

ИНТЕГРАЦИЯ САПР В ОБУЧЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Путеев П.А.

Тольяттинский государственный университет, Тольятти

Ключевые слова: САПР, метод планов, кинематический анализ, обучение теории механизмов и машин, четырехзвенный механизм.

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ графоаналитических методов и численного моделирования в САПР для кинематического анализа плоских механизмов. На примере четырехзвенного механизма показано, что оба подхода дают согласованные результаты. Разработаны рекомендации по интеграции методов в обучение Теории механизмов и машин: использование САПР для верификации ручных расчетов и визуализации движения. Результаты демонстрируют, что совмещение подходов повышает точность, наглядность и мотивацию студентов.

INTEGRATION OF CAD INTO EDUCATION FOR KINEMATIC ANALYSIS OF PLANAR MECHANISMS

Puteev P.A.

Togliatti State University, Togliatti

Keywords: CAD, velocity polygon method, kinematic analysis, theory of machines and mechanisms education, four-bar linkage.

Abstract. The study conducts a comparative evaluation of analytical techniques and numerical simulations in CAD for kinematic analysis of planar mechanisms. Through a case study of a four-bar linkage, it is established that both methodologies achieve concordant outcomes. Recommendations on the integration of methods in teaching the theory of mechanisms and machines have been developed, emphasizing CAD-based verification of manual computations and dynamic visualization. The findings underscore that the synergy of these methods enhances precision, didactic effectiveness, and learner engagement.

Актуальность. Кинематический анализ механизмов – ключевой навык инженеров, однако в обучении Теории механизмов и машин (ТММ) сохраняется разрыв между традиционными методами и цифровыми инструментами. Традиционные подходы (планы скоростей, метод диаграмм, аналитические методы) развивают понимание физики процессов, но трудоемки и подвержены ошибкам. САПР используют численные методы для автоматизации расчетов, обеспечивая точность и визуализацию, однако студенты редко видят связь между теорией и алгоритмами программного обеспечения (ПО).

Цель работы – устранить этот дисбаланс через сравнение методов на примере четырехзвенного механизма:

- 1) графический и графоаналитический расчеты (планы скоростей/ускорений);
- 2) численный анализ в САПР.

Исследование показывает, как интеграция САПР в обучение укрепляет фундаментальные знания, демонстрируя студентам практическое применение теории в современных инженерных решениях.

Введение. Современные исследования в области численного моделирования [1], демонстрируют возможности модификации алгоритмов для повышения точности кинематического анализа. Это особенно актуально в контексте обучения, где автоматизация расчетов дополняет традиционные методы [2, 3]. Кинематический анализ механизмов, включая определение скоростей и ускорений, является важным элементом подготовки инженеров. Однако в учебном процессе сохраняется проблема: студенты часто воспринимают традиционные методы (графоаналитические и графические) как устаревшие, аналитические как сложные [4-6], а численные алгоритмы САПР – как «магию», не связанную с теорией. Это снижает как мотивацию, так и глубину понимания дисциплины. Как правило САПР в образовательном процессе заключается в применении параметрических моделей [7-10] для проектирования структурных и кинематических схем, использовании аналитических решений в САПР типа MatchCAD [11, 12].

Цель работы – продемонстрировать методическую ценность интеграции разных подходов в обучении теории механизмов и машин. Задача включает определение скорости ползуна кривошипно-ползунного механизма каждым методом за исключением аналитического метода, оценку их погрешностей, а также разработку рекомендаций по интеграции подходов в учебный процесс для повышения наглядности и эффективности обучения теории механизмов и машин. На примере четырехзвенного механизма:

- показано, что традиционные методы (построение планов скоростей, диаграмм аналога скорости) и численное моделирование в САПР кинематического анализа дают согласованные результаты;
- раскрыто, как совпадение данных методов укрепляет уверенность студентов в корректности расчетов;
- предложены способы использования САПР для визуализации движения механизмов, что повышает наглядность и вовлеченность.

Педагогическая значимость исследования заключается в следующем:

Для студентов:

- сравнение ручных и автоматизированных методов формирует целостное понимание кинематики: от физических принципов до их цифровой реализации;
- визуализация в САПР (анимация траекторий, графики скоростей) делает абстрактные расчеты «осознаваемыми», упрощая восприятие;
- возможность самостоятельно проверить ручные расчеты через моделирование развивает критическое мышление.

Для преподавателей:

- работа предлагает идеи лабораторных работ, где задания на традиционные методы дополняются заданиями по верификации в САПР;
- демонстрация движения механизма в динамике (например, изменение траектории при варьировании длины звеньев) усиливает объяснение сложных концепций.

Научная ценность работы заключается в систематизации подхода к обучению. Определена количественно погрешность диаграмм аналогов скоростей по сравнению с планами, возникающая вследствие ручных построений и округлений, и показано, как САПР помогает выявлять и корректировать такие

ошибки. Разработаны критерии сравнения методов: не только точность, но и время освоения, сложность интерпретации, потенциал для визуализации.

Исследование доказывает, что интеграция методов – не техническая формальность, а способ преодолеть разрыв между теорией и практикой. Студенты, видящие, как их ручные расчеты подтверждаются точными цифровыми симуляциями, начинают глубже понимать как основы кинематики, так и возможности современных технологий. Это особенно важно в контексте цифровизации образования, где баланс между фундаментальными знаниями и навыками работы с ПО становится ключевым требованием к подготовке инженеров.

Методика исследования. Внедрение САПР кинематического анализа в преподавание дисциплины «Механика. Теория механизмов и машин» студентам второго курса обучения ведется на протяжении второго года. В практические и лабораторные работы введено изучение использования САПР для решения задач, решаемых традиционными методами обучения.

Для обеспечения корректности сравнительного анализа все методы применены к единому положению механизма ($\varphi = 120^\circ$), с использованием идентичных исходных данных: длины звеньев и угловой скорости кривошипа (12 рад/с). Погрешности графического метода, связанные с ручными построениями, можно частично скомпенсировать увеличением числа положений механизма. Использование инструментов векторной графики в САПР позволяет снизить влияние человеческого фактора на точность расчетов и провести верификацию данных, полученных в САПР. Используемые инструменты:

- графоаналитический и графический методы: КОМПАС v22;
- численный метод: NX 12 Motion Simulation.

Графоаналитический применялся для определения скоростей и ускорений точек четырёхзвенного механизма, состоящего из кривошипа, шатуна, ползуна и стойки (рис. 1). Схема построена в масштабе $\mu_L = 0,001$ м/мм. Угловая скорость кривошипа составляет $\omega_1 = 12$ рад/с.

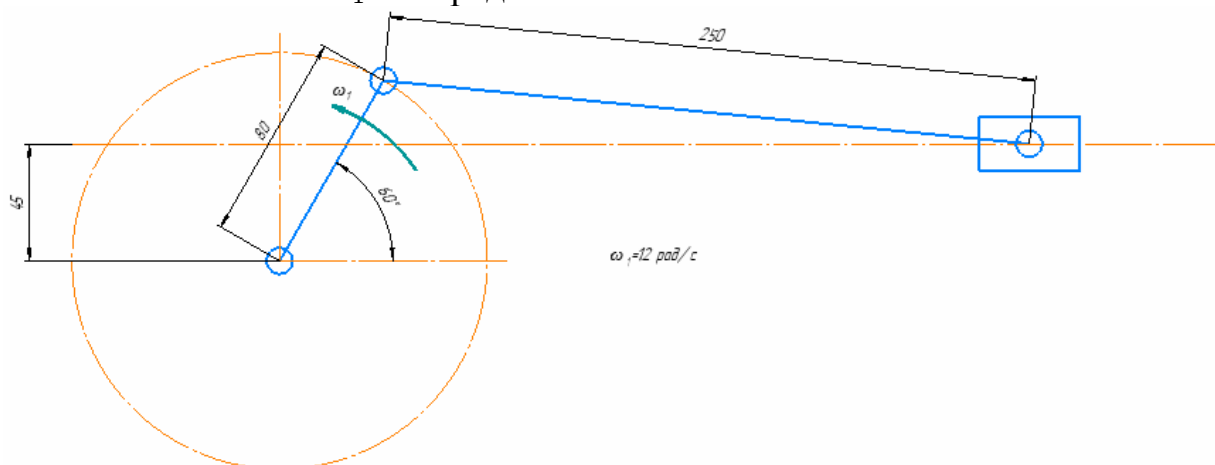


Рис. 1. Схема кривошипно-ползунного механизма

Определение скоростей выполняется методом планов скоростей, основанным на векторных уравнениях (рис. 2). Векторные величины измеряются по построенному плану с учетом масштаба ($\mu_v = 0,01$ м/(мм·с)). Такой подход обеспечивает наглядность и точность, необходимые для учебных задач.

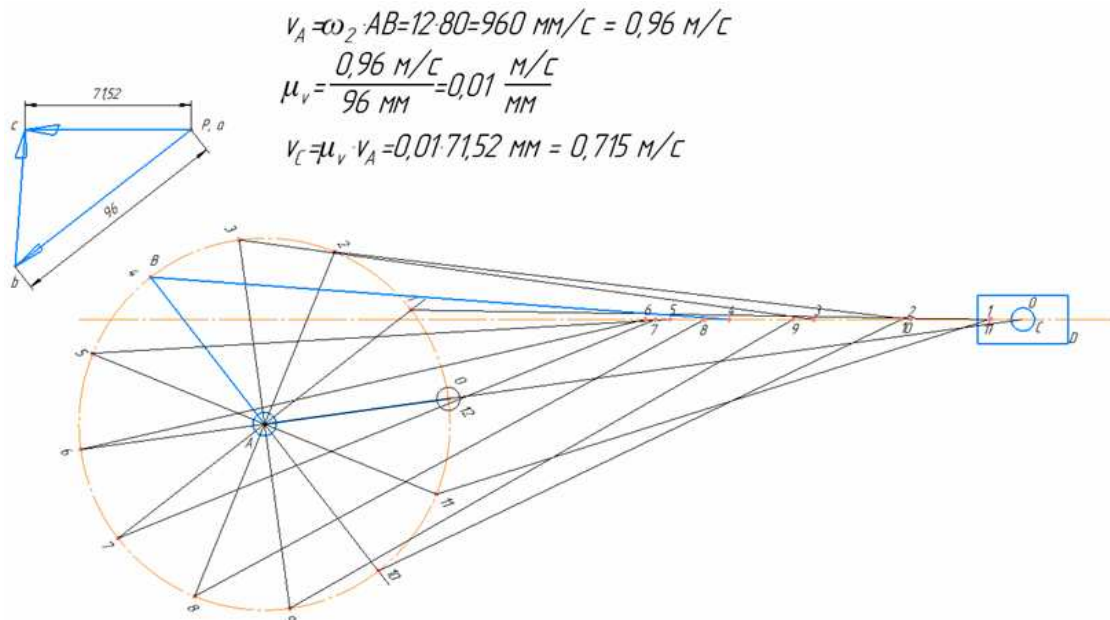


Рис. 2. План скоростей для четвертого положения (угол поворота кривошипа 120°)

Известна педагогическая ценность метода:

- Развивает навыки работы с векторной алгеброй и геометрией.
- Наглядно демонстрирует распределение скоростей и ускорений в механизме.

Для анализа кинематики механизма применен графический метод диаграмм аналога скоростей, основанный на представлении зависимостей параметров движения в координатной системе. На первом этапе построены диаграммы перемещения ползуна для 12 дискретных положений кривошипа, где по оси абсцисс отложен угол его поворота φ , а по оси ординат – линейное перемещение s точки D. Далее методом графического дифференцирования получена диаграмма аналога скорости точки D, отражающая зависимость $V_D = f(\varphi)$ (рис. 3). Скорость определена через масштабный коэффициент аналога скорости $\mu_{ds/dt}$, связывающую угловое движение кривошипа с поступательным перемещением ползуна. Для угла $\varphi = 120^\circ$ значение скорости точки D составило 0,712 м/с, что соответствует данным, полученным графоаналитическим методом построения планов скоростей и отличается в связи с неточностью графического интегрирования и округлением масштабных коэффициентов.

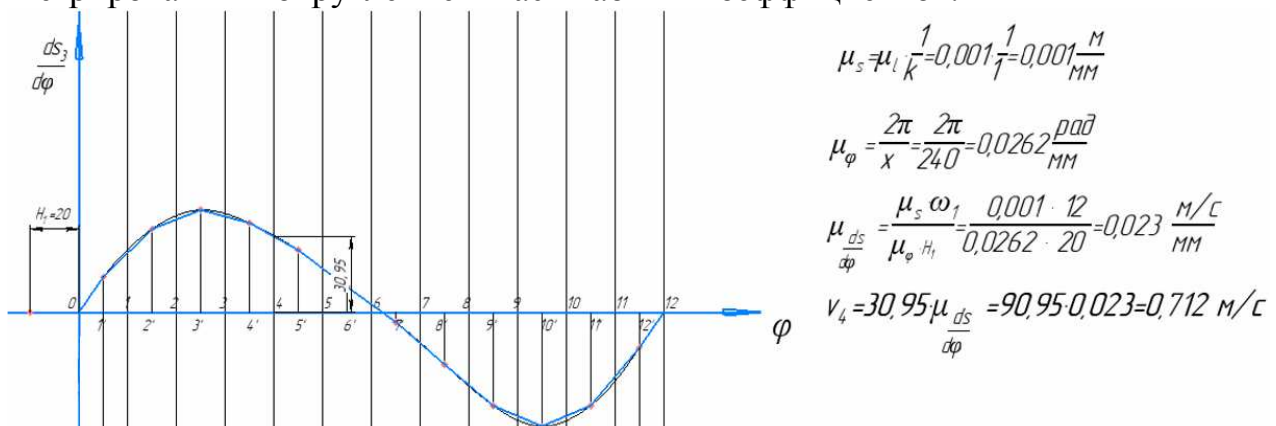


Рис. 3. Диаграмма аналога скорости с демонстрацией величины скорости для 4-ого положения ($\varphi = 120^\circ$)

Практическое совпадение результатов подтверждает корректность обоих подходов, несмотря на различия в их реализации: графический метод опирается на визуализацию зависимостей, а графоаналитический – на векторные уравнения. Педагогическая ценность:

- учит студентов связывать геометрию механизма с аналитическими зависимостями;
- позволяет визуализировать изменение параметров в зависимости от положения звеньев.

Численное моделирование кинематики четырёхзвенного механизма выполнено в среде NX Motion Simulation, что позволило автоматизировать расчет скоростей. На первом этапе создана электронная плоскостная модель механизма с соблюдением геометрических параметров. Кинематические пары заданы в соответствии со схемой механизма (рис. 4). Угловая скорость кривошипа установлена равной 12 рад/с.

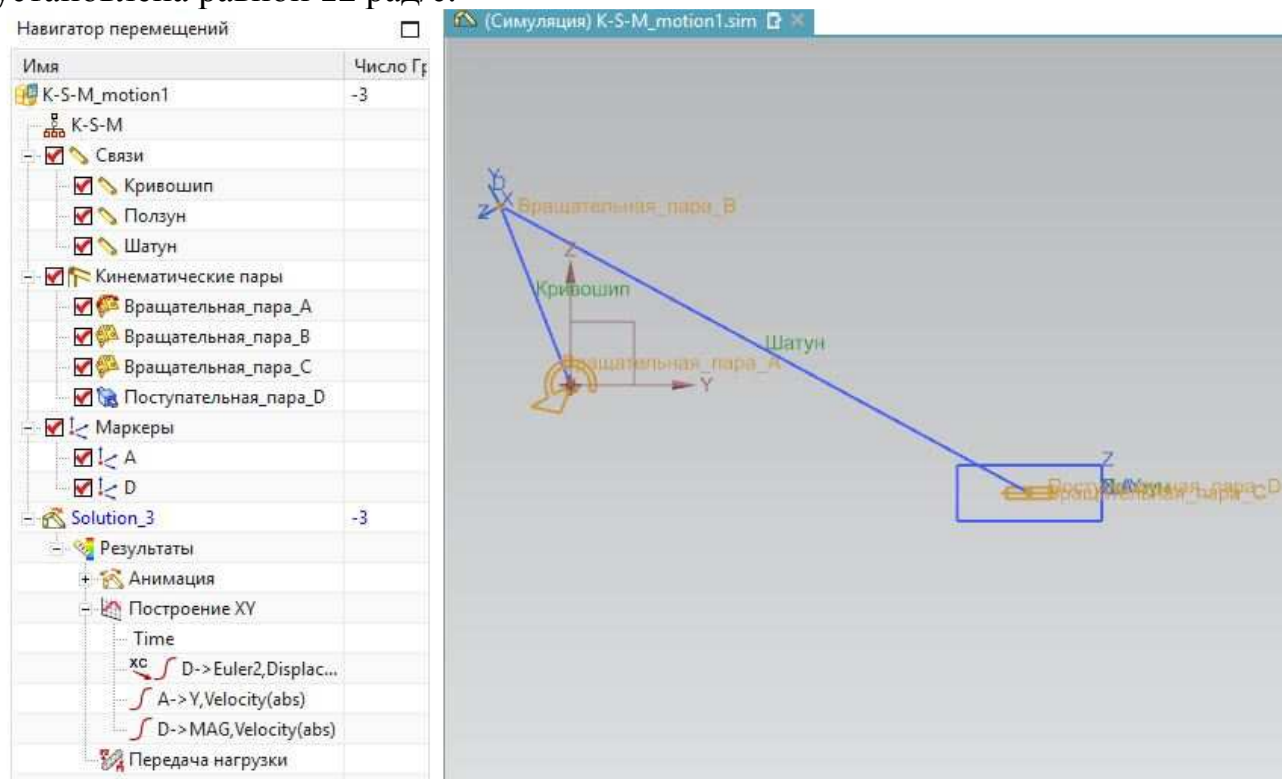


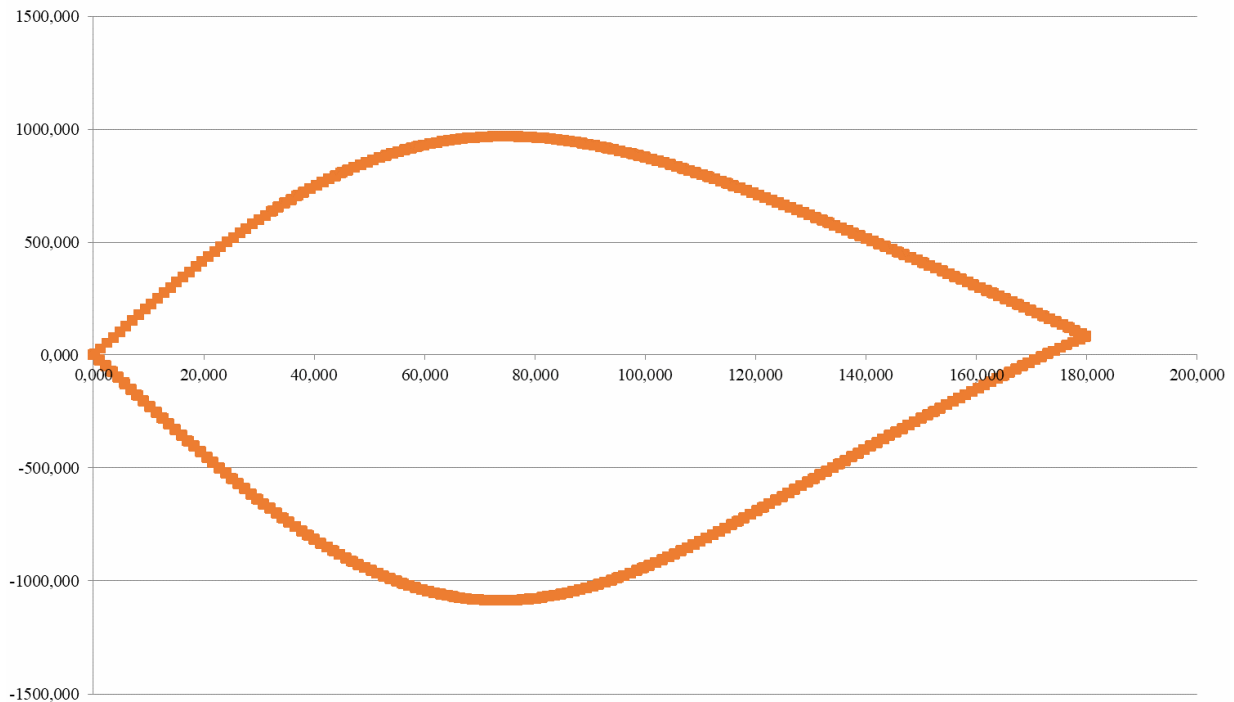
Рис. 4. Параметры препроцессора кинематического анализа на примере NX

Для расчета динамики использован решатель RecurDyn с параметрами: время симуляции 1 с, число шагов 300. Результаты моделирования, включая графики скорости точки D и угла поворота кривошипа, экспортированы в табличный редактор (рис. 5). При $\varphi = 120^\circ$ скорость точки D составила $\sim 0,713$ м/с (рис. 6), что сходится с данными, полученным традиционными методами.

Такое совпадение подтверждает корректность как численного моделирования, так и ручных расчетов, несмотря на различия в подходах: САПР опирается на дискретизацию уравнений движения, а графо-аналитика – на векторные построения. Педагогическая ценность:

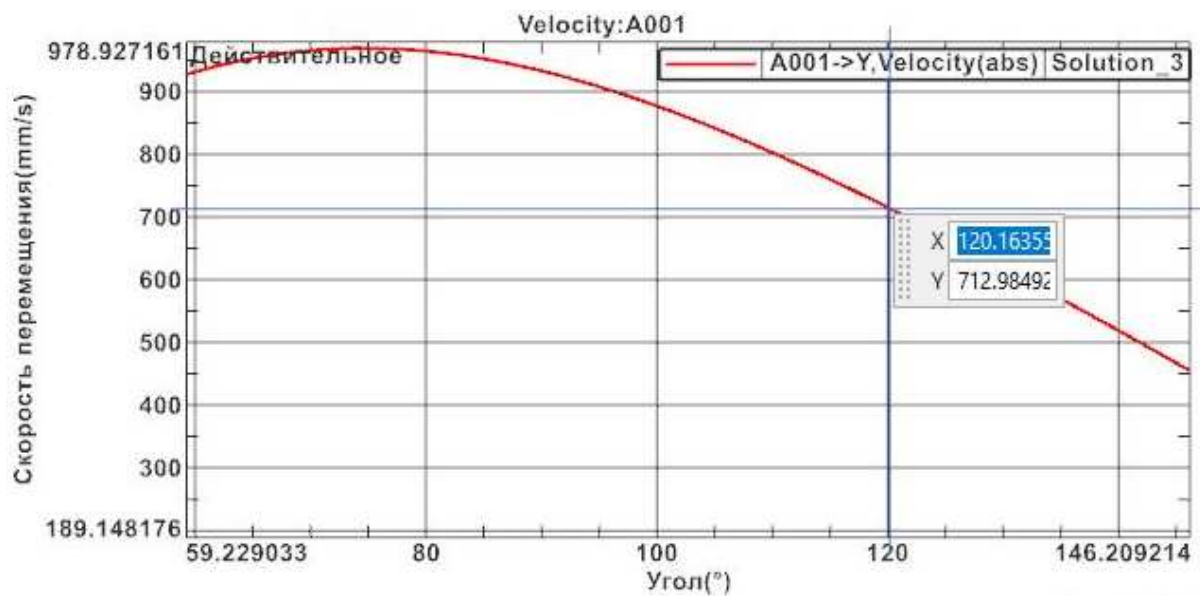
- демонстрирует работу численных алгоритмов;
- позволяет анимировать движение механизма, усиливая понимание динамики.

Скорость ползуна в проекции на ось -Y, мм



Поворот кривошипа, градусы

Рис. 5. Диаграмма аналога скорости ползуна для кинематической модели ($\varphi = 120^\circ$), построенной в NX



Page 3 of 3

Рис. 6. Участок диаграммы аналога скорости ползуна

Описанные методы позволяют получить данные о кинематике четырёхзвенного механизма, но различаются по трудоемкости и наглядности. Их совместное использование в обучении помогает студентам:

- освоить связь между геометрическими, аналитическими и численными подходами;
- научиться верифицировать результаты ручных расчетов через автоматизированные инструменты;
- сформировать критическое мышление через анализ погрешностей для традиционных методов в сравнении с САПР.

Результаты. Проведено сравнение методов кинематического анализа четырехзвенного механизма ($\varphi = 120^\circ$).

1. Анализ определения величины скорости звена (табл. 1).

– Метод планов: результаты получены через векторные построения. Точность получения величин очень высока. Погрешность связана с округлением до конкретного числа знаков снятия измерений. В случае построения на бумаге, точность падает также в связи с неточностью построения. Расхождения с САПР – 0,42%.

– Диаграммы аналога скорости: скорости рассчитаны графическим дифференцированием. Точность определяется количеством положений. Расхождения с САПР – 0,28%.

– САПР: данные экспортированы из NX Motion Simulation. Точность определяется погрешностью решателя и числом шагов симуляции.

Табл. 1. Сравнение результатов

Параметр	Метод планов скоростей	Диаграмма аналога скорости	САПР (NX)	Погрешность	
				метод планов/САПР	метод диаграмм/САПР
Скорость точки В, м/с	0,715	0,712	0,713	0,42%	0,28%

2. Визуализация движения. В NX Motion Simulation создана анимация механизма, наглядно показывающая траекторию точки D и изменение скоростей в реальном времени.

3. Педагогические наблюдения. Студенты, выполнявшие расчеты вручную и проверявшие их в САПР, отмечали:

- повышение уверенности в результатах;
- лучшее понимание распределения скоростей благодаря анимации;
- повышение доверия к теоретическому расчету.

Все методы дают согласованные результаты (погрешность $\leq 1\%$), что подтверждает их корректность. САПР устраняет субъективные ошибки ручных методов, но требует понимания теории для настройки модели. Визуализация в САПР повышает наглядность, помогая студентам связать абстрактные расчеты с реальным движением механизма. Данные служат основой для обсуждения методической ценности интеграции подходов в обучение.

Обсуждение. Проведенное исследование подтверждает, что совмещение традиционных и цифровых методов в обучении ТММ не только повышает точность расчетов, но и формирует у студентов системное понимание кинематики. Графоаналитические методы, несмотря на погрешности остаются незаменимыми для развития навыков ручных расчетов и интуиции. В свою очередь, САПР устраняет субъективные ошибки, автоматизирует трудоемкие вычисления и предоставляет инструменты для визуализации, которые делают абстрактные концепции «осязаемыми».

Ключевые рекомендации для преподавателей:

– использовать традиционные методы как базовый этап для объяснения теории;

- интегрировать САПР на этапе верификации результатов, что экономит время и повышает мотивацию;

- дополнять лабораторные работы заданиями по анализу погрешностей (например, как изменение числа положений в диаграммах аналогов скорости и ускорения влияет на точность).

Разработанный подход может быть расширен на более сложные задачи, такие как:

- кинематический анализ планетарных механизмов, где ручные методы становятся чрезмерно трудоемкими, а САПР позволяет моделировать движение сателлитов и водила в динамике, проводить корригирование зубчатых колес и моделировать процессы сложных передач, таких как волновые;

- синтез профиля кулачков с использованием численных методов оптимизации в САПР.

Такие задачи особенно ценны для студентов, так как демонстрируют практическую применимость теории в реальных инженерных проектах.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует, что интеграция традиционных методов и численного моделирования в САПР существенно повышает эффективность обучения студентов теории механизмов и машин. На примере четырехзвенного механизма показано, что подходы дают согласованные результаты, что подтверждает их корректность и взаимодополняемость. Традиционные методы формируют базовое понимание физики движения, а САПР автоматизирует расчеты, устраняя субъективные ошибки, и предоставляет инструменты для визуализации, которые делают обучение более наглядным:

- совмещение методов позволяет студентам верифицировать результаты ручных расчетов, развивая критическое мышление;

- визуализация движения механизма в САПР повышает вовлеченность и упрощает освоение сложных концепций (например, «мертвых точек»);

- рекомендации по интеграции САПР в лабораторные работы (проверка погрешностей, анимация) могут быть адаптированы для других разделов курса ТММ.

Список литературы

1. Хохлова О.А., Пономарева Е.В., Синельщиков А.В. Модификация численного метода для решения задач кинематического и динамического анализа механизмов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – №2(40). – С. 36-41. – DOI: 10.52684/2312-3702-2022-40-2-36-41.
2. Стекольников М.В., Милованова Л.Р., Челышева И.А. Моделирование механизмов как методический инструмент (на примере проектирования циклоидально-цевочной передачи). Мир транспорта. 2021. – С. 65-74. – DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-5.
3. Шумаков Ф.П., Смирнов П.Н., Смирнов Н.А. Кинематический анализ четырехзвенного механизма // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – №12. – С. 287-289.
4. Valigi M.C., Logozzo S., Malvezzi M. Education Tool for Kinematic Analysis: A Case Study // Robotics in Education: RiE 2021 12. – Springer International Publishing. 2022, pp. 105-116. DOI: 10.1007/978-3-030-82544-7_11.
5. Restrepo-López S., Perez-Restrepo A. F., Trujillo-Suarez C. A. Development and evaluation of computational applications for teaching kinematics in engineering // 2021 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE): proceedings. – Guatemala City, 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/EDUNINE51952.2021.9429139.

6. Cashman A., O'Mahony T. Student understanding of kinematics: a qualitative assessment // European Journal of Engineering Education. 2022, vol. 47, no. 6, pp. 886-909. DOI: 10.1080/03043797.2022.2073200.
7. Кашпунов В.В., Носальская Т.Э. Оценка точности графического метода кинематического анализа с использованием анимационного моделирования в CAD-системе «Компас» // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2024. – № 4 (84). – С. 91-102. – DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).91-102.
8. Беляев А.Н., Шередекин В.В., Василенко С.В. Оценка точности и достоверности результатов в курсовом проекте по теории механизмов и машин // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – Ч. 2. – С. 229-232.
9. Бабичев Д.Т., Лебедев С.Ю., Гусева К.П. Применение анимации при изучении и проектировании механизмов и передач // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2020. – №1 (37). – С. 126-132.
10. Сорокин А.Н., Попов С.Д., Клоков А.С. К вопросу о проведении вычислительных экспериментов при решении учебных задач кинематического анализа плоских рычажных механизмов в курсе теории механизмов и машин // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2018. – №1 (12). URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/1/00514.pdf>.
11. Shala A., Likaj R., Bajrami X., Qelaj M. Analysis of kinematics and kinetostatics of four-bar linkage mechanism based on given program // Machines. Technologies. Materials. 2017, vol. 11, no. 9, pp. 403-409. URL: <http://stumejournals.com/mtm/Archive/2017/9-2017.pdf>.
12. Yahya A., Van Oosterwyck N., Knaepkens F., Houwen S., Herregodts S., Herregodts J., Vanwalleghem B., Cuyt A., Derammelaere S. CAD-Based Design Optimization of Four-Bar Mechanisms: An Emergency Ventilator Case Study // Designs. 2023, vol. 7, no. 2, pp. 1-38. DOI: 10.3390/designs7020038.

Сведения об авторе:

Путеев Павел Александрович – старший преподаватель кафедры «Прикладная механика и инженерная графика».