

№ 2576

Ю.А. Алюшин
П.М. Вержанский

Структурный, кинематический и динамический анализ рычажных механизмов

Учебное пособие

№ 2576

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Ю.А. Алюшин

П.М. Вержанский

Структурный, кинематический и динамический анализ рычажных механизмов

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2015

УДК 531
А60

Рецензент
проф. *В.Ф. Замышляев*

Алюшин Ю.А.

А60 Структурный, кинематический и динамический анализ рычажных механизмов : учеб. пособие / Ю.А. Алюшин, П.М. Вержанский. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 104 с.
ISBN 978-5-87623-893-1

Учебное пособие содержит основной теоретический материал, необходимый для описания плоско-параллельного движения абсолютно твердых тел в переменных Лагранжа, основные положения энергетической модели механики, используемой для динамического анализа механизмов, а также методические указания по выполнению индивидуальных заданий по структурному, кинематическому и динамическому анализу плоских механизмов, для которых кинематические связи можно описать достаточно простыми алгебраическими уравнениями.

Пособие предназначено для студентов горных специальностей по направлению 130400 (650600) – «Горное дело», обучающихся в технических университетах.

УДК 531

ISBN 978-5-87623-893-1

© Ю.А. Алюшин,
П.М. Вержанский, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Введение.....	5
1. Структурный анализ рычажных механизмов.....	7
1.1. Основные понятия структурного анализа.....	7
1.2. Пример выполнения структурного анализа шестизвенного механизма.....	9
1.3. Устранение избыточных связей.....	14
2. Кинематический анализ рычажных механизмов.....	17
2.1. Уравнения движения твердых тел в форме Лагранжа.....	17
2.2. Кинематические связи в рычажных механизмах.....	26
2.3. Рекомендуемая последовательность кинематического анализа с применением электронных таблиц Excel.....	41
2.4. Рекомендации по методам проверки результатов расчета.....	42
3. Динамический анализ рычажных механизмов.....	44
3.1. Энергия как единая мера движения.....	44
3.2. Обобщенные координаты и силы.....	47
3.3. Обобщенные силы кинетической энергии.....	51
3.4. Обобщенные силы потенциальной энергии и внешних воздействий.....	57
3.5. Расчет обобщенных сил на осях шарниров.....	59
3.6. Центробежные силы в рычажных механизмах.....	74
Приложение 1. Кинематический и динамический анализ плоского шарнирно-рычажного механизма.....	81
Приложение 2. Типовые кинетические схемы для индивидуальных заданий.....	100
Библиографический список.....	103

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение производительности труда во всех отраслях производства невозможно без увеличения рабочих скоростей и нагрузок, возникающих в машинах, агрегатах и комплексах. Это требует обоснованного выбора типов, схем и конструктивных параметров проектируемых механизмов, разработки методов анализа и синтеза с учетом основных принципов и новых направлений развития механики.

Требования научно-технического прогресса приводят к усложнению механизмов, больше внимания уделяется пространственным механизмам с несколькими степенями свободы, в частности роботам. Графические методы исследования механизмов уступают место аналитическим, которые могут эффективно использовать компьютеры для построения более точных математических моделей механизмов и машин.

В работе рассмотрены новые по сравнению с известными из учебной литературы методики кинематического и динамического анализа шарнирно-рычажных механизмов с использованием переменных Лагранжа и энергетических принципов расчета обобщенных сил, приведенных к центрам масс и осям шарниров. Уделено внимание энергетической интерпретации центробежных сил и особенностям их использования при силовом расчете и уравнивании механизмов. «Всегда интересно и поучительно исследовать законы природы с новой точки зрения, придём ли мы при этом к более простому трактованию того или иного частного вопроса или достигнем лишь большей точности формулировок» [К. Гаусс в книге Лагранжа Ж. Аналитическая механика. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. – 440 с.].

Учебное пособие предназначено для студентов горных специальностей, обучающихся по направлению 130400 (650600) «Горное дело», а также магистров и аспирантов, изучающих курсы математического моделирования и оптимизации технологического оборудования. Пособие может быть использовано при выполнении индивидуальных заданий в курсах «Прикладная механика» и «Теория механизмов и машин», должно способствовать закреплению знаний по курсам «Высшая математика», «Теоретическая механика», «Программирование» и обеспечить необходимый уровень подготовки для выполнения курсовых и дипломных проектов по горным машинам и оборудованию.

Пособие не претендует на полноту изложения всех затрагиваемых вопросов, не предполагает замену учебников и является лишь дополнением к ним.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование новых машин и автоматических линий, так же как и модернизация существующих комплексов, должны соответствовать возрастающим с каждым годом требованиям эффективности, экономичности и надежности. Эти задачи могут быть решены только на основе современных достижений фундаментальных и прикладных наук. Именно они определяют современное состояние научно-технического прогресса во всех отраслях промышленности, обеспечивая благосостояние и безопасность общества.

В современных машинах широкое применение получили механизмы, которые преобразуют непрерывное вращательное движение входного звена в колебательное или поступательное движение выходного звена. Для этой цели применяют в основном механизмы с высшими кинематическими парами, например кулачковые, которые наряду с известными достоинствами имеют ряд существенных недостатков: повышенный износ, необходимость разработки специальных конструкций для замыкания звеньев и др. Замена кулачковых механизмов шарнирными с низшими кинематическими парами позволяет повысить надежность и долговечность машин, упростить технологию их изготовления и ремонта, а в некоторых случаях осуществить регулировку закона движения выходного звена даже во время работы машины.

«Вопрос о том, какие механизмы – кулачковые или шарнирные – целесообразнее применять для осуществления рабочего процесса, чаще всего решается в пользу кулачковых механизмов, хотя во многих случаях шарнирные механизмы представляют собой гораздо более удобную и совершенную конструкцию... Причиной этого является то обстоятельство, что методы расчета звеньев шарнирных механизмов еще мало доступны многим конструкторам. Им кажется, что в каждом отдельном случае проще и удобнее для заданного закона движения звена механизма рассчитать кулачковый механизм, чем шарнирный» [Лихтенхельд В. Синтез механизмов. – М.: Наука, 1964. – 228 с.]. Поэтому неудивительно, что кулачковые механизмы, теории синтеза которых уделяется достаточное внимание в учебной и научной литературе, получили широкое применение.

Простейшим видом рычажных механизмов являются двухзвенные механизмы, к которым относятся электромоторы, турбины, вентиляторы, молотильные барабаны и т.д. Разнообразие шарнирно-рычажных

механизмов с большим числом звеньев не ограничено. Совершенствование методики проектирования, и прежде всего кинематического и динамического анализа, таких механизмов относится к одной из актуальных задач механики. В соответствии с классическими работами по теории механизмов и машин такие задачи до сих пор решают графическими или графо-аналитическими методами на основе построения планов положений, скоростей и ускорений, предусматривающих обязательное определение мгновенных центров скоростей и ускорений. Они наглядны и универсальны, но не всегда обеспечивают необходимую точность. В частности, не гарантируют высокую точность в особых точках траекторий, в окрестности точек возврата и др. Кроме того, они требуют численного или графического интегрирования по времени, поэтому приходится делать много промежуточных построений и расчетов для всех звеньев после поворота кривошипа на достаточно малый угол.

Графические методы кинематического анализа определяют и соответствующую методику определения сил. В частности, до сих пор для силового расчета и динамического исследования механизмов используют «рычаг Жуковского»: все силы, действующие в рассматриваемый момент на звенья механизма, переносят в соответствующие им точки повернутого плана скоростей и рассматривают как некоторый рычаг с опорой в полюсе, находящийся в равновесии. Считают, что метод обеспечивает значительные удобства для решения многих задач динамики механизмов.

Аналитические методы позволяют с высокой точностью описать математические связи между кинематическими и геометрическими параметрами. В учебной и периодической литературе подробно рассмотрена методика расчета аналогов скорости и ускорений на основе векторных уравнений замкнутости контуров. Аналитическое представление кинематических связей и их последующее дифференцирование не приводит к каким-либо трудностям как при записи окончательных соотношений, так и при их использовании в численных расчетах. Однако существенным недостатком такой методики является ограниченность ее применения лишь для точек, расположенных на прямых отрезках, соединяющих оси шарниров механизма.

Существенному снижению математических трудностей аналитического описания кинематических соотношений для механизмов любой сложности, в том числе пространственных, способствует переход к описанию движения в форме Лагранжа и энергетическим принципам механики, которые используются в данной работе.

1. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Структурой механизма называют совокупность элементарных звеньев объекта и взаимосвязи между ними, которые позволяют уяснить работу механизма и особенность энергетических потоков в самом общем виде [1–3]. В шарнирно-рычажных механизмах функционально связаны звенья или группы звеньев, а отношения между ними устанавливаются в виде подвижных кинематических пар или неподвижных соединений. Структура механизма на уровне звеньев, кинематических пар и структурных групп отображается на его структурной схеме, которая отличается от кинематической дополнительной информацией о виде кинематических пар, соединяющих эти элементы.

Структурный анализ является начальным этапом синтеза механизмов и предполагает сравнение возможных вариантов структурных схем, которые в конечном итоге определяют его эффективность. На этапе структурного анализа должны быть рассмотрены вопросы устранения избыточных связей, ликвидации дублирующих звеньев, возможности перехода к кинематическим парам низшего или высшего порядка, например, для появления избыточных подвижностей с целью повышения надежности и работоспособности с параметрами, установленными требованиями технической документации [3–4].

Структурный анализ включает определение числа подвижных звеньев и кинематических пар (КП), их классификацию, определение числа степеней свободы для плоского и пространственного вариантов механизма, устранение избыточных связей (для пространственных групп) [2–4] и «рационализацию» структуры по Ассуру с энергетической интерпретацией возможных вариантов схем с избыточными подвижностями [5].

В данной работе рассмотрены шарнирно-рычажные механизмы с кинематическими парами типа 1В (вращательная с кодом [100]), 1П (поступательная с кодом [010]), 2Ц (цилиндрическая [110]) и 3С (сферическая, [300]) [2–4].

1.1. Основные понятия структурного анализа

Подвижность (число степеней свободы) механизма – число ведущих звеньев (независимых обобщенных координат), однозначно определяющих положение всех других звеньев механизма (на плоскости или в пространстве).

Местные подвижности – подвижности отдельных звеньев механизма, которые не оказывают влияния на требуемое число ведущих звеньев, но допускают возможные смещения звеньев с другими членами, например, вращение ролика, шарнирно соединенного с толкателем в кулачковом механизме, допускает замену трения скольжения трением качения на поверхности кулачка.

Связь – ограничение, наложенное на перемещение тела (звена механизма).

Структурные группы Ассура. Всякий механизм можно представить в виде совокупности одного или нескольких двухзвенных (первичных) механизмов и одной или нескольких групп Ассура [2–4].

Структурными группами Ассура называют кинематические цепи, образованные только подвижными звеньями механизма, подвижность которых (на плоскости) равна нулю. Для плоских механизмов число степеней свободы можно определить по формуле Чебышева П.Л. [2–3]

$$W = 3n - 2p_1 - p_2 = 0, \quad (1.1.1)$$

где n – число подвижных звеньев, p_1 и p_2 – числа кинематических пар с одной и двумя подвижностями соответственно.

Структурная формула группы Ассура следует из уравнения (1.1.1) при $W = 0$:

$$W = 3n' - 2p'_n = 0, \quad (1.1.2)$$

откуда

$$p'_n = \frac{3}{2}n', \quad (1.1.3)$$

где n' – число звеньев в группе, p'_n – число низших КП в структурной группе (с одной подвижностью). Так как все числа должны быть целыми, всегда число звеньев в структурной группе должно быть четным, а число низших КП – кратным 3.

Группа Ассура – плоские кинематические цепи с нулевой подвижностью.

Классом структурной группы Ассура называют число кинематических пар, образующих наиболее сложный замкнутый контур группы.

Порядок группы Ассура определяет число кинематических пар, которыми она крепится к стойке, начальному механизму или другим группам.

Поводками структурных групп Ассура называют аналоги элементов механизма, к которым присоединяется эта группа. Обычно их показывают пунктирными линиями, отходящими от свободных КП (рис. 1.1). С учетом этого понятия *порядок* группы определяет число *поводков*, которыми она крепится к стойке, начальному механизму или другим группам Ассура.

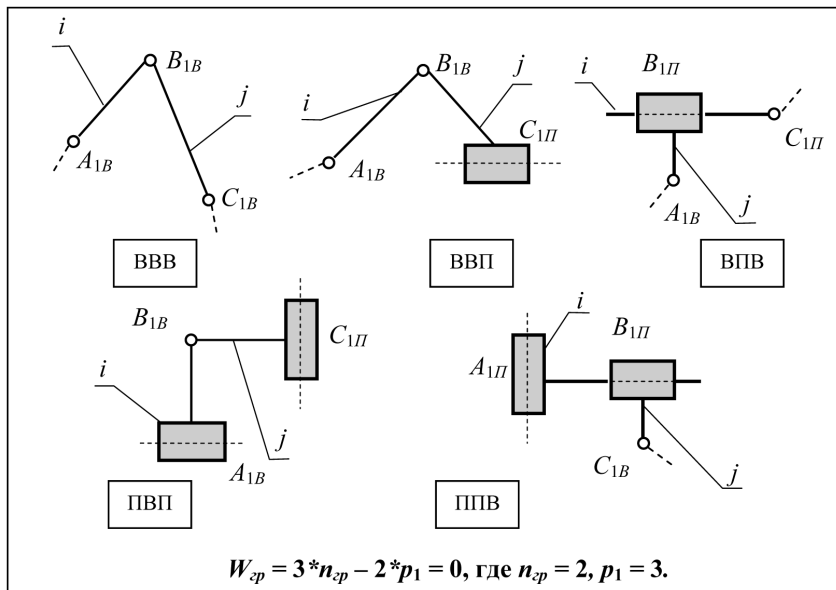


Рис. 1.1. Двухповодковые группы Ассура (2-й класс, 2-й порядок) [2]

В табл. 1 приведены примеры структурных групп Ассура II–VI классов [4]. Свободные кинематические пары помечены отходящими поводками – пунктирными линиями, как на рис. 1.1.

1.2. Пример выполнения структурного анализа шестизвенного механизма

Рассмотрим пример выполнения структурного анализа механизма, кинематическая схема которого приведена на рис. 1.2.

Выделяем неподвижное звено – стойку «0», на которой закреплены неподвижные оси шарниров A и D , а также направляющие ползуна.