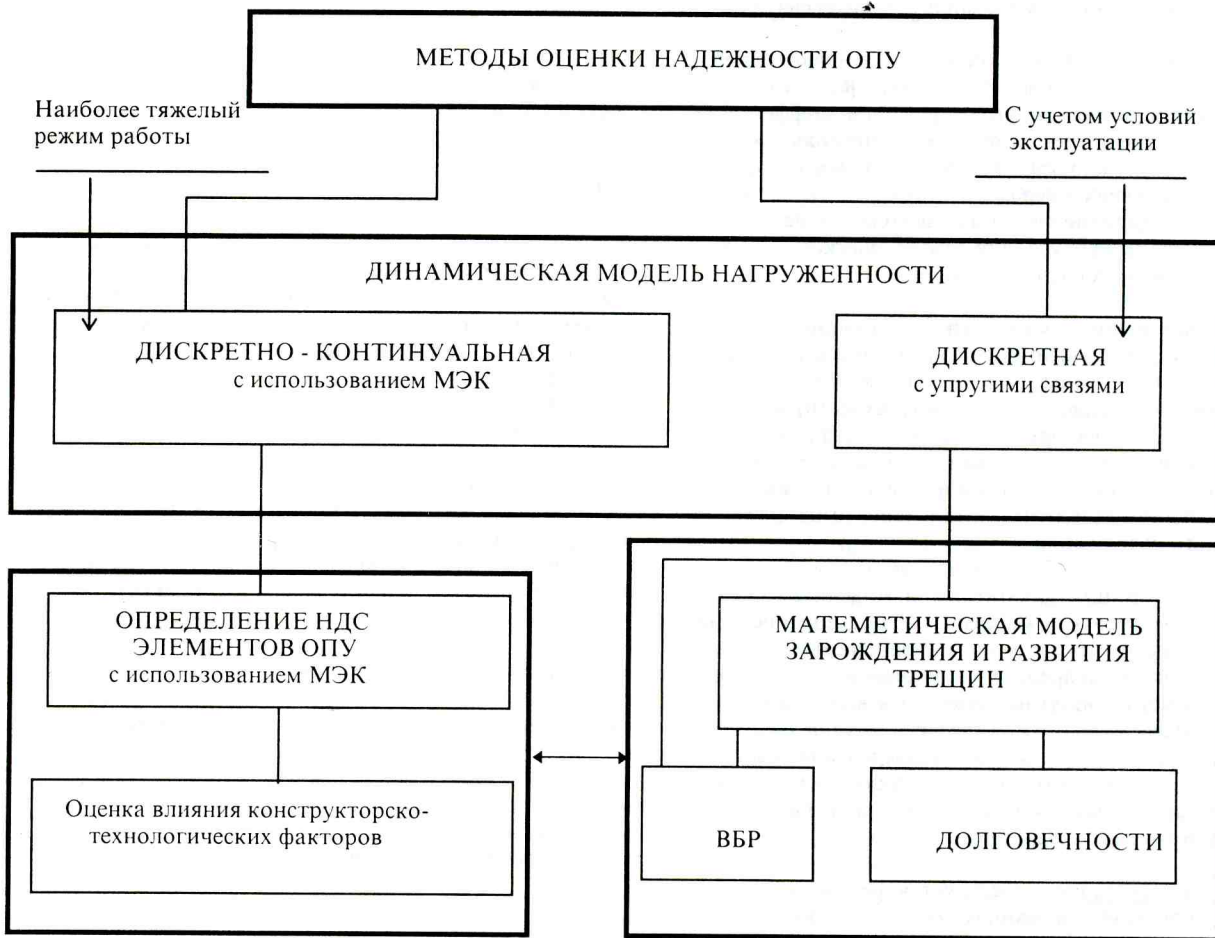


Рис. Блок-схема оценки надежности