

## ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ ОТ ГАСПАРА МОНЖА ДО НАШИХ ДНЕЙ: НАУКА И УЧЕБНАЯ ДИСЦИПЛИНА

А.А. Головин

*Александр Александрович Головин, доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Руководитель проекта 00-01-10556.*

*В основе статьи лежит сообщение, сделанное на Международном симпозиуме по истории машин и механизмов (г. Кассино, Италия, 2000 г.)*

*Часто наука достигает совершенства,  
когда она уже бесполезна.*

*А. Пуанкаре*

В течение своей 200-летней истории теория механизмов машин (ТММ) пережила необычайный взлет, перенесла кризис и в настоящее время ищет свое место в науке о машинах и практике проектирования. В течение столетия — с середины 19-го до середины 20-го — ТММ была одной из наиболее динамично развивающихся наук и основных учебных дисциплин в цикле инженерного образования. Она не только развивалась сама, но и дала жизнь ряду новых разделов и отраслей наук. В середине XX в. ТММ перенесла довольно ощутимый кризис, который в настоящее время до конца не преодолен. Это отразилось на развитии системы обучения ТММ в технических вузах. Автор излагает свой взгляд на связь между эволюцией ТММ и проблемами обучения.

### **ТММ — наука**

К XVIII в. человечество создало, вернее — изобрело, огромное число всевозможных машин. Многие из них были снабжены достаточно сложными механизмами, для большинства характерно отсутствие в системе управления обратной связи. Создатели машин были людьми талантливыми и создавали машины на основе своего опыта и интуиции. В исторической памяти большей частью остались удачные технические решения и их авторы. О неудачных мы почти ничего не знаем. Не знаем мы и о том, как расплачивались за свои ошибки авторы. Фактически к XVII в. наука имела представление только о некоторых принципах механики и пяти простых механизмах (рычаге, блоке, клине, вороте, полиспасте). В XVII в. работами Ф. Бекона, Г. Галилея, Р. Гука, Р. Декарта, И. Ньютона, Х. Гюйгенса были заложены основы

классической механики. К концу XVIII в. работами Л. Эйлера, братьев Я. и И. Бернулли, Ж.Л. Даламбера, Ж.Л. Лагранжа она приобрела завершённую форму.

В прошлом технические потребности общества вполне удовлетворялись продукцией мелкосерийного производства. XVIII век потребовал существенного повышения производительности труда, перехода к серийному и крупносерийному производству. Соответственно возросли требования к качеству технологического оборудования и повышению его производительности. Наиболее прогрессивным приводом в то время была паровая машина. Её конструкция изменялась от одноцилиндровой простого действия (давление подаётся только в одну полость цилиндра) с ручным позиционным управлением (Т. Ньюкомен, 1712) к двухцилиндровым машинам простого действия (давление поочередно подаётся в рабочие полости цилиндров) также с позиционным управлением (Й. Леупольд, 1724; И.И. Ползунов, 1765) и далее к серии паровых одноцилиндровых машин двойного действия (давление поочередно подаётся в обе полости одного цилиндра) с автоматическим управлением и обратной связью по скорости, созданных Дж. Уаттом.

Сочетание этих факторов и потребность в значительном количестве специалистов для решения инженерных задач привело к идее создания ряда технических наук и подготовки на их основе соответствующих специалистов — инженеров. Эта идея была реализована Г. Монжем, основавшем в 1794 г. в Париже первый технический университет — «Эколь политехник» — и читавшем в нём курс начертательной геометрии. Вначале в курс начертательной геометрии был введён раздел описания машин и их элементов. Далее этот раздел был преобразован в специальный инженерный курс «Элементы машин», фактически объединявший курсы «Теория механизмов» и «Детали машин». К 1808 г. профессор начертательной геометрии «Эколь политехник» Ж.Н.П. Ашетт предложил и опубликовал первую классификацию механизмов существующих машин, в основе которой лежало их разделение по функциональному признаку. Именно эта классификация является началом науки и учебной дисциплины «Теория механизмов и машин».

***Можно отметить три вехи в развитии ТММ.***

1. Классификация Ашетта механизмов по их функциональному назначению (*Hachette J.N.P. Traite elementaire des machine. Paris, 1811*).

2. Работы П.Л. Чебышева, положившие начало методам параметрической оптимизации схем механизмов (*Чебышев П.Л. К теории механизмов, известных под именем параллелограммов // Соч. 1853. Т.1. С.111—143*).

3. Исследование Л.В. Ассуром структуры механизмов на основе методов топологии (*Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их*

структуры и классификации // Известия Санкт-Петербургского политехнического института императора Петра Великого. 1914. Отдельный оттиск).

Теория механизмов как наука родилась для обслуживания инженерных задач, и ее математический аппарат должен был им соответствовать. При решении чисто математических или сугубо теоретических задач не возникает вопроса о времени, затраченном на их решение. Вспомним, например, Ж. Роберваля. Он познакомился с задачей, называемой парадоксом Аристотеля, обдумал ее и отложил решение на шесть лет, «трудностью ее устрешенный». Инженерная задача всегда злободневна и требует немедленного решения. В паровой машине Уатта требовалось преобразовать прямолинейное движение поршня в возвратно-вращательное движение коромысла. Для этого он применил механизм, называемый теперь «прямилло Уатта», в котором одна из точек шатуна движется по траектории, близкой к прямой. Уатт вынужден был определять размеры прямоила подбором, не дожидаясь теоретического решения. Правда, в настоящее время мы можем назвать способ, которым Уатт нашел размеры прямоила, «методом проб и ошибок» или «методом прогноза и коррекции». Теоретически эта задача была решена через много лет Чебышевым.

В науке, созданной для обслуживания текущих нужд техники, было естественно стремление минимизировать объем вычислений. Это наилучшим образом осуществлялось путем использования геометрического аппарата математики. С помощью многочисленных геометрических и графоаналитических методов удавалось решать практически все инженерные задачи теории механизмов того времени. Правда, геометрический аппарат требовал от инженера очень высокой квалификации, терпения и огромной аккуратности. Геометрические и графоаналитические методы ТММ развивались вплоть до середины XX в. Значительно меньше внимания уделялось численным и аналитическим методам.

Наверное, любая наука начинается с решения некоторого множества практических задач, обладающих рядом общих признаков, которые не удастся решить приемами и методами других наук. Следующий шаг новой науки — упорядочивание и классификация этих задач. Далее для них разрабатываются теория, методы и приемы решения. Назовем такие задачи «внешними». После этого новая наука начинает генерировать свои «внутренние» задачи. К «внутренним» задачам ТММ в первую очередь можно отнести задачи структуры. Исследования в этой области являются основой, без которой невозможно существование стройной теории сложных механизмов. Наверное, это самый фундаментальный и неразрешимый класс задач ТММ. На чем основывается это суждение?

Попробуем в общем виде сформулировать главную задачу ТММ.

*Предложить оптимальную схему механизмов, обеспечивающих заданные условия функционирования проектируемой машины.*

В самом общем виде эта задача в символах может быть записана следующим образом:  
*найти*

$$\min F(x) \text{ для } x \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

*при ограничениях*

$$c_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m'; \quad c_j(x) > 0, \quad j = m', \dots, m. \quad (2)$$

Ограничения могут быть как непрерывными линейными или нелинейными, так и пробегать конечное множество значений. При этом размерность пространства  $n$  не определена; система уравнений, описывающих состояние механизма, может быть плохо обусловленной или оптимальное схемное решение может оказаться особым или вырожденным решением (например, механизм Беннета — пространственный механизм, содержащий только вращательные пары и теоретически обладающий несколькими избыточными связями).

Данная постановка характерна своей чудовищной неопределенностью. В элементарных случаях (перемещение исполнительного звена из одного положения в другое) структурное решение и кинематическая схема почти очевидны. В более сложных случаях можно предложить целый класс схемных решений. При этом выбор наилучшего решения зависит от критериев, выходящих за рамки теории механизмов. К таким критериям могут, например, относиться экономические и коммерческие критерии.

Вернемся к задачам анализа и синтеза структуры механизмов. Задачей анализа структуры механизма является установление размерности и формы системы (1) и части системы ограничений (2). Эта задача, как, наверное, все начальные задачи, в принципе разрешима. Задача синтеза структуры механизма вряд ли разрешима чисто математическими методами и только в рамках ТММ. При выборе схемы в значительной мере приходится оперировать понятиями, выходящими за рамки классической теории механизмов, а также доверяться интуиции инженера. Как и в старину, разработки новых схем по-прежнему остаются привилегией (уделом?) талантливых изобретателей. Однако ТММ может сформулировать некоторый набор решающих правил, с помощью которых можно облегчить или частично формализовать процесс разработки схем. Именно поэтому можно утверждать, что работа Ассура является вехой в истории ТММ, так как заложила основу формализованному описанию не только заданной структурной, но и кинематической схемы механизма.

Для структурного синтеза механизмов со сложными функциональными свойствами характерна неединственность решений. В отличие от структурного анализа невозможно полностью отделить структурный синтез от параметрического. Ждут своего решения задачи об определении областей оптимальной и предельной сложности структурных схем при проектировании механизмов со сложными функциональными свойствами, о влиянии сложности схемы на ее функциональные возможности. Не решен вопрос об уровне адекватности структурных схем и реальных конструкций механизмов. Следует отметить, что эти задачи актуальны не только для теории механизмов.

В течение почти 150 лет (XIX — первая половина XX в.) ТММ являлась ведущей технической наукой. Ее основной задачей были расчеты параметров движения механизмов. Инженерная практика использовала ТММ как экспертную систему анализа движения механизма, которая позволяла оценивать работоспособность, надежность и функциональные возможности проектируемой машины. Сами механизмы придумывали выдающиеся изобретатели. Секреты логики их мышления остаются тайной. Результаты расчетов служили исходными данными для других инженерных расчетов (сопротивление материалов, выбор привода и т.д.). Решение задач ТММ послужило основой для создания новых разделов различных наук (задача о прямой Уатта — теория наилучшего приближения функций; задача о регулировании хода машины — теория автоматического регулирования; задача о спарнике паровоза — теория нелинейных колебаний и т.д.). Таким образом, практическая польза ТММ на этом этапе сделала ее одной из ведущих инженерных наук. К середине XX в. с увеличением скоростей и появлением развитых систем управления движением машины или комплекса машин возможности классической ТММ оказались явно ограниченными для экспертной оценки технических решений. В большинстве технических устройств оказалось достаточным применять несложные схемы механизмов, обладающие простыми функциональными возможностями. Основное достоинство ТММ — умение проектировать схемы, обладающие сложными функциональными возможностями, — оказалось востребованным только в определенных отраслях техники (приводах, станко- и прессостроении, полиграфическом и текстильном производстве и т.п.). Поиск своего места, по всей видимости, приводит современную ТММ к участию в двух направлениях развития техники. Первое — разработка перспективных решений на начальной стадии проектирования, т.е. разработка технической политики в машиностроении (рис.1). Думается, что место ТММ в этом направлении очевидно и не нуждается в комментариях. Второе — связано с участием в проектировании мехатронных систем (рис.2), а именно — проектирование механических устройств (преобразователь энергии на рис.2), причем содержание и сложность подсистем взаимозависимы. Новым и недостаточно разработанным является учет информационных связей между элементами мехатронной системы и ее механическими уст-

ройствами. Здесь, мне кажется, необходим некоторый достаточно прозрачный комментарий и бесполезный (хотя бы на данный момент), но наглядный пример.

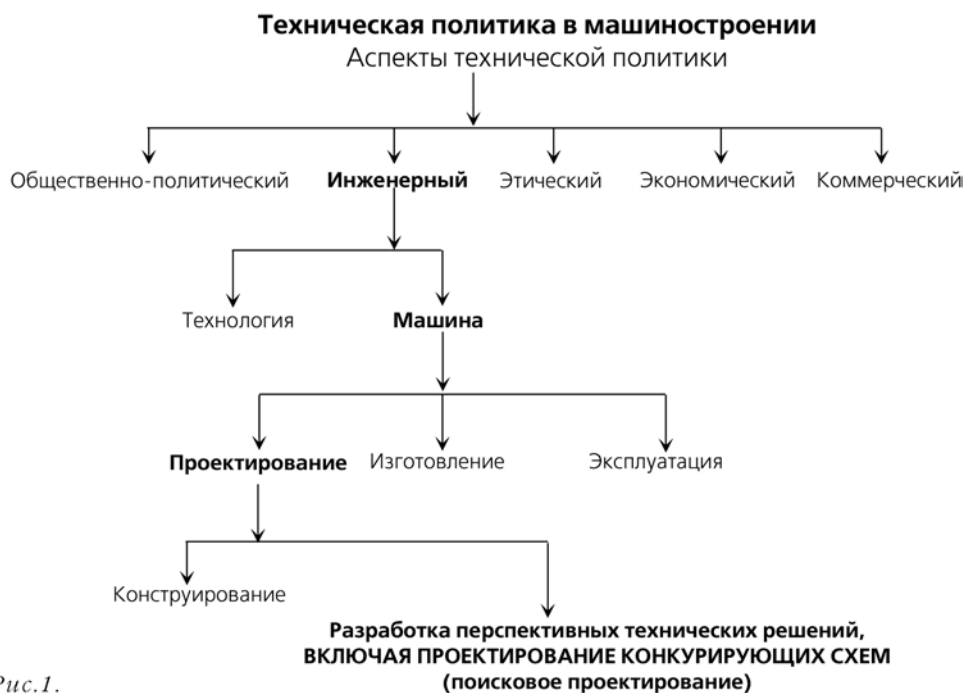


Рис.1.

Каждый видел, как движется гусеница (биологическая система, а не движитель танка или трактора), — это волна, бегущая от хвоста к голове. Ее движения можно воспроизвести с помощью механического аналога, схема которого представлена на рис.3 (следует сказать, что в принципе этот механический аналог позволяет воспроизвести движения червя, змеи, хобота слона). В основе схемы лежит базовый элемент, содержащий три вращательных и одну поступательную пару. Цель движения — преодоление различных форм макрорельефа (прямолинейное движение, движение по дуге, преодоление угла, уступа, провала). Можно утверждать, что длина гусеницы (сложность механической системы) зависит не только от формы макрорельефа (чем сложнее рельеф, тем длиннее гусеница), но и от стратегии движения.

Пронумеруем последовательно присоединенные базовые элементы от хвоста к голове. Предположим, что устройства для сцепления гусеницы со стойкой (элементами макрорельефа) расположены в основании головы и хвоста и четных номерах базовых элементов. Возможны три состояния базовых элементов 1—5: кинематическое (свободное) соединение, неподвижное соединение (фиксация конфигурации базового элемента), имитация работы возможного привода (растяжение—сжатие). Механизм, показанный на рис.3, может иметь одну или не сколько степеней свободы и в процессе движения изменять свою структуру.

Рассмотрим одну из стратегий движения, фрагменты которой (фазы движения) приведены на рис.3. Эта стратегия реализуется механизмом переменной структуры с одной степенью

свободы на каждой фазе движения. Движение головы и хвоста обеспечивается последовательным включением приводов элементов 1 и 2 при фиксированных элементах 3—5. Волновое движение гусеницы обеспечивается работой привода 3, причем сначала фиксируются элементы 4 и 5, далее элемент 4, затем 2 и потом 1 и 2.

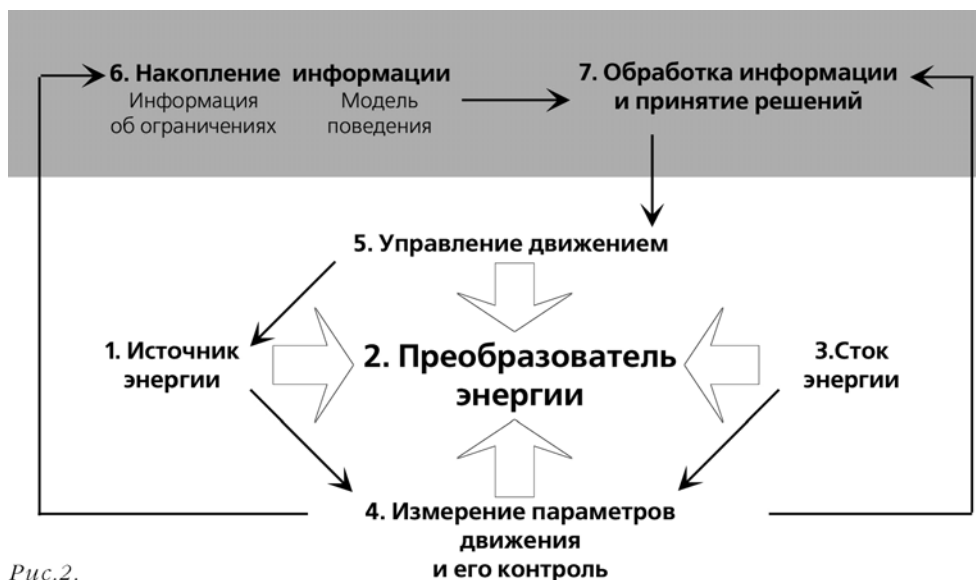


Рис.2.

Возможны и другие стратегии движения, например, на основе многоприводной стратегии с несколькими степенями свободы. В этом случае возможна одновременная работа двух и более приводов. Однако можно ожидать, что сложность системы управления при этом возрастает.

Механическая система связана с прочими системами следующим образом (рис.2). Подсистема «Измерение параметров движения и его контроль» собирает информацию о форме рельефа, т.е. о системе будущих условий движения, и передает ее в блоки «Накопление информации» и «Обработка информации и принятие решений». Блок «Накопление информации» содержит модели стандартного поведения, позволяющие идентифицировать реальную форму рельефа с содержащейся в памяти. Блок «Обработка информации и принятие решений» позволяет сравнить текущую информацию с рекомендуемой моделью поведения и принять упреждающее решение об управлении движением. Качество управления зависит от детальности проработки моделей поведения и объема накопленной информации. Однако в настоящее время в силу различных причин информационным связям между подсистемами уделяется недостаточно внимания. Получается, что совокупность оптимальных решений для каждой из подсистем не приводит к оптимальному результату.

Этот пример показывает, что оптимальное решение поставленной задачи (воспроизведение движения биологического объекта) возможно только при разумном сочетании механиче-

ской системы с системами управления, диагностики и т.д. Таким образом, проектирование механических устройств мехатронных систем имеет вполне определенную перспективу. Задачами разработки механического устройства являются:

- разработка структурной и кинематической схем;
- разработка стратегии преодоления различных форм макрорельефа;
- разработка исходных данных для проектирования системы управления движением;
- построение алгоритма управления движением;
- определение условий проходимости, параметров приводов и сил сцепления с рельефом.

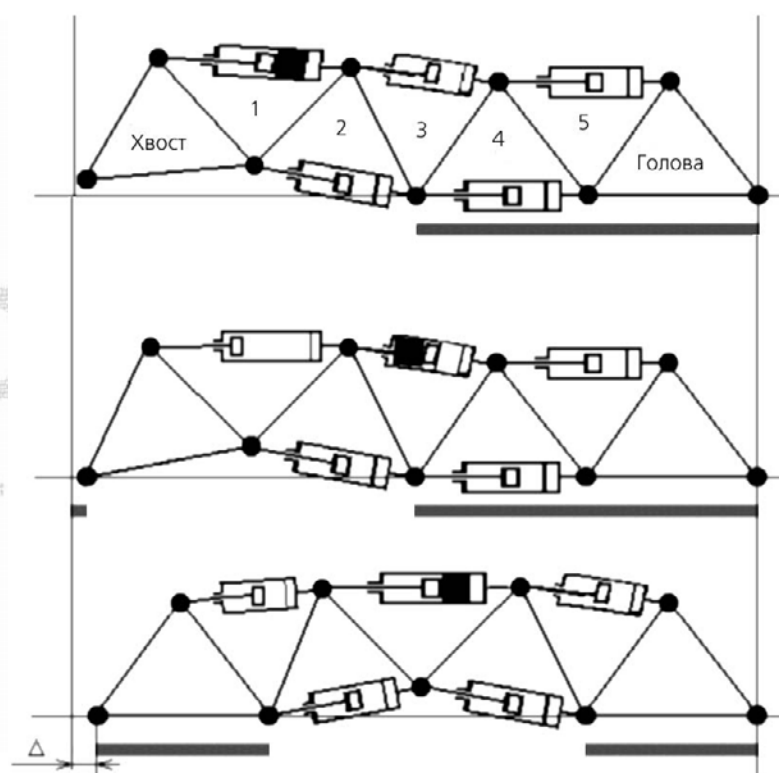


Рис.3

### ***ТММ — учебная дисциплина***

До середины XX в. учебная дисциплина ТММ шагала вслед за соответствующей наукой и в достаточной мере отражала ее успехи. Авторитет дисциплины в техническом вузе поддерживался авторитетом науки в промышленности. Безусловно, слабое место ТММ в том, что простейшие расчетные задачи можно решить с помощью традиционных методов механики и наиболее ответственным этапом проектирования является конструирование. Таких задач в технике большинство. Даже в случаях, когда усложнение схемы механизма оправданно, очень



трудно доказать ее преимущество. Например, можно ожидать, что применение механизмов высоких классов вместо простейших схем позволит увеличить производительность машины, точность позиционирования исполнительного звена, уменьшить габариты. Однако сломать стереотип заказчика в отношении многосвязного механизма чрезвычайно трудно. Это удастся только тогда, когда совершенствование конструкции машины и ее элементов заходит в тупик. Расширение функциональных возможностей приводов также позволяет решать ряд сложных задач движения и в качестве исполнительного применять простой механизм.

Раньше решение этих задач было предметом разработок ТММ. Теперь ей приходится выдерживать жесткую конкуренцию. Совершенство геометрических методов расчетов ТММ явилось причиной того, что развитие вычислительной техники в какой-то степени (по крайней мере в СССР) застало врасплох эту науку и учебную дисциплину. В технических вузах ее авторитет стремительно падал.

ТММ относится к числу общеинженерных дисциплин. В 50-х годах это был обширный курс, единый для всех специальностей технических вузов. Цикл общеинженерных и общенаучных дисциплин строился в следующей последовательности:

	Семестры					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Математика; Инженерная графика	■					
Теоретическая механика; Сопротивление материалов	■					
Теория механизмов	■					
Детали машин	■					

Последовательность проектирования совершенно иная:

*Разработка идеи (сюда входит проектирование схем, т.е. Теория механизмов) — Конструирование (Детали машин) — Разработка технической документации (Инженерная графика).*

Таким образом, оказалась разорванной логическая цепочка обучения.

В начале второй половины XX в. образовался разрыв между научными и практическими достижениями науки ТММ и содержанием учебной дисциплины ТММ, причем содержание и методы учебной дисциплины отставали от научных достижений. До поры до времени авторитет учебной дисциплины поддерживался авторитетом науки. После второй мировой войны большой импульс получили такие отрасли техники, как приборостроение, системы автоматического управления, регулируемые приводы. Появление ЭВМ вытесняло графические и графоаналитические методы. Оказалось, что многие графоаналитические и геометрические методы трудно или нерационально перекладывать в численные. В результате авторитет учебной

дисциплины ТММ существенно упал. Специализированные кафедры стали подробно разбираться с содержанием дисциплины и обнаружили, что она содержит ряд элементов, которые для многих специализированных кафедр казались излишними. Основными претензиями к дисциплине были следующие: курс малополезен для конкретных специальностей, слишком активно использует графоаналитические методы и совершенно недостаточно излагает аналитические и численные методы, позволяющие активно пользоваться со временной вычислительной техникой. Многие специальности считали, что курс перегружен формальными сведениями по геометрическому расчету зубчатых передач.

Эти проблемы возникали не только в МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана, но и в большинстве технических вузов СССР. Практически везде объем курса был существенно сокращен. В результате курс все больше стал напоминать набор этюдов на тему ТММ. Началась борьба за выживание.

Естественно, что предпринимаются попытки изменить отношение к дисциплине. Например, в Санкт-Петербургском государственном техническом университете профессор М.З. Коловский создал программу и подготовил курс «Теория механизмов», ориентированный на специалистов в области электропривода. В МГТУ им. Н.Э. Баумана автор сделал попытку построить курс для студентов специальности «Машины и технология обработки давлением». В результате помимо общего курса, читаемого в 4—5 семестре, кафедре ТММ было предложено читать в 10 семестре специальный курс «Механизмы прессов».

На основе изложенного взгляда на эволюцию ТММ и историю ее преподавания можно сделать ряд предложений по построению эффективного курса. На мой взгляд, в основе курса ТММ должны лежать следующие положения:

— понимание неединственности решения любой технической задачи, в том числе задачи проектирования механизмов;

— логическая целостность курса, наличие представлений о фундаментальных понятиях ТММ и глобальных целях, т.е. проблемная ориентация курса.

Каждое из этих положений подтверждается опытом науки, но, как правило, выпадает из учебного процесса. Современный курс ТММ по сравнению с курсами столетней давности потерял свою энциклопедичность и сосредоточился на решении отдельных задач, часто не объединенных единой логикой. Логическая целостность может быть обеспечена инженерным подходом к программе курса. Что мы вкладываем в понятие «инженерная ТММ» и как в общих чертах обрисовать ее содержание? Курс должен содержать следующие элементы:

— фундаментальные понятия (общего курса) — представления о высшей и низшей кинематических парах, принципы разработки схем механизмов;

— глобальные задачи (конкретного курса).

К последним можно отнести:

— формулировку задач проектирования механизмов по заданным условиям проектирования машины или комплекса машин;

— разработку и расчет спектра возможных решений, оценку и сравнение полученных решений;

— анализ функциональных возможностей механизмов и их элементов;

— понимание места и значимости полученных решений в рамках общей задачи проектирования машины.

Конкретный курс может охватывать часть этих задач и внутри каждой делать выборку тем и строить свою логическую цепь изложения материала для тех или иных специализаций.

