

М.А. Пискунов, Д.В. Адамов
Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ В КУРСЕ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН»

Рассматривается опыт применения программного комплекса «Универсальный механизм» для кинематического анализа плоских рычажных механизмов как альтернатива графическим методам кинематического анализа. Представлены примеры кинематики для шарнирного четырёхзвенного механизма, кривошипно-шатунного и кулисного механизмов и одного шестизвенного механизма. Вывод кинематических параметров показан в виде траекторий движения отдельных точек, графиков скоростей, ускорений в зависимости от времени и в виде векторов скоростей и ускорений отдельных точек на звеньях. Даются рекомендации по вариантам использования программного комплекса в существующей системе инженерной подготовки.

Ключевые слова: механизм, кинематика, информационные технологии, анализ, инженерное образование.

Изменения, прошедшие в России за последние годы и связанные с переходом на уровневую подготовку по системе бакалавр – магистр с сокращением сроков обучения по первой ступени высшего образования – бакалавриату по сравнению со специалитетом, инициирует дополнительные задачи в области модернизации и совершенствования как организации системы университетского образования в целом, так и основных университетских программ подготовки бакалавров и магистров и отдельных курсов внутри этих программ.

Существующие программы бакалавриата инженерных направлений в основной своей массе опираются хоть и на сокращённые, но традиционные программы подготовки специалистов, которые были разработаны ещё в СССР.

Эти программы имели вполне определенную структуру и разрабатывались в русле задач и общей системы производственной и научно-технической политики, во многом направленной на развитие промышленности во всех регионах страны, а не только в отдельных промышленных центрах.

Программы позволяли получить молодому специалисту достаточно широкий профессиональный кругозор для того, чтобы уверенно себя чувствовать и быть способным решать нестандартные задачи, которые возникали в реальной производственной практике. Эти программы были нацелены и на то, чтобы студент в процессе обучения получал навык самостоятельного по-

иска решений, а не относился к процессу обучения только как пользователь, который должен всего лишь освоить уже имеющиеся обобщенные результаты в технике и технологиях, а промышленные предприятия получали бы достаточное количество инженеров-расчетчиков, которые являлись необходимым звеном для проектирования и создания новой техники и технологий.

Такой подход во многом отвечал задачам развития регионов страны, особенно тех регионов, где не было значительной концентрации крупных промышленных производств и где экономика строилась в основном на относительно небольших предприятиях, но с достаточно широким разнообразием по сферам их деятельности.

Для таких регионов, в силу ограниченности номенклатуры выпускаемых специальностей местными высшими учебными заведениями, требовались универсалы, которые должны были обладать такими знаниями и навыками, которые позволяли бы найти себя в сферах деятельности предприятий, близких по специфике задач, но функционирующих в различных отраслях.

Некоторые возможные «перекосы» в системе подготовки специалистов в региональных университетах компенсировались наличием профессиональной среды на предприятиях, в которую погружался молодой выпускник, где уже были сформированы перспективные и актуальные на этот момент задачи развития предприятия и отрасли в целом, а также системой распределения,

которая позволяла привлечь в регионы необходимых специалистов, если подготовка таких специалистов в регионе отсутствовала.

С введением компетентностного подхода и сокращением сроков обучения при подготовке бакалавров инженерных направлений тем не менее необходимо сохранять в образовательной культуре инженерных специальностей приобщение студентов к получению навыков разработчика, а не ограничиваться только подготовкой пользователей существующей техники и технологии.

В текущих условиях это важно для предприятий, расположенных в регионах России, особенно, в малом и среднем бизнесе, где предприятия, не обладая достаточно широкой базой соискателей на рынке труда (в отличие от Москвы, Санкт-Петербурга и ряда других крупных промышленных городов), ограничены в их выборе, при этом предъявляют достаточно высокие требования к профессионализму и опыту соискателей. Часто на малых предприятиях отсутствует необходимая профессиональная среда, которая позволяет без существенных потерь интегрировать молодого специалиста в производственный процесс; от молодого специалиста ожидается самостоятельная генерация идей и направлений развития и умение доводить эти идеи до реального воплощения в условиях ограниченности времени, материальных и интеллектуальных ресурсов, при этом многие региональные предприятия не в состоянии тратить дополнительные средства на повышение квалификации и переподготовку инженерного состава.

Тем не менее следует ожидать, что в ближайшем будущем основная роль в вопросах прикладных разработок новой техники и технологий на уровне региональных промышленных предприятий будет отдана выпускникам бакалаврских направлений.

В этой связи необходимо сейчас качественно модернизировать бакалаврские программы с учетом региональной специфики, чтобы в условиях сокращения финансовых ресурсов и времени на подготовку бакалавр все равно получал бы весь необходимый арсенал для осуществления генерации новых прикладных инженерных идей и новых знаний.

Одним из действенных способов совершенствования программ бакалавриата с учетом существующих явлений и требований к бакалаврам

является необходимость «сжатия» информационной части отдельных курсов, составляющих программу профессиональной подготовки, но без принципиальной потери качества этих курсов и программы в целом.

Так как имеет место повсеместное внедрение и использование информационных технологий, то целесообразно в практической части классических курсов общинженерной подготовки широко внедрять программные продукты, способные заменить устаревшие подходы и концентрированно предоставить студенту их содержательную часть.

В данной работе рассматриваются вопросы совершенствования курса «Теория механизмов и машин», который входит в общинженерный цикл подготовки бакалавров инженерных направлений.

В статье рассматривается целесообразность изучения возможностей современных программных комплексов для моделирования машин и механизмов вместо традиционных и хорошо известных методов, представленных в классическом курсе [1] и описываемых в учебных пособиях, издаваемых в текущий период [2–4], при освоении тем, касающихся кинематического анализа плоских рычажных механизмов.

Курс «Теория механизмов и машин» является одним из классических курсов общинженерной подготовки, основная программа которого уже была сформирована к середине прошлого века. Основная задача курса – предоставить студентам методы для решения прикладных задач механики и научить студентов пользоваться этими методами.

Так как основная структура курса формировалась в условиях, отличных от тех, которые имеются сейчас в области информационных технологий для автоматизированного проектирования, то многие методы «Теории механизмов и машин» разрабатывались с опорой на графические средства. В настоящее время эти методы теряют актуальность и требуют дальнейшего развития уже на основе современных программных комплексов, используемых для моделирования машин и механизмов.

В классической постановке курса «Теория механизмов и машин» кинематическому анализу плоских рычажных механизмов отдается доля около 10 % от общего объема курса.

Изучение кинематического анализа плоских рычажных механизмов предполагает ознакомление студентов с тремя основными методами:

1. Метод построения кинематических диаграмм – относится к графическому методу кинематического анализа. В основном данный метод посвящен изучению техники графического дифференцирования и интегрирования для построения графиков зависимости кинематических параметров выходного звена механизма от изменения обобщенной координаты.

Определение скоростей и ускорений этим методом для решения современных практических задач кинематики не целесообразно, как и требования о владении навыками графического дифференцирования и интегрирования методами хорд, касательных и др., предъявляемые к бакалаврам.

Ценность метода с позиций преподавания курса заключается в том, что метод позволяет «увидеть» студенту, как кинематические параметры движения отдельных звеньев изменяются с изменением структуры механизма.

2. Метод планов. Кинематический анализ с помощью данного метода предполагает определение скоростей и ускорений звеньев и отдельных точек на звеньях механизма для одного отдельно взятого значения обобщенной координаты (одного отдельно взятого положения механизма).

Реализация метода предполагает построение в некотором масштабе векторов скоростей или ускорений. Для практических задач определения скоростей и ускорений метод также не актуален, но с позиций обучения графическая составляющая метода позволяет студентам на основе практических расчётов более глубоко разобраться в понятиях «вектор скорости», «вектор ускорения», какие бывают векторы и как с помощью этих векторов моделируется механическое движение.

3. Метод векторных контуров. Аналитический метод рассматривает кинематический анализ через аналитическое решение системы уравнений, которая формируется на основе проекций сумм векторов на координатные оси. В качестве векторов выступают звенья механизма.

После составления сумм векторов для определения различных зависимостей тех или иных величин от обобщенной координаты система решается с помощью математических методов. Для определения скоростей и ускорений система

уравнений дифференцируется соответственно один или два раза по обобщенной координате.

Метод позволяет получать точные значения кинематических параметров, анализировать их изменение в зависимости от структуры механизма и длин звеньев механизма, может быть удачно использован при решении задач кинематики с помощью математических программных пакетов (например, «MathCad» [5], «MathLab» [6] и др.).

Прикладная механика сводится к составлению проекций суммы векторов на координатные оси, а далее начинаются вычисления, которые фактически повторяют элементы тригонометрии, математического анализа, алгебры. При использовании метода для механизмов с большим количеством звеньев вычисления приобретают достаточно громоздкий вид.

Для приобретения студентами навыков определения кинематических параметров целесообразно вводить моделирование механизмов с помощью современных программных комплексов и рассматривать курс «Теория механизмов и машин» в этой части как освоение студентами возможностей этих комплексов при решении прикладных задач.

На рынке существуют различные программные пакеты, например такие, как «Adams» [7], «Универсальный механизм» (UM) [8] и ряд других.

В статье рассмотрены варианты кинематического анализа, выполненного с помощью программного комплекса «Универсальный механизм», для шарнирного четырёхзвенного механизма, кривошипно-шатунного механизма кулисного механизма, а также рассмотрен вариант анализа одного шестизвенного механизма.

Кривошипно-шатунный механизм. Моделирование кривошипно-шатунного механизма в программном комплексе предполагает создание геометрической модели механизма, состоящей из отдельных звеньев, которые задаются графическими образами и характеризуются геометрическим размерами.

После создания отдельных звеньев они соединяются друг с другом и стойкой с помощью моделей кинематических пар – трёх вращательных и одной поступательной. Вид геометрической модели, построенной с помощью программного комплекса «Универсальный механизм», представлен на рис. 1. На рис. 1 представлена модель кривошипно-шатунного механизма с длиной кривошипа 0,3 м

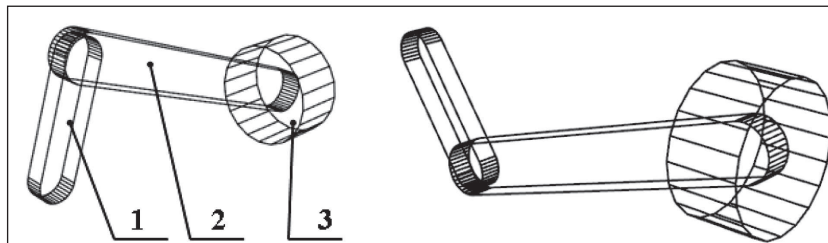


Рис. 1. Модель кривошипно-шатунного механизма

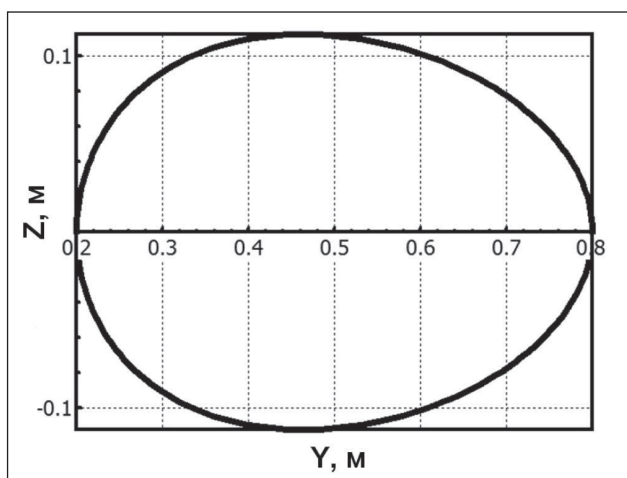


Рис. 2. Пример шатунной кривой для кривошипно-шатунного механизма

и длиной шатуна 0,8 м; звенья механизма: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – ползун. Звенья могут быть изображены разным цветом, также можно отображать систему координат. Комплекс позволяет просмотреть анимацию модели и проверить характер движения отдельных звеньев.

После описания геометрических свойств модели и определения связей, наложенных на звенья, проводится непосредственно кинематический анализ.

Кинематический анализ включает определение траектории движения отдельных точек. На рис. 2 показан пример шатунной кривой, описываемой точкой, расположенной в середине шатуна. Траектория генерируется программным комплексом. Комплекс позволяет строить траектории для любых точек шатуна. Траектория может быть изображена отдельно в виде графика (рис. 2), а также показана в поле, где сгенерирована сама модель механизма.

Кинематический анализ включает определение скоростей и ускорений звеньев и отдельных

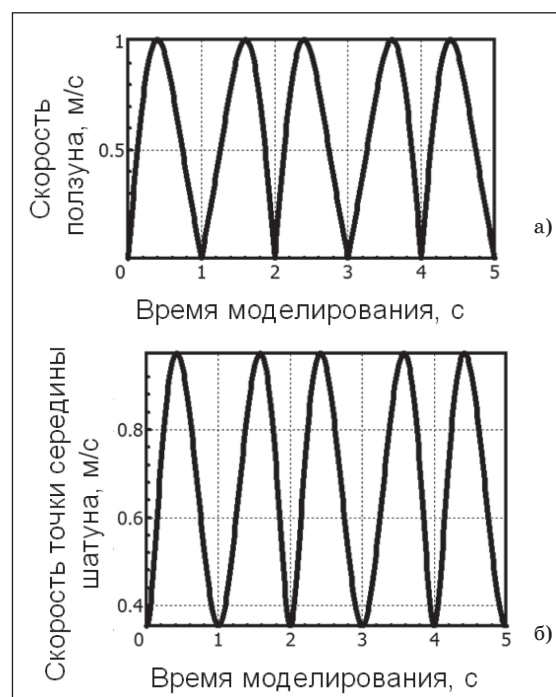


Рис. 3. Графики скорости звена и скорости точки на звене кривошипно-шатунного механизма

точек звеньев. Результаты кинематического анализа после составления модели генерируются комплексом и могут быть выведены в двух позициях: в виде графиков и в виде векторов.

Программный комплекс позволяет выводить графики изменения кинематических параметров для различных звеньев в зависимости от времени. На рис. 3 показаны примеры таких графиков для скоростей: а – график изменения скорости ползуна в зависимости от времени; б – график изменения скорости точки середины шатуна. На рис. 4 представлены примеры графиков для ускорений: а – график ускорения ползуна; б – график ускорения точки середины шатуна. Аналогичные

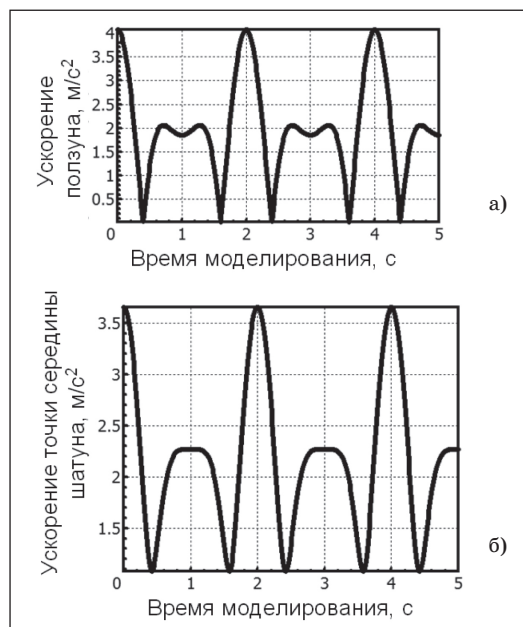


Рис. 4. Графики ускорения звена и ускорения точки на звене кривошипно-шатунного механизма

графики можно получить и по другим точкам на звеньях, а также по угловым скоростям и ускорениям звеньев. Моделирование выполнено при постоянной угловой скорости кривошипа равной 0,5 об/с, время моделирования 5 с.

Комплекс позволяет выводить годографы скоростей и ускорений. На рис. 5 представлены примеры годографов скоростей и ускорений, построенных для точки середины шатуна, где *а* – годограф скорости; *б* – годограф ускорения.

Вывод кинематических данных в виде графиков, сгенерированных программным комплексом, – это, в сущности, решение задачи о построении кинематических диаграмм, что позволяет отказаться

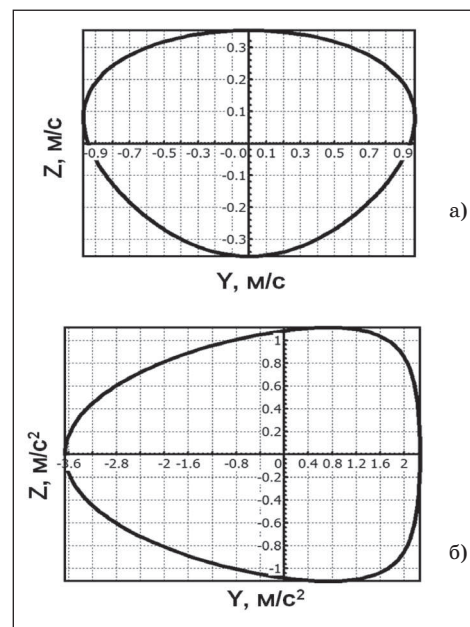


Рис. 5. Годографы скоростей и ускорений кривошипно-шатунного механизма

в практике преподавания курса «Теория механизмов и машин» от изучения методов графического дифференцирования и интегрирования.

Кинематические параметры могут быть выведены в виде векторов. На рис. 6 показан пример механизма с изображением мгновенных векторов скоростей для ползуна и точки середины шатуна для двух положений механизма.

На рис. 7 показан пример механизма с изображением мгновенных ускорений для ползуна и точки середины шатуна для двух положений механизма.

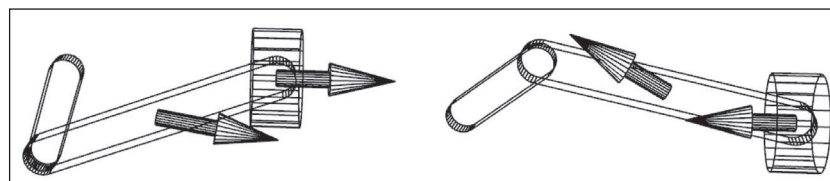


Рис. 6. Кривошипно-шатунный механизм с векторами скоростей

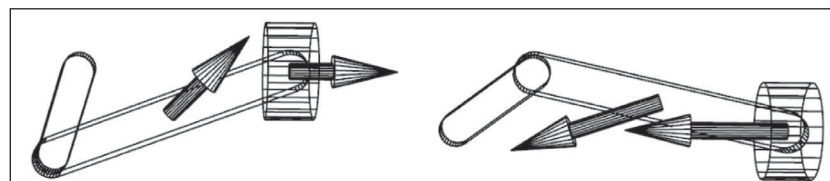


Рис. 7. Кривошипно-шатунный механизм с векторами ускорений

Программный комплекс позволяет анимировать механизм, и можно наблюдать, как меняются значения и направления векторов при движении звеньев механизма.

Вывод результатов кинематического анализа в виде векторов позволяет частично получить аналог кинематического анализа методом построения планов скоростей и ускорений, широко освещенного в классическом курсе.

Отличие при использовании программного комплекса в том, что векторы скоростей и ускорений выводятся непосредственно в точках на

звеньях механизма и на механизме показываются только векторы абсолютных скоростей и ускорений. Значения относительных скоростей и ускорений можно вывести в виде графиков.

Кулисный механизм. Аналогичные результаты кинематического анализа представим для кулисного механизма. Вид геометрической модели в разных ракурсах, построенной в программном комплексе (длина кривошипа 0,5 м, длина кулисы 1,5 м, расстояние между опорами кривошипа и кулисы – 1 м), представлен на рис. 8, где 1 – кривошип; 2 – кулисный камень; 3 – кулиса.

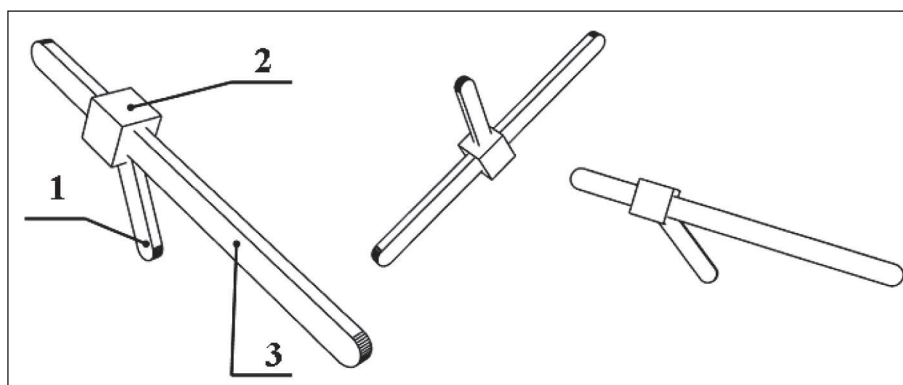


Рис. 8. Модель кулисного механизма

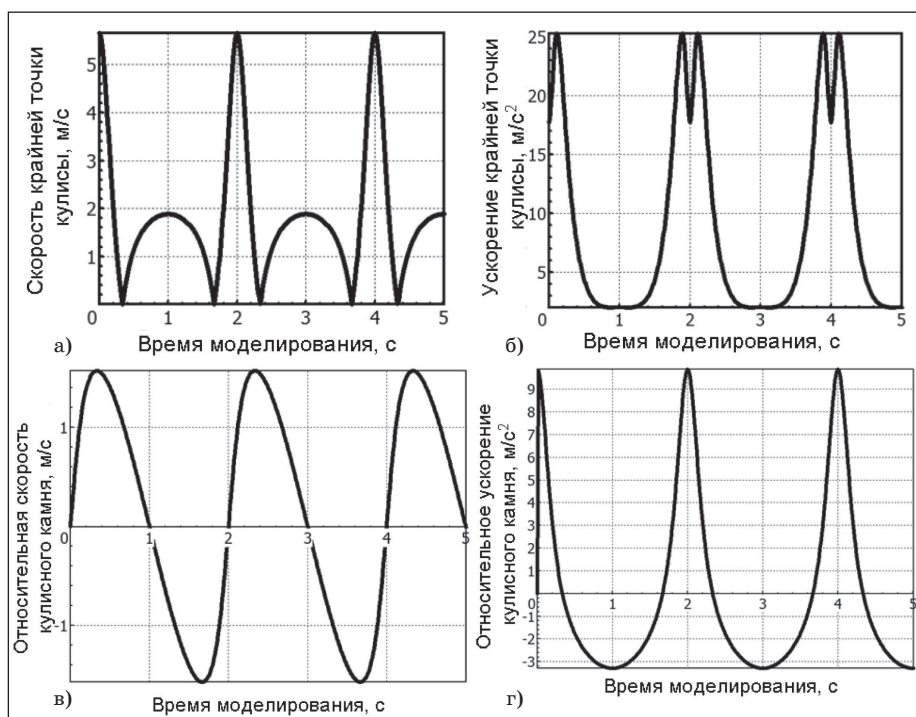


Рис. 9. Графики скоростей и ускорений точек и звеньев кулисного механизма

Примеры графиков скоростей и ускорений в зависимости от времени представлены на рис. 9: *а* – график скорости крайней точки кулисы; *б* – график ускорения крайней точки кулисы; *в* – график относительной скорости кулисного камня; *г* – график относительного ускорения кулисного камня. Аналогичные графики можно построить и для угловых скоростей и ускорений звеньев.

На рис. 10 представлены примеры годографов скоростей (*а*) и ускорений (*б*) крайней точки кулисы. Моделирование выполнено при постоянной угловой скорости кривошипа, равной 0,5 об/с, время моделирования 5 с.

Примеры модели механизма с указанием мгновенных векторов скоростей и ускорений для крайней точки кулисы и векторов скоростей и ускорений кулисного камня относительно точки на кулисе для некоторого положения звеньев представлены на рис. 11: *а* – механизм с векторами скоростей; *б* – механизм с векторами ускорений.

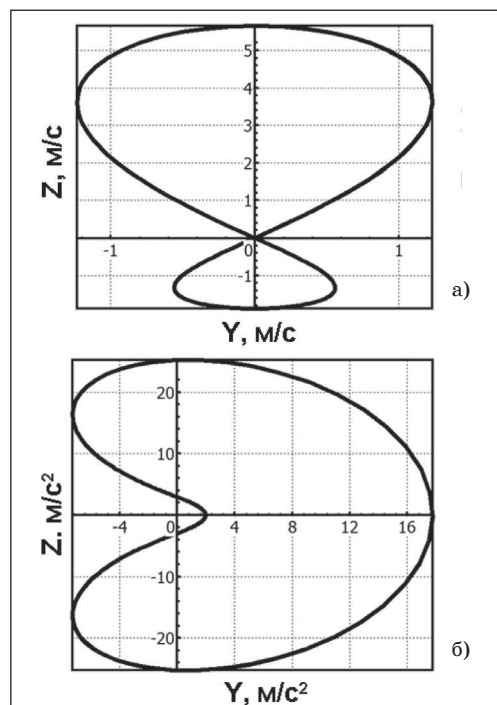


Рис. 10. Годографы скоростей и ускорений крайней точки кулисы

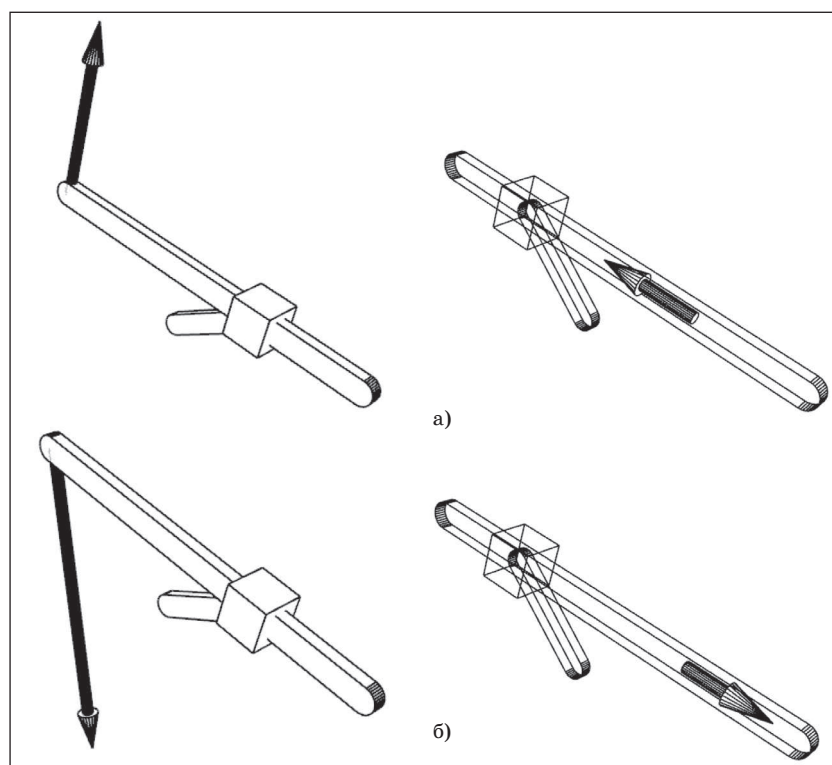


Рис. 11. Кулисный механизм с векторами скоростей и ускорений

Шарнирный четырёхзвенный механизм. Модель механизма построена для исходных данных: длина кривошипа 0,4 м; длина шатуна 1,04 м; длина коромысла 0,7 м, расстояние между опорами кривошипа и коромысла – 1 м. На рис. 12 звенья механизма: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – коромысло. Кинематический анализ выполнен для постоянной угловой скорости кривошипа, равной 0,5 об/с, время моделирования 5 с. На рис. 12 представлены модель механизма и траектория движения средней точки шатуна в координатах ZY.

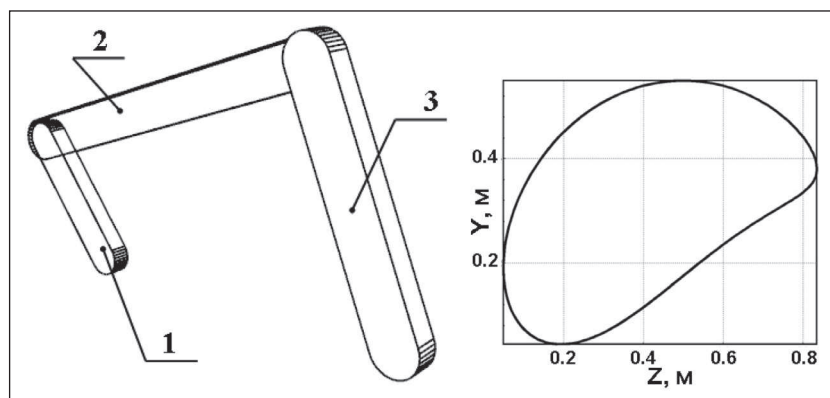


Рис. 12. Модель шарнирного четырёхзвенного механизма и траектория движения точки шатуна

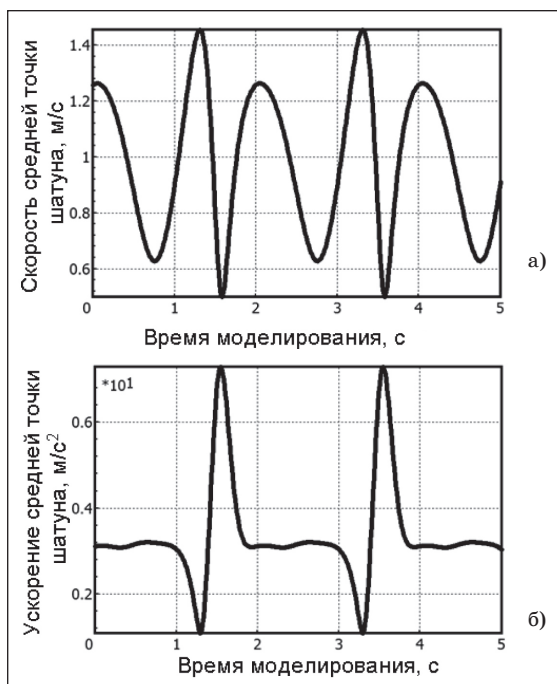


Рис. 13. Графики скорости и ускорения движения точки на шатуне шарнирного четырёхзвенного механизма

Примеры графиков скорости и ускорения точки, расположенной в середине шатуна, представлены на рис. 13: а – график скорости; б – график ускорения.

Примеры годографов скоростей и ускорений точки, расположенной в середине шатуна, представлены на рис. 14: а – годограф скоростей; б – годограф ускорений.

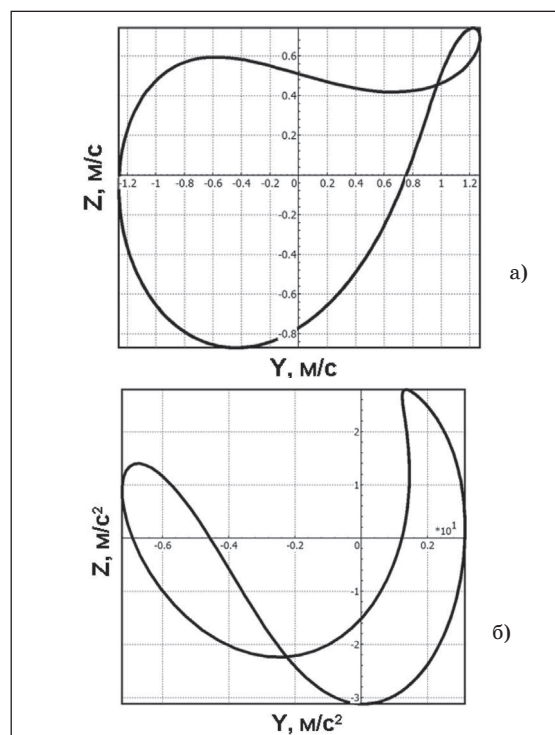


Рис. 14. Годографы скоростей и ускорений точки на шатуне

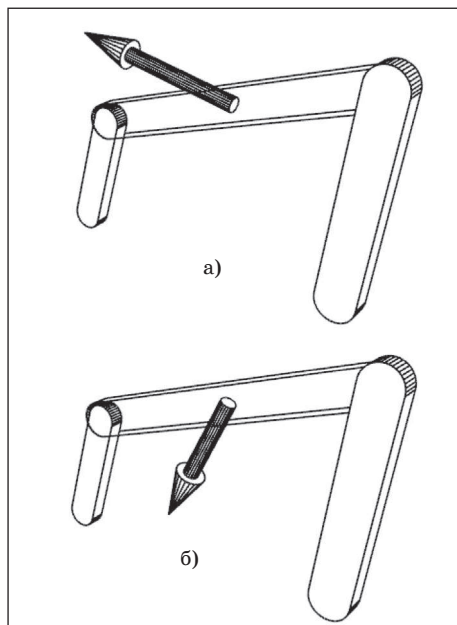


Рис. 15. Шарнирный четырёхзвенный механизм с векторами скоростей и ускорений

Примеры механизма с мгновенными векторами скорости и ускорения для точки, расположенной, на середине шатуна для некоторого положения механизма, представлены на рис. 15: *а* – модель с вектором скорости; *б* – модель с вектором ускорения.

Шестизвенный механизм. Модель механизма представлена на рис. 16. На рис. 16 звенья механиз-

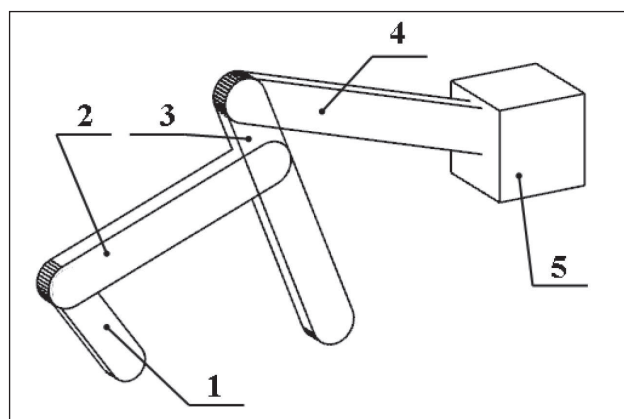


Рис. 16. Модель шестизвенного механизма

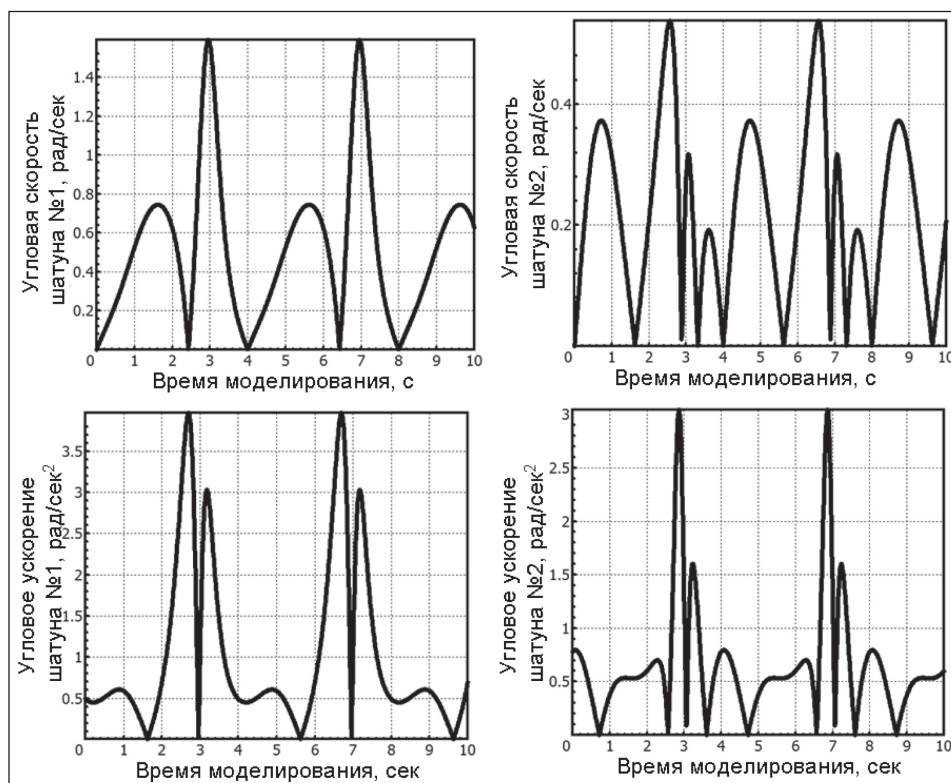


Рис. 17. Примеры графиков угловых скоростей и ускорений шатунов шестизвенного механизма

ма: 1 – кривошип; 2 – шатун № 1; 3 – коромысло; 4 – шатун № 2; 5 – ползун. В механизме длина кривошипа равна 0,3 м; длина коромысла – 0,7 м; длина шатуна № 1 – 0,632 м; длина шатуна № 2 – 0,854 м, расстояние между опорами кривошипа и коромысла – 0,6 м, расстояние от стойки до шарнира соединения шатуна 1 и коромысла – 0,9 м, высота расположения направляющей ползуна относительно стоек кривошипа и коромысла – 0,4 м.

Примеры графиков угловых скоростей и ускорений шатунов при постоянной угловой скорости кривошипа, равной 0,5 об/с, и времени моделирования 10 с представлены на рис. 17: а – график угловой скорости шатуна № 1; б – график угловой скорости шатуна № 2; в – график углового ускорения шатуна № 1; г – график углового ускорения шатуна № 2.

Примеры годографов скоростей и ускорений средней точки шатуна № 2 механизма представлены на рис. 18: а – годограф скоростей средней точки шатуна № 2; б – годограф ускорений средней точки шатуна № 2.

Примеры механизма с мгновенными векторами скоростей и ускорений для точек на шатунах и ползуне для некоторого положения механизма представлены на рис. 19: а – модель с векторами скоростей; б – модель с векторами ускорений.

Комплекс позволяет проводить кинематический анализ механизма, когда начальное звено вращается неравномерно. Представим пример результатов моделирования кинематики шестизвенного механизма при вращении кривошипа с угловой скоростью, изменяющейся по закону

$$\omega(t) = \frac{\pi}{2} \cdot t^2 - t, \text{ где } t - \text{ время.}$$

Примеры графиков угловых скоростей шатунов механизма представлены на рис. 20: а – график угловой скорости шатуна №1; б – график угловой скорости шатуна № 2.

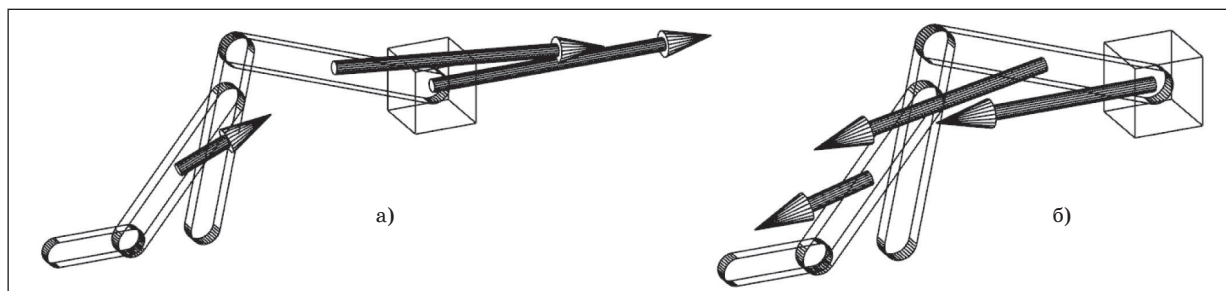


Рис. 19. Шестизвенный механизм с векторами скоростей и ускорений

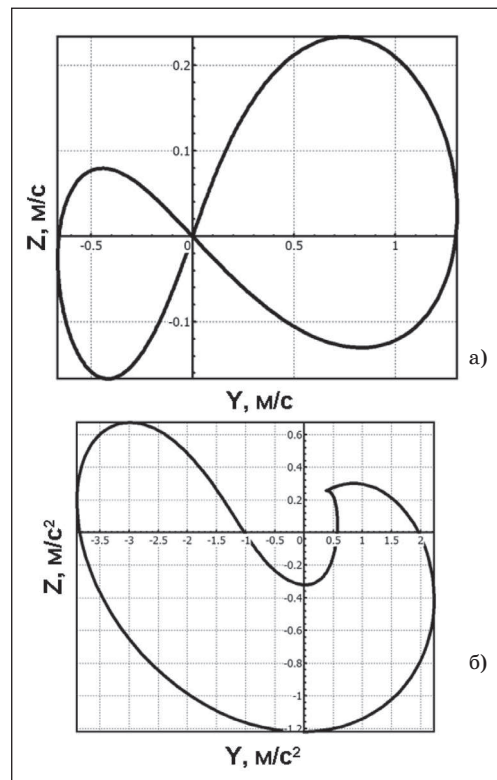


Рис. 18. Годографы скоростей и ускорений средней точки шатуна № 2 шестизвенного механизма

Примеры графиков угловых ускорений шатунов механизма представлены на рис. 21: а – график углового ускорения шатуна №1; б – график углового ускорения шатуна № 2.

Рассмотренные примеры кинематического анализа плоских рычажных механизмов, выполненные в программном комплексе «Универсальный механизм», показывают, что современные информационные технологии позволяют достаточно быстро и качественно решать прикладные задачи механики. Целесообразно

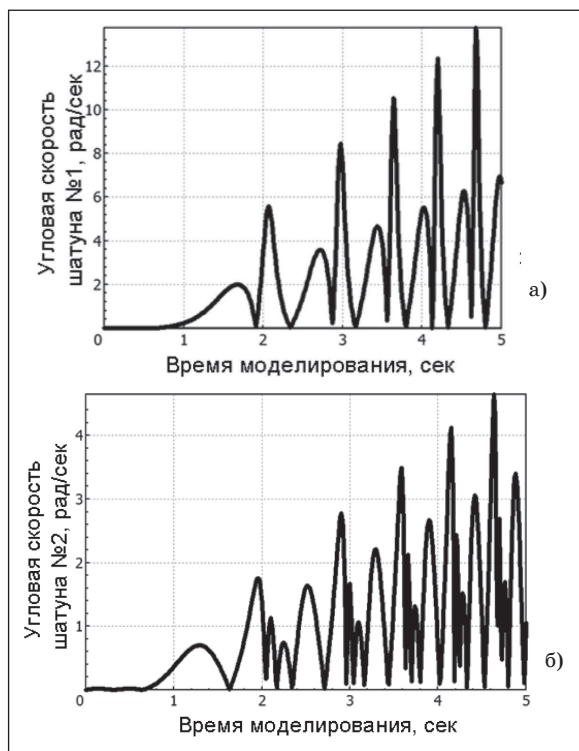


Рис. 20. Примеры графиков угловых скоростей шатунов шестизвенного механизма при неравномерном вращении кривошипа

внедрять такие комплексы в учебный процесс и вместо устаревших методов изучать возможности этих программ при решении различных задач. Однако существует опасность, что при полном погружении в пользовательскую среду тех или иных программных комплексов студенты потеряют связь с фундаментальными законами. В этой связи курс «Теория механизмов и машин» можно разделить на два курса или дополнить общепрофессиональную подготовку дополнительной дисциплиной. В одной части курса студенты должны знакомиться и учиться решать реальные прикладные задачи, моделировать движения звеньев механизма, исследовать влияние различных факторов на механические свойства механизмов и их систем с помощью возможностей современных систем автоматизированного проектирования, причём необходимо это делать уже именно в рамках курса «Теория механизмов и машин», а не выводить знакомство с этими системами на уровень старших курсов университета, когда не-

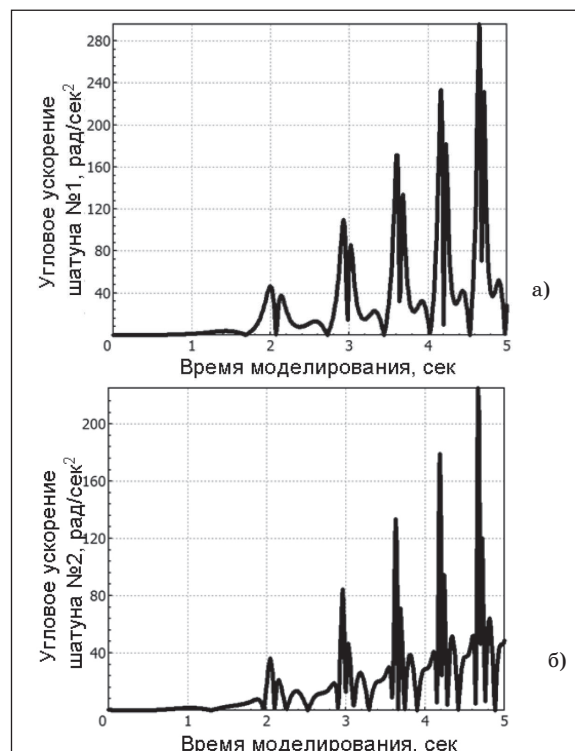


Рис. 21. Примеры графиков угловых ускорений шатунов шестизвенного механизма при неравномерном вращении кривошипа

обходимо решать специальные задачи отраслевых дисциплин. Вторую часть курса или отдельную дополнительную дисциплину посвятить истории появления и развития методов решения задач прикладной механики – «История прикладной механики», «История теории механизмов и машин» и др. В этой части как раз проводить анализ и рассказывать о том, как решались, с помощью какого инструментария, те или иные задачи механики, где и освещать графические методы кинематического анализа. Такой подход также целесообразен при разделении бакалавриата на академический и прикладной. В академическом бакалавриате целесообразно рассматривать более широко вопросы истории и развития прикладных методов в их взаимосвязи с общим контекстом развития инженерии, а в прикладном бакалавриате эту часть сужать за счет более тесного знакомства с системами автоматизированного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1975. – 638 с.
2. *Тимофеев Г.А.* Теория механизмов и машин: учебник и практикум для прикладного бакалавриата. – М.: Юрайт, 2015. – 429 с.
3. *Конищева О.В.* Теория механизмов и машин: учеб. пособие / О.В. Конищева, Е.В. Брюховецкая, П.Н. Сильченко. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 330 с.
4. *Гущин А.Н.* Теория механизмов и машин: комплекс учебно-методических материалов / А.Н. Гущин, И.В. Воробьева. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2012. – Ч. 1. – 176 с.
5. *PTC Mathcad* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad> (дата обращения: 23.06.2016).
6. *MathWorks* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (дата обращения: 23.06.2016).
7. *MSC Software* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mscsoftware.ru/products/adams> (дата обращения: 23.06.2016).
8. *Universal Mechanism. Software Lab* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.umlub.ru/> (дата обращения: 23.06.2016).

Piskunov M.A., Adamov D.V.
Petrozavodsk State University,
Petrozavodsk, Russia

**MODERN SOFTWARE PACKAGE
APPLICATION FOR KINEMATIC ANALYSIS
OF PLANAR LINKAGES IN THE COURSE
«MECHANISM AND MACHINE THEORY»**

Keywords: mechanism, kinematics, information technology, analyze, engineering education.

Russian higher education system needs to be modernized concerning educational programs in view of transition to the Bachelor's and Master's degree system; it is because of differences in academic term of baccalaureate. Nowadays Russian baccalaureate engineering programs are based on typical programs of five-year term being developed in the USSR. Students must acquire all the necessary information within four years instead of five years. At the same time, they should obtain sufficient professional scope and skills for solving industrial problems, as well as skills for generating new ideas. Thereupon, university teachers should pay attention to the methods that can be used for educational courses improvement.

“Mechanism and machine theory” is a significant course in mechanical engineering. Kinematics of planar linkages is one of the sections of this subject. The traditional approaches in solving of kinematic

problems are based on graphical methods such as a method of kinematic diagrams or a method of velocities and accelerations of vector polygons.

However, for solving applied problems these methods are not appropriate at present. Simulation via special software packages is more worthwhile than graphic methods for simulation of mechanisms kinematics. The paper shows the result of special software “Universal Mechanism” (“UM”) application for making kinematic analysis of the mechanism.

The kinematic analysis was carried out for four mechanisms: the slider-crank mechanism, the inversion of slider-crank mechanism, the crank-and-rocker mechanism and the six-link mechanism composed of a crank, two couplers, the rocker and a slider. With the help of the software “UM” it was carried out as follows: simulation of links and kinematic pairs of mechanisms, generation of mechanisms animation, and kinematic analysis. The kinematic parameters (velocities, accelerations of particles and links, trajectories of particles) were generated by the software automatically. The result is shown in two ways in the article.

The first type is the graphics of kinematic parameters vs. time, for example a plot of absolute velocity of a particle in the middle of a coupler vs. time or a plot of angular acceleration of a rocker vs. time, or a plot of a particle trajectory. Several examples of different plots are presented in the article.

The second type is a representation of velocity and acceleration vectors. The vectors are marked on the links of the mechanisms. When animating mechanisms in the “UM”, the modulus of vectors and their directions are changed. The plots and the vectors made by the “UM” are the analogues of graphical methods of kinematics.

The kinematic analysis presented in the article was performed for two variants. The first variant is kinematics of the mechanism with a constant angular velocity of the cranks. The second variant is kinematics of the six-link mechanism with an inconstant angular velocity of the crank.

The result presented in the article proves the necessity of wide application of “UM” and other types of special software of mechanical simulation in educational engineering. The authors give some recommendations on introduction of the “UM” and other complexes in the educational process.

REFERENCES

1. *Artobolevskij I.I.* Teorija mehanizmov i mashin. – M.: Nauka, 1975. – 638 s.

2. *Timofeev G.A.* Teorija mehanizmov i mashin: uchebnik i praktikum dlja prikladnogo bakalav-riata. – M.: Jurajt, 2015. – 429 s.

3. *Konishheva O.V.* Teorija mehanizmov i mashin: ucheb. posobie / O.V. Konishheva, E.V. Brjuhovec-kaja, P.N. Sil'chenko. – Krasnojarsk: Sib. feder. un-t, 2013. – 330 s.

4. *Gushhin A.N.* Teorija mehanizmov i mashin: kompleks uchebno-metodicheskikh materialov / A.N. Gushhin, I.V. Vorob'eva. – Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gos. tehn. un-t, 2012. – Ch. 1. – 176 s.

5. *PTC Mathcad* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad> (data obrashhenija: 23.06.2016).

6. *MathWorks* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (data obrashhenija: 23.06.2016).

7. *MSC Software* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.mssoftware.ru/products/adams> (data obrashhenija: 23.06.2016).

8. *Universal Mechanism Software Lab* [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://www.umlub.ru/> (data obrashhenija: 23.06.2016).