ISSN 2223-0807 Современное машиностроение: Наука и образование 2025: материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621 + 531.8 doi:10.18720/SPBPU/2/id-99

Г.Н. Петров¹, А.Н. Евграфов²

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ В ПРОГРАММАХ EXCEL И МАТНСАD



¹Геннадий Николаевич Петров, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. Тел.: (812)297-4845, E-mail: <u>gnpet@mail.ru</u>.



²Александр Николаевич Евграфов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. Тел.: (812)297-4845, E-mail: alexevgrafov@mail.ru.

Аннотация

Для расчёта геометрии механизмов используются не только (и не всегда) специальные компьютерные программы, но и широко распространённые универсальные, такие, как *Excel* из офисного пакета от *Microsoft* или *MathCAD* фирмы *PTC*. Причём возможности визуализации результатов расчётов, имеющиеся в этих программах и весьма полезные с точки зрения удобства пользования, используются далеко не в полной мере. В предлагаемой статье рассматриваются способы создания анимации диаграмм (например, кинематических схем механизмов).

Ключевые слова: MathCAD, Excel, визуализация, кинематическая схема, механизм.

Введение

В условиях цифровизации инженерного образования возрастает потребность в эффективных методах визуализации расчетов, которые позволяют студентам технических специальностей глубже понимать сложные математические модели, физические процессы и алгоритмы численных методов. Традиционные подходы, основанные на ручных вычислениях и статических графиках, уступают место интерактивным компьютерным технологиям, обеспечивающим наглядность и динамическое представление данных [1-5].

Среди наиболее распространенных программных решений выделяются Microsoft Excel и Mathcad от РТС, которые, несмотря на различия в подходах, широко применяются в различных областях — от экономики до машиностроения [6, 7].

Excel, благодаря своей универсальности и доступности, остается стандартом для обработки табличных данных и построения базовых графиков [8]. Однако его возможности ограничены при работе с аналитическими вычислениями и динамической визуализацией [9]. В то же время Mathcad предлагает интерактивную среду для символьной математики [10], инженерных расчетов [11] и наглядного представления зависимостей [12], что делает его предпочтительным инструментом в технических дисциплинах [13-15].

Известны аналитические методы геометрического и кинематического анализа плоских рычажных [например, 16, 17] и пространственных [18, 19] механизмов. В работах [20-23] рассмотрены аналитические методы силового расчета механизмов с учетом сил трения, в том числе самотормозящих, а в работах [24-26] – методы расчета динамики управляемых машин. При выполнении подобных расчетов удобно сразу видеть их результаты, например, анимацию кинематической схемы механизма, попадание механизма в особое положение, траекторию характерных точек механизма, изменение сил. действующих В кинематических парах, и т.д.

В данной статье рассматриваются методы визуализации расчетов в Excel и Mathcad, проводится анализ их возможностей и удобства применения при обучении студентов технических специальностей. Особое внимание уделяется динамической визуализации, включая анимацию параметров, что актуально для задач оптимизации и численного моделирования.

Постановка задачи

Целью данного исследования является анализ и разработка методов визуализации расчетов в универсальных программных пакетах Excel и MathCAD, применяемых для моделирования и анализа механических систем. Основные задачи исследования включают:

Исследование возможностей визуализации в Excel и MathCAD, включая создание анимации кинематических схем и других динамических представлений данных. Применение методов визуализации для анализа конкретных механических систем

Сравнение эффективности использования Excel и MathCAD для задач визуализации в инженерном образовании и научных исследованиях.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью в цифровизации инженерного образования и необходимостью наглядного представления сложных математических моделей и физических процессов.

Визуализация в MS Excel

В работе [6] приведен код макроса, который позволяет анимировать схемы и графики, построенные в программе MS Excel. Однако в последних версиях Excel анимация не происходит, поскольку программа не успевает прорисовать схему на каждом шаге расчета. Для исправления этого дефекта предлагаем немного изменить код макроса, добавив в него перед выполнением расчета на очередном шаге команду DoEvents.

DoEvents – функция, которая позволяет системе операционной среды выполнить ожидающие операции во время выполнения макроса [27]. При вызове DoEvents выполнение макроса прерывается и выполняются все ожидающие операции, в нашем случае это прорисовка схемы (например, кинематической схемы механизма), потом макрос возобновляет свою работу.

Тогда код, приведенный в [6], будет выглядеть следующим образом:

```
Sub Cycle()
Dim i As Integer
Dim Stp As Integer
Stp = Worksheets("Лист1").Cells(3, 2)
Calculate
For i = 0 To 360 / Stp - 1
DoEvents
Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) = Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) + Stp
Calculate
Next
End Sub
```

Рис. 1. Maкpoc «Cycle»

Этот макрос изменяет один независимый параметр, от которого зависят все остальные параметры. Например, это может быть обобщённая координата, определяющая положение входного (ведущего) звена. Изменив эту координату, мы увидим, как изменилось положение входного звена и всех остальных звеньев. Если организовать цикл, т.е. изменение этой координаты от начального положения до конечного, то мы получим

визуализацию движения механизма из начального положения в конечное. Для организации цикла в [6] использована конструкция *For...Next*. Независимый параметр (например, q) содержится в ячейке, находящейся на второй строке второго столбца (т.е. в ячейке *B*2) листа с именем «Лист1». Шаг изменения независимого параметра назван переменной Stp. Её численное значение берётся из ячейки *B3*, т.е. третьей строки второго столбца. При выполнении макроса независимый параметр, содержащийся в ячейке *B2* листа с именем «Лист1», изменится на значение переменной Stp. При выполнении функции DoEvents прорисуется изображение ведущего звена, который переместился на величину шага, вызывая перемещение всех остальных подвижных звеньев.

На рис. 2 представлена нарисованная в Excel схема механизма Teo Янсена [28] при пяти разных значениях входной обобщённой координаты. Сам механизм (или «кинетическая скульптура», как его называет автор) является одноподвижным: к входному звену присоединено восемь структурных групп Ассура типа BBB. Группы построены так, что их внешний облик напоминает лошадь. При изменении положения входного звена все остальные звенья (структурные группы) приходят в движение, создавая иллюзию скачущей лошади.



Рис. 2. Схема механизма Тео Янсена при пяти значениях входной координаты

Положение каждого звена и каждой характерной точки этого механизма описывается системой тригонометрических уравнений, результат решения которых можно наглядно наблюдать с помощью диаграммы Excel. Меняя входные параметры (размеры звеньев), можно добиться наибольшей выразительности получившейся фигуры. Используя 58

макрос конструкции «Cycle» (см. рис. 1), можно до проведения эксперимента увидеть механизма в движении.

В механизме Тео Янсена все многочисленные звенья приводятся в движение от одного движущего звена. В современном машиностроении наметилась тенденция использования более простых по структуре механизмов, добиваясь получения нужного движения рабочего звена за счет увеличения числа приводов [29]. На рис. 3 показана нарисованная в Excel схема автовышки с тремя гидроприводами. Положение звеньев такого механизма определяется заданием не одной, а трёх обобщённых координат, которые обозначены q_1 , q_2 и q_3 . Эти координаты задают перемещение поршней внутри цилиндров. Для пошагового изменения этих координат достаточно использовать макрос конструкции Step (рис. 4). В этом макросе переменная Stp обозначает шаг изменения обобщённой координаты, значение шага задаётся в ячейке B3. Значение обобщённой координаты, находящейся на второй строке второго столбца (т.е. ячейки B2) листа с именем «Лист1» увеличивается на величину шага Stp.



Рис. 3. Схема механизма автовышки с тремя приводами

Увеличивая или уменьшая значение обобщённых координат q_1 , q_2 или q_3 , можно наблюдать за изменением конфигурации механизма. При этом

очень быстро приходится убедиться в том, что произвольное изменение обобщённых координат приводит к потере устойчивости всей конструкции.

Sub Step() Stp = Worksheets("Лист1").Cells(3, 2) Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) = Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) + Stp End Sub

Рис. 4. Макрос «Step»

Впечатляющую наглядность с помощью диаграмм Excel можно придать способам получения тех кривых, по которым описываются профили зубьев зубчатых колёс: эвольвент, гипоциклоид, эпициклоид и др. Циклоида – самая популярная кривая XVII века. В 1674 г. Ф. Лагир предложил выполнять профиль зубьев зубчатых колес по циклоиде: головка зуба описывается эпициклоидой, а ножка – гипоциклоидой. Визуализировать получение этих кривых можно, если придать анимацию вспомогательным окружностям, которые перекатываются снаружи и внутри основной окружности. На рисунке 5, *а* соотношение радиусов основной *R* и вспомогательной *r* окружности равно 3; гипоциклоида представляет собой треугольник с дугообразными сторонами. Если соотношение *R*/*r* дробное, то появляются изумительные узоры (рис. 5, δ).

При соотношении радиусов R/r = 2 гипоциклоида обращается в отрезок прямой, длина которой равна диаметру основной окружности (рис. 5, e). Каждая точка вспомогательной окружности, которая перекатывается внутри основной окружности, движется по диаметру основной окружности. Получилась анимированная схема планетарной передачи, в которой диаметр начальной окружности сателлита (планетного колеса) в два раза меньше диаметра начальной окружности внешнего колеса. Такой механизм использовал Дж. Уатт для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное.

Если соотношение R/r немногим больше единицы, например, R/r = 1,1, то получаем анимированную схему, иллюстрирующую работу циклоидного редуктора (рис. 5, г). У внутреннего колеса (сателлита) диаметр и число зубьев немногим меньше, чем у внешнего колеса. В анимированной схеме видно, что центр внутреннего колеса движется по дуге окружности, причём направление его вращения противоположно направлению вращения сателлита, а скорость вращения в 10 раз больше. образом, анимированная схема наглядно показывает. Таким что циклоидный редуктор с неподвижным внешним колесом, обладающий небольшими габаритами, воспроизводит большое отрицательное передаточное отношение.



Рис. 5. Эпициклоиды и гипоциклоиды: *a*) *R*/*r* = 3; *б*) *R*/*r* = 3,6; *в*) *R*/*r* = 2; *г*) *R*/*r* = 1,1

Визуализация в программе MathCAD

Рассмотрим создание анимации замкнутого шестизвенного механизма (рис. 6) с помощью пакета *MathCAD*.

Механизм имеет пять подвижных звеньев и состоит из трех структурных групп (кривошипа *ОА* и двух групп Ассура). На первой странице протокола введем все необходимые размеры:

длина кривошипа (ОА)	<i>L</i> 0:=0.1
- вторая структурная группа (первая группа Ассура)	
длины звеньев (AB,O_2B) I	L1:=0.25, L2:=0.275
координаты присоединения к стойке (x_{O2}, y_{O2}) X	<i>XF</i> 1:=0.24, <i>YF</i> 1:=0.3
сборка, звено присоединения	<i>M</i> 1:=-1, <i>NP</i> :=2
локальные координаты точки присоединения	
следующей структурной группы ($X_C{}^{ m \Lambda}, Y_C{}^{ m \Lambda)}$	<i>X</i> 1:=0.14, <i>Y</i> 1:=0.1
- третья структурная группа (вторая группа Ассура)	
длина звена (<i>CD</i>)	L3:=0.375
координаты присоединения к стойке (y_D^*, ϕ^*)	QF2:=0.1, FF2:=15
сборка	M2:=1.



Рис. 6. Кинематическая схема шестизвенного механизма

Эти исходные данные однозначно определяют положение механизма для любой входной координаты q (угол поворота кривошипа OA). Зададим число точек n:=60, для которых будем проводить геометрический расчет. Введем массивы k:=0 ... n-1 и $q_k:=2\pi k/n$ (массив углов поворота кривошипа). Определим координаты всех точек:

$$XYO_k \coloneqq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
 – столбец координат точки O ,
 $XYA_k \coloneqq \begin{pmatrix} L1 \cdot \cos(q_k) \\ L1 \cdot \sin(q_k) \end{pmatrix}$ – столбец координат точки A ,
 $XYO2_k \coloneqq \begin{pmatrix} XF1 \\ YF1 \end{pmatrix}$ – столбец координат точки O_2 .

По известному алгоритму [16] можно найти аналогичные массивы для точек B, C, D (*XYb_k*, *XYcb_k*, *XYd_k*). Сведём все полученные координаты в два массива:

 $x_{nk,k}, y_{nk,k}$ – массивы координат всех точек в проекциях на оси X и Y, где $n_k := 0 \dots 5$ – массив точек, $k := 0 \dots n-1$ – массив положений кривошипа. Получаем: $\binom{x_{0,k}}{y_{0,k}} := XYO_k, \binom{x_{1,k}}{y_{1,k}} := XYa_k, \binom{x_{2,k}}{y_{2,k}} := XYO2_k, \binom{x_{3,k}}{y_{3,k}} := XYc_k, \binom{x_{4,k}}{y_{4,k}} := XYd_k, \binom{x_{5,k}}{y_{5,k}} := XYb_k$.

Определим массивы косинусов ($Cf_{mk,k}$) и синусов ($Sf_{mk,k}$) углов, связывающих локальные и неподвижные системы координат($mk:=0 \dots 4 -$ массив звеньев). Для кривошипа (нулевое звено) можно записать:

$$Cf_{0,k} \coloneqq \cos(q_k), Sf_{0,k} \coloneqq \sin(q_k),$$

для ползуна (четвертое звено) – $Cf_{4,k} := \cos(\frac{FF2 \cdot \pi}{180}), Sf_{4,k} := \sin(\frac{FF2 \cdot \pi}{180}).$

Рисование кинематической схемы в *MathCAD*'е происходит аналогично тому, как описано для среды *Excel*. Для каждого из 60 положений k можно построить с помощью диаграммы кинематическую схему механизма, определив предварительно характерные точки (точки опор и ползуна).

Чтобы создать анимацию, воспользуемся переменной *FRAME* (по умолчанию *FRAME*=0). Нарисуем кинематическую схему для угла кривошипа *q*_{FRAME}=0 (рис. 7).



Рис. 7. Кинематическая схема механизма для угла qFRAME=0

Чтобы заставить схему двигаться, необходимо менять переменную *FRAME*. Для этого на вкладке Инструменты выбираем Анимация > Запись (рис. 8).

·	Инструменты	Символы	Окно Справка	
	🍄 Правописание		100% 🔽 👩	1
	<u>А</u> нимация 🕨		▶ <mark>Юй <u>З</u>апись</mark>	
	Защита таблицы		Проиграть	

Рис. 8. Создание анимации

Появится окно Запись анимации (рис. 9).

Запись анима	ции		×		
Для кадра—			Анимация		
OT:	0				
До:	59		Отмена		
Скорость:	10		Сохр. как		
Кадров/Сек			Установки		
Кадр=					
Сделайте пометку области документа, содержимое которой основывается на переменной кадра, введите начальную и конечную величины для кадра, и выберите Анимация.					

Рис. 9. Запись анимации

Выделяем область протокола, на которой расположена диаграмма (см. рис. 7), для переменной *FRAME* в окне Запись анимации (рис. 9) задаем диапазон изменения ОТ: 0 До: 59 Скорость: 10 Кадров/Сек. Таким образом, меняя переменную *FRAME*, мы будем видеть изменение положения механизма с заданной скоростью смены кадров в секунду. Полученный файл (*.*avi*) можно сохранить и в дальнейшем воспроизвести с помощью любого проигрывателя независимо от протокола *MathCAD*.

Обсуждение

Excel показал себя как универсальный инструмент для базовой визуализации, особенно удобный для работы с табличными данными и простыми графиками. Однако его возможности ограничены при работе с аналитическими вычислениями.

MathCAD предоставляет более широкие возможности для символьной математики и динамической визуализации, что делает его предпочтительным для сложных инженерных расчетов.

MathCAD предоставляет более мощные инструменты для динамической визуализации, включая запись анимации, что особенно полезно для образовательных целей.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что даже универсальные программные пакеты, такие как Excel и MathCAD, могут быть эффективно использованы для визуализации инженерных расчетов. Это открывает новые возможности для преподавания технических дисциплин.

Исследование демонстрирует, что сочетание доступности и функциональности Excel и MathCAD делает их ценными инструментами для преподавателей, способствуя более глубокому пониманию механических систем и процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Иванов, Г.С. Компьютерная графика в инженерном анализе. М.: Машиностроение, 2021.
- [2] Mayer, R. E. Multimedia Learning. Cambridge University Press, 2020.
- [3] Мкртычев О.В. Компьютерные технологии в преподавании ТММ цель или средство? Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. сс. 96-102.
- [4] Коловский М.З., Евграфов А.Н. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1 (1). сс. 3-29.
- [5] Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «ModelVision» // Теория механизмов и машин. - 2004. - № 1. -Том 2. - сс. 75-79.
- [6] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и Mathcad. Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 1 (11). сс. 71-80.
- [7] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2017. pp. 45-56.
- [8] Walkenbach, J. Excel 2019 Bible. Wiley, 2018.
- [9] Евграфов А.Н. Программа расчета динамики однодвигательной машины. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1 (1). сс. 83-91.
- [10] Чигарев, А.В. Визуализация в математике с Mathcad. СПб: БХВ, 2019.
- [11] Brent, R. Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations. Elsevier, 2006.
- [12] Chen, K., & Zhang, Y. Data Visualization and Graphical Reporting in Scientific Computing. Springer, 2021.
- [13] Мацюк И.Н., Третьяков В.М., Шляхов Э.М. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов высоких классов в программе Mathcad. Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1 (19). сс. 65-70.

- [14] Sorby, S. Visualization in Engineering Education. IJEE, 2019.
- [15] Norton, R.L. Design of Machinery. McGraw-Hill, 2020.
- [16] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2 (2). сс. 50-63.
- [17] Андриенко П.А., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Хисамов А.В. Математическое определение конфигурации плоских рычажных механизмов со внутренним входом при геометрическом анализе. Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. № 13. сс. 81-93.
- [18] Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 2 (123). сс. 170-176.
- [19] Евграфов А.Н., Петров Г.Н., Терешин В.А. Использование дополнительных входов рычажных механизмов при приближении к особым положениям. Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. сс. 82-90.
- [20] Egorova O.V., Samoilova M.V., Timofeev G.A., Evgrafov A.N. Force loading analysis of a cylindrical self-braking inverse gearing. International Review of Mechanical Engineering. 2020. T. 14. № 2. cc. 73-78.
- [21] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. cc. 75-82.
- [22] Semenov Yu., Semenova N., Egorova O. Dynamic Mesh Forces in Accounting of the Time Variable Mesh Stiffness of a Gear Train. International Review of Mechanical Engineering, 2018, Vol. 12, №9, pp. 736-741.
- [23] Semenov Yu. A., Semenova N. S. Study of Mechanisms with Allowance for Friction Forces in Kinematic Pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. pp. 169-180.
- [24] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of multidirectional mechanism with excess inputs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016, Pp. 31-37.
- [25] Коловский М.З., Петров Г.Н., Слоущ А.В. Об управлении движением замкнутых рычажных механизмов с несколькими степенями свободы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000, № 4.
- [26] Евграфов А.Н., Петров Г.Н., К вопросу о динамике машин с программным управлением//Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. № 12. сс. 65-80.

- [27] Комолова, Н. В. Программирование на VBA в Excel 2019. / Н.В. Комолова, А В. Клименко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. - 496 с.: ил. ISBN 978-5-9775-6593-6
- [28] Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism / Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. // Mechanisms and Machine Science. 2022. T. 108 MMS. pp. 141-149.
- [29] Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана Высшая школа, 2000. 552 с.
- [30] Степанов А.В., Степанов И.Ю. О Компьютерном воспроизведении сателлитных кривых планетарных зубчатых механизмов. Современные проблемы теории машин. 2015. № 3. Сс. 83-86.
- [31] Сенчурин Л.П., Черенкова С.В., Иванова М.А. Компьютерная анимация схемы цевочно-циклоидального дифференциала. Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 8. Сс. 274-288.

G.N. Petrov, А.N. Евграфов

VISUALIZATION CALCULATIONS IN EXCEL AND MATHCAD PROGRAMS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Not only (and not always) special computer programs are used to calculate the geometry of mechanisms, but also widespread universal programs, such as Excel from the Microsoft office suite or MathCAD from PTC. Moreover, the possibilities of visualization of calculation results, available in these programs and very useful from the point of view of usability, are not fully used. In the proposed article, the methods of creating animation of diagrams (for example, kinematic diagrams of mechanisms) are considered.

Keywords: MathCAD, Excel, visualization, kinematic diagram, mechanism.

REFERENCES

[1] Ivanov, G.S. Computer graphics in engineering analysis. Moscow: Mashinostroenie, 2021. (in rus.)

- [2] Mayer, R. E. Multimedia Learning. Cambridge University Press, 2020. (in rus.)
- [3] Mkrtychev O.V. Computer technologies in teaching TMM a goal or a means? Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. 2012. No. 2. pp. 96-102. (in rus.)
- [4] Kolovskiy M.Z., Evgrafov A.N. About some directions of modernization of TMM course. Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 1 (1). pp. 3-29. (in rus.)
- [5] Petrov G.N. Computer modeling of mechanical systems in the environment "ModelVision" // Theory of mechanisms and machines.
 2004. № 1. Vol. 2. pp. 75-79. (in rus.)
- [6] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer animation of kinematic schemes in Excel and Mathcad programs. Theory of mechanisms and machines. 2008. T. 6. No. 1 (11). pp. 71-80. (in rus.)
- [7] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2017. pp. 45-56.
- [8] Walkenbach, J. Excel 2019 Bible. Wiley, 2018.
- [9] Evgrafov A.N. Program of calculation of dynamics of a single-motor machine. Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 1 (1). pp. 83-91. (in rus.)
- [10] Chigarev, A.V. Visualization in mathematics with Mathcad. SPb: BHV, 2019. (in rus.)
- [11] Brent, R. Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations. Elsevier, 2006.
- [12] Chen, K., & Zhang, Y. Data Visualization and Graphical Reporting in Scientific Computing. Springer, 2021.
- [13] Matsyuk I.N., Tretiakov V.M., Shlyakhov E.M. Kinematic analysis of plane lever mechanisms of high classes in Mathcad program. Theory of mechanisms and machines. 2012. T. 10. No. 1 (19). pp. 65-70. (in rus.)
- [14] Sorby, S. Visualization in Engineering Education. IJEE, 2019.
- [15] Norton, R.L. Design of Machinery. McGraw-Hill, 2020.
- [16] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometrical and kinetostatic analysis of the flat lever mechanisms of the second class. // Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 2 (2). pp. 50-63. (in rus.)
- [17] Andrienko, P.A.; Evgrafov, A.N.; Kozlikin, D.P.; Khisamov, A.V. Mathematical definition of the configuration of the flat lever mechanisms with an internal input at the geometrical analysis. Modern Engineering. Science and Education. 2024. No. 13. pp. 81-93. (in rus.)

- [18] Khrostitskiy A.A., Evgrafov A.N., Teryoshin V.A. Geometry and kinematics of a spatial hexagon with redundant links. Scientific and Technical Vedomosti of St. Petersburg State Polytechnic University. 2011. No. 2 (123). pp. 170-176. (in rus.)
- [19] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Tereshin V.A. Utilization of additional inputs of lever mechanisms at approach to special positions. Sovremennoe mashinostroenie. Science and education. 2022. No. 11. pp. 82-90. (in rus.)
- [20] Egorova O.V., Samoilova M.V., Timofeev G.A., Evgrafov A.N. Force loading analysis of a cylindrical self-braking inverse gearing. International Review of Mechanical Engineering. 2020. T. 14. № 2. pp. 73-78.
- [21] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. pp. 75-82.
- [22] Semenov Yu., Semenova N., Egorova O. Dynamic Mesh Forces in Accounting of the Time Variable Mesh Stiffness of a Gear Train. International Review of Mechanical Engineering, 2018, Vol. 12, №9, pp. 736-741.
- [23] Semenov Yu. A., Semenova N. S. Study of Mechanisms with Allowance for Friction Forces in Kinematic Pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. pp. 169-180.
- [24] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of multidirectional mechanism with excess inputs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016, Pp. 31-37.
- [25] Kolovskiy M.Z., Petrov G.N., Sloush A.V. About motion control of closed lever mechanisms with several degrees of freedom // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2000, № 4. (in rus.)
- [26] Evgrafov A.N., Petrov G.N., To a question about the dynamics of the machines with the program control//Sovremennoe mashinostroenie. Science and education. 2023. No. 12. pp. 65-80. (in rus.)
- [27] Komolova, N. V. Programming in VBA in Excel 2019. / N.V. Komolova, A.V. Klimenko. SPb.: BHV-Peterburg, 2020. 496 p.: ill. ISBN 978-5-9775-6593-6 (in rus.)
- [28] Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism / Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. // Mechanisms and Machine Science. 2022. T. 108 MMS. pp. 141-149.

- [29] Aleksandrov M.P. Load-lifting machines: Textbook for universities. M.: Izd-vo MSTU named after N.E. Bauman Higher School, 2000. 552 p. (in rus.)
- [30] Stepanov A.V., Stepanov I.Yu. On Computer Reproduction of Satellite Curves of Planetary Gear Mechanisms. Modern problems of the theory of machines. 2015. № 3. Pp. 83-86. (in rus.)
- [31] Senchurin L.P., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Computer animation of the scheme of the chain-cycloidal differential. Modern Engineering. Science and Education. 2019. № 8. Pp. 274-288. (in rus.)