

УДК 621.865, 004.942

Сравнение результатов анализа динамических систем на макроуровне с помощью отечественных и зарубежных комплексов САПР

**Трудоношин В. А.^{1,*}, Мартынюк В. А.¹,
Федорук В. Г.¹**

^{*}trudonoshin@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье приводится сравнение результатов моделирования динамических процессов в трехмерных механических системах, полученных с помощью приложения “Симуляция кинематических механизмов” системы NX и отечественных комплексов ПА8 и ПА9. Сравнение выполнено как для простейших механизмов, поведение которых описывается аналитическим решением, так и для более сложных. По результатам можно сделать вывод о конкурентоспособности ПА8 и ПА9 (и даже об их преимуществах) и, при наличии отечественных графических редакторов, программного интерфейса к ним и желания разработчиков кооперироваться, можно вести речь о создании качественных отечественных САПР.

Ключевые слова: САПР, математическая модель, динамика, кинематика, 3D-механика

Введение

Слово “импортозамещение”, ставшее довольно популярным в настоящее время, можно интерпретировать по-разному. Применительно к зарубежным программным комплексам САПР (Solid Works[1], Solid Edge[2], Inventor[3], CATIA[4], Pro-E[5], NX[6,7]), которые уже давно и довольно успешно применяются большим числом отечественных проектирующих и производственных организаций, это слово следует употреблять с большой осторожностью. Во-первых, никто не захочет менять дорогостоящий и давно освоенный инструмент проектирования в уже существующих проектах, во-вторых, пока достаточно сложно что-либо противопоставить выше перечисленным продуктам.

Нужны огромные инвестиции, которые обеспечили бы не только генерацию современных идей, но и реализацию этих идей в конкурирующий коммерческий программный продукт (разработка новых приложений, постоянное обновление версий, их тестирование, написание инструкций и описаний, завоевание рынков и пр.). Если вспомнить, сколько программных комплексов САПР “было на слуху” ещё 20 лет назад и сколько их осталось сегодня, то становится понятно – произошел естественный отбор самых жизнеспособных комплексов. Жизнеспособность в первую очередь обеспечили средства, вкладываемые в их развитие, которых в России на подобные программные продукты выделяется недостаточно.

Поэтому пока мы не можем полноценно конкурировать с богатой инфраструктурой зарубежных комплексов САПР, и в первую очередь с их графическими редакторами. Но мы можем использовать эти графические редакторы, и при этом применять свои “решатели” для выполнения проектных работ. Термин “решатели” довольно условный. Имеется в виду, что мы можем использовать собственные модели компонентов анализируемых систем, а иногда и собственные методы решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений. То есть, мы можем писать свои приложения к существующим зарубежным системам. Тем более, что все выше перечисленные современные программные комплексы предлагают для этого соответствующие инструментарии.

Дело это довольно трудное, поскольку, как уже говорилось, необходимо пользоваться существующими инструментальными средствами конкретных зарубежных систем САПР. При этом приходится разбираться с классами объектно-ориентированных языков программирования конкретного программного комплекса. К сожалению, описания библиотек таких классов, как правило, довольно скудны, и поэтому написание своих приложений для чужих систем всегда осуществляется непросто. Но именно такое дополнение чужих систем собственными инструментами и представляется наиболее перспективным в настоящее время.

Естественно, на первом этапе необходимо хотя бы приблизительно сравнить возможности наших и зарубежных “решателей”, возможности анализа отечественных и зарубежных систем САПР. Именно этой задаче и посвящена данная статья. В качестве объекта сравнения выбран кинематический и динамический анализ механических систем на макроуровне. Сравниваются результаты такого анализа различных механизмов, выполненные на отечественных системах ПА8 и ПА9[8], а также с помощью приложения “Симуляция кинематических механизмов” системы NX (в дальнейшем просто NX).

Для анализа систем в ПА9 есть возможность в схемном редакторе представить структуру механического объекта, в виде представленном на рис.1.

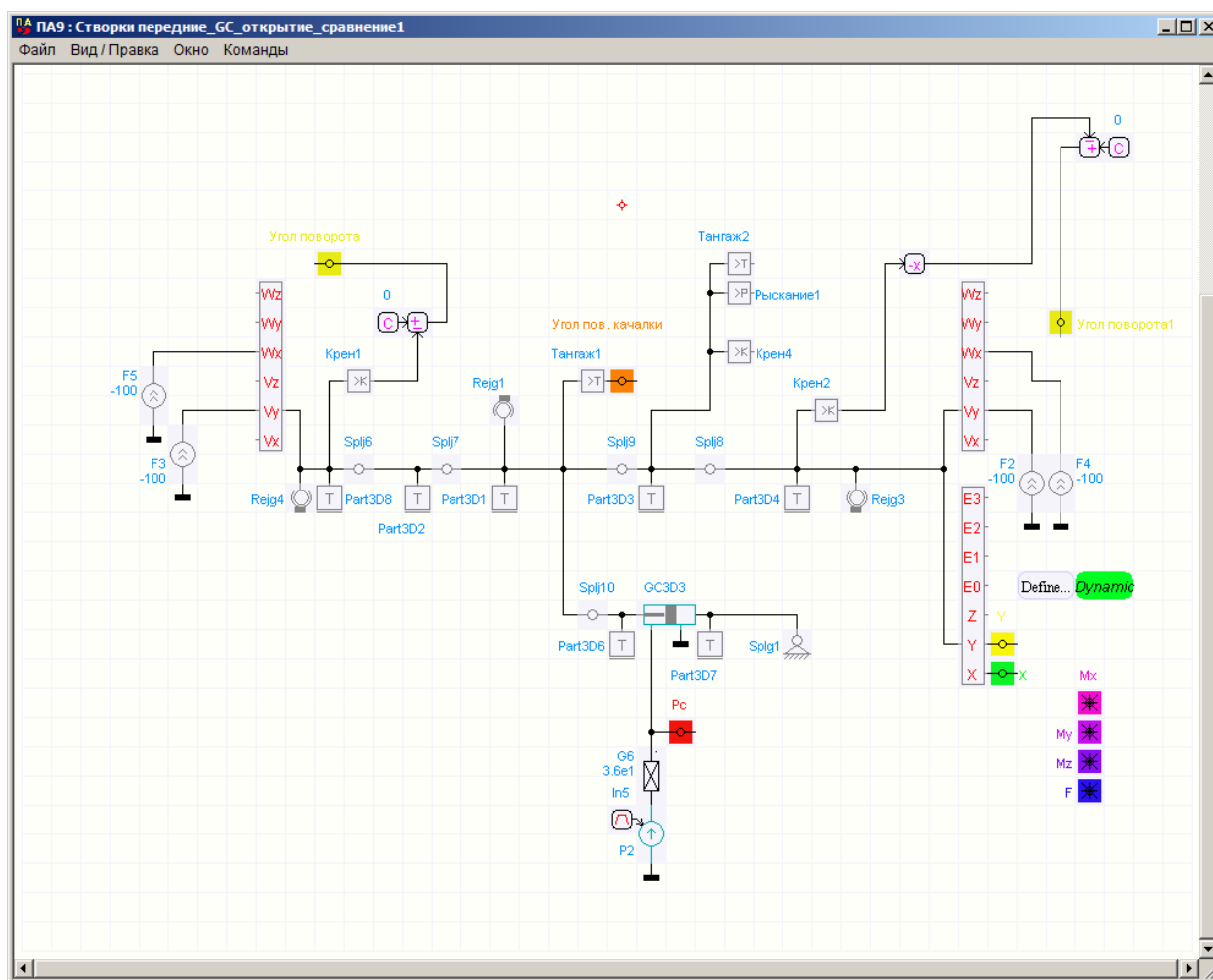


Рис.1 Структурная схема объекта (см.рис.17)

Заметим, что аналогично описываются анализируемые системы и в подобных зарубежных системах, например, в системе AMESim фирмы LMS (Siemens)[9]. Нужно отметить, что отечественные системы ПА8 и ПА9 позволяют анализировать на макроуровне системы различной физической природы (электрические и электронные системы, поступательная и вращательная механика, гидродинамика, термодинамика). В частности, есть возможность моделирования механических систем совместно с приводами (гидравлическими, электрическими и т.п.). Так на рис.1 элемент GC3D3 - гидроцилиндр.

Приложения “Симуляция кинематических механизмов” системы NX позволяет анализировать только механические системы. Но зато с помощью графического редактора NX можно описывать такие системы в том виде, к которому привыкли инженеры–механики (рис.2).

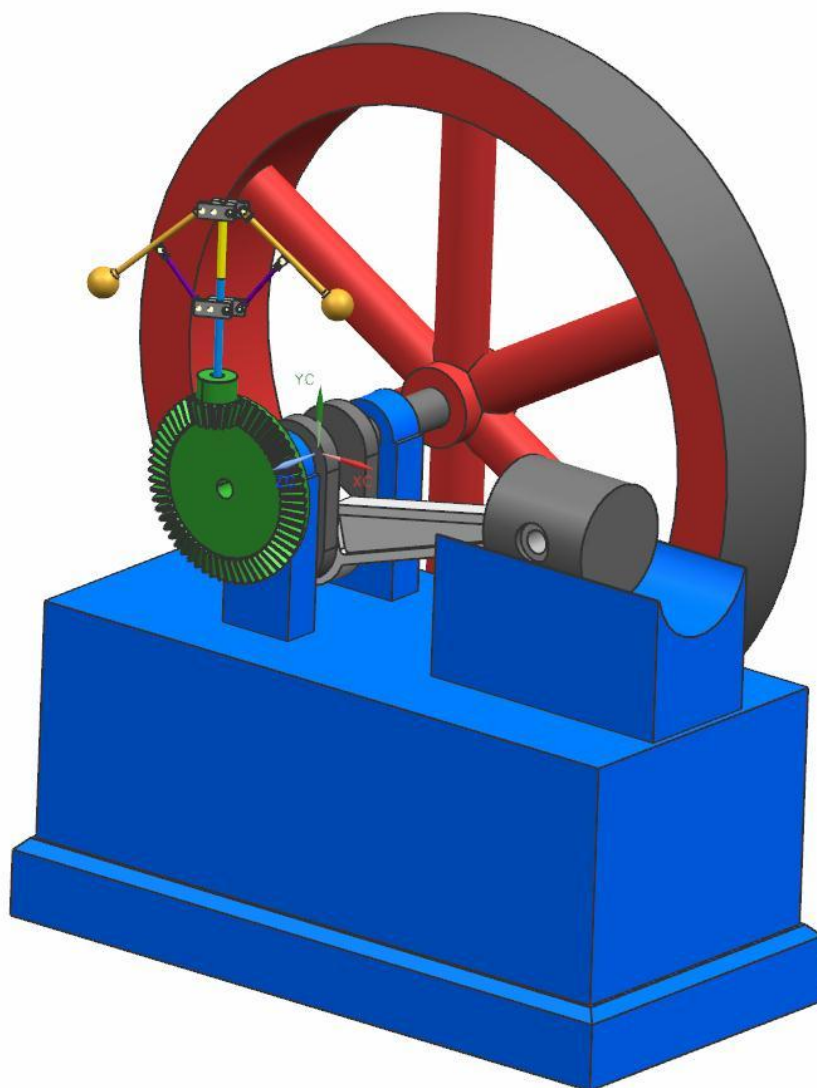


Рис.2 Представление механизма в NX

Описание механической системы в виде, представленном на рис.1 или на рис.2, затем превращается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Порядок этой системы, естественно, зависит от сложности анализируемого механизма. “Жесткость” этой системы уравнений, грубо говоря, зависит от соотношения масс отдельных деталей анализируемого механизма. Решение полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений осуществляется известными численными методами. Мы можем влиять на решение системы, задавая величину начального шага численного интегрирования, точность решения, величину максимального шага численного интегрирования, максимальное число итераций и пр.

Но если о способе составления систем дифференциальных уравнений и численных методах их решения в отечественных системах мы знаем всё (узловой метод формирования математических моделей, неявный метод Эйлера, метод трапеций для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений), то о подобных вещах в

системе NX мы можем только догадываться. И, тем не менее, мы можем сравнить точность результатов анализа тестовых механизмов, и на этом основании судить о конкурентной способности указанных отечественных систем.

1. Анализ математического маятника

В этом примере при малых углах отклонения (не более 5 -7 градусов) можно точно определить период колебания математического маятника T , равный

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (1)$$

l - расстояние от оси вращения до центра тяжести тела, g –ускорение свободного падения.

На рис.3 представлена 3D-модель математического маятника, анализ которого выполнен в системе NX. Расстояние от точки крепления до центра масс тела (длина нити) принимается равным 100 мм. Шарику задается небольшой угол первоначального отклонения от вертикали равный 2.5 градуса.

График, рассчитанного с помощью комплекса NX, перемещения центра тяжести шарика по оси Y представлен на рис.4. Естественно - это гармонические колебания.

Период колебаний указанного маятника, рассчитанный по формуле (1), составляет 0,6345 с. Период колебаний, измеренный на графике рис.4 составляет 0,635 с. Совпадение вполне приемлемое.



Рис.3 Математический маятник

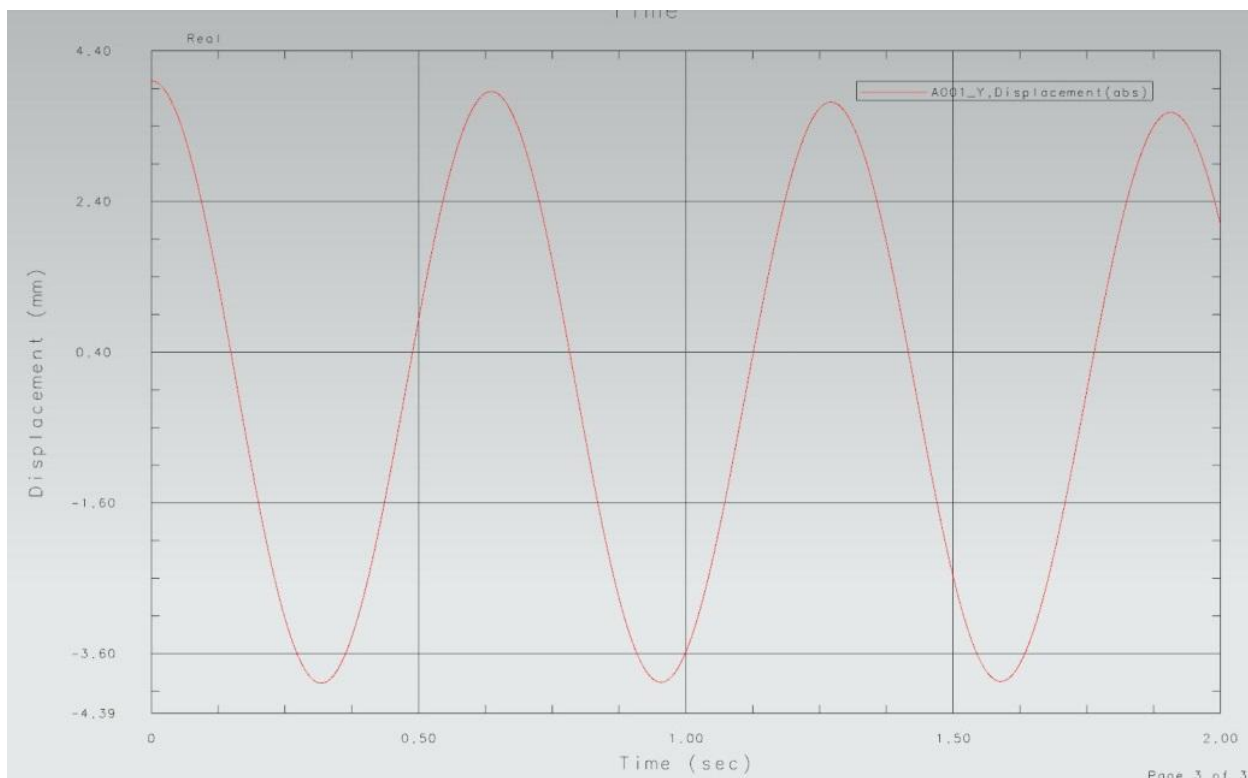


Рис.4 График рассчитанного с помощью комплекса NX перемещения центра тяжести

Такие же результаты расчетов, полученные с помощью комплекса ПА9 представлены на рис.5,6. Можно заметить, что амплитуда колебаний на рис.6 слегка падает, хотя никакого затухания в системе нет. Это обусловлено использованием неявного метода Эйлера (первого порядка) для численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. На рис.5 – результат получен неявно-явным методом интегрирования 2-го порядка[10], здесь затухания нет.

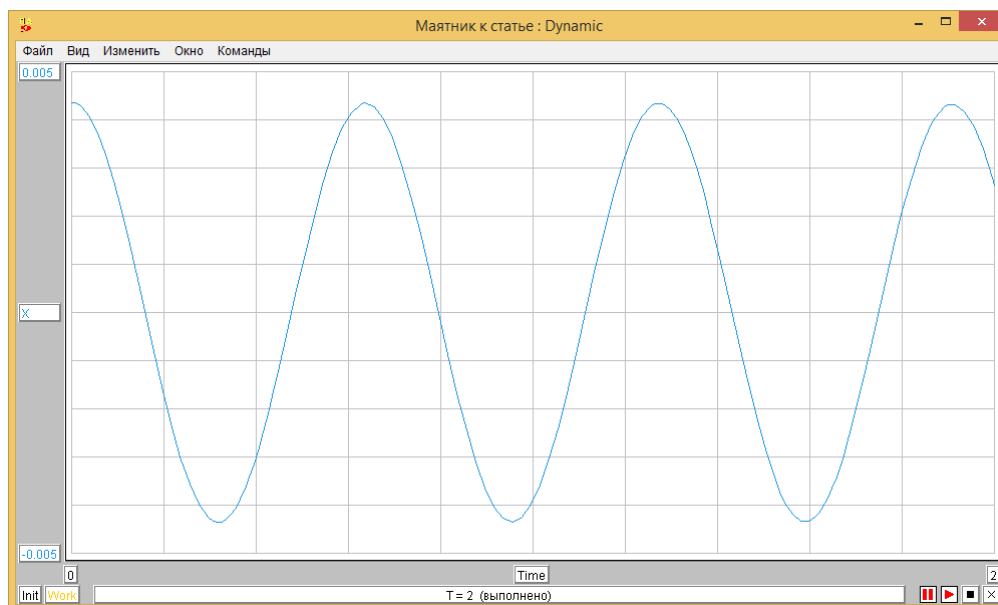


Рис.5 График, полученный неявно-явным методом: комплекс ПА9

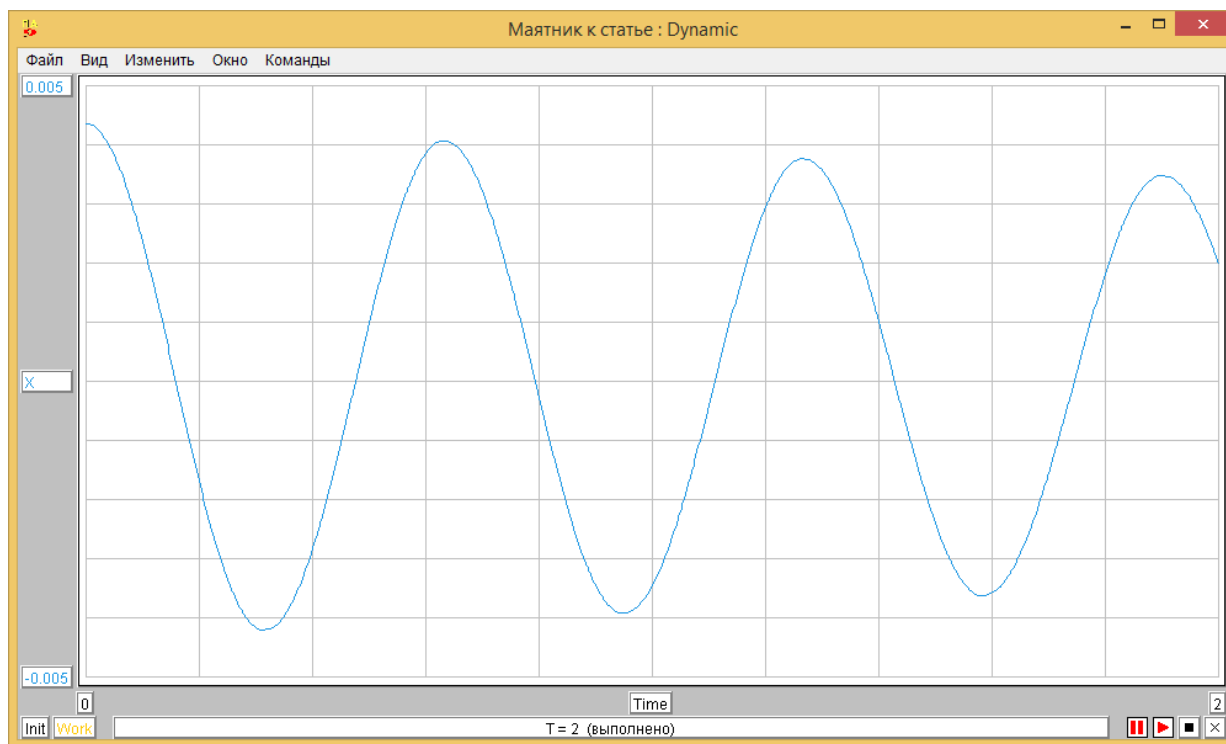


Рис.6 График, полученный методом Эйлера: комплекс ПА9

Период колебаний составляет 0,6345с, то есть практически совпадает с аналитическим решением.

2. Анализ физического маятника

Как известно, период колебаний физического маятника вычисляется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}}, \quad (2)$$

I - это момент инерции тела относительно оси вращения (осевой момент инерции); M - масса тела; l - расстояние от оси вращения до центра тяжести тела, g – ускорение свободного падения.

Пример такого маятника, проанализированный в системе NX, представлен на рис.7. (На рис.8 крупнее изображено направление осей системы координат.) Использованы следующие параметры маятника:

- расстояние от центра тяжести до оси вращения – 195,4 мм;
- масса тела – 188,18 кг;
- центральный момент инерции относительно оси перпендикулярной плоскости рисунка– 1918039 кг · мм²;
- угол первоначального отклонения центра тяжести тела относительно вертикали - 7 градусов.

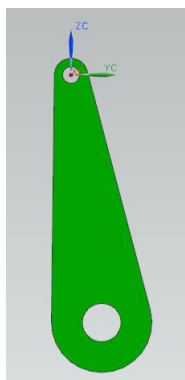


Рис.7 Физический маятник

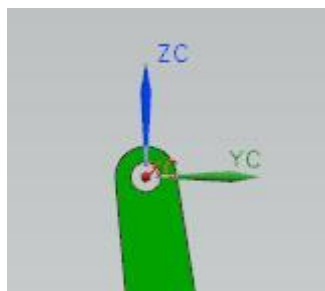


Рис.8 Направление осей системы координат

Период колебаний такого маятника, рассчитанный по формуле (2) составляет 0,998318 с. Период колебаний, полученный с помощью комплекса NX, составляет 1 с. Совпадение вполне приемлемое.

В физическом маятнике рассчитывается и так называемое *приведенное расстояние* $L_{пр}$:

$$L_{пр} = \frac{I}{Ml} \quad (3)$$

I - момент инерции тела относительно оси вращения (осевой момент инерции); M - масса тела; l - расстояние от оси вращения до центра тяжести тела;

В нашем примере расстояние составляет 247,55 мм. Если теперь “перевернуть” наше тело, то есть - подвесить его за точку, которая отстоит от прежней оси вращения на приведенное расстояние (рис.9, система координат располагается в точке подвеса), то период колебаний так подвешенного тела должен оказаться тем же самым. При анализе в системе NX этот эффект находит полное подтверждение.

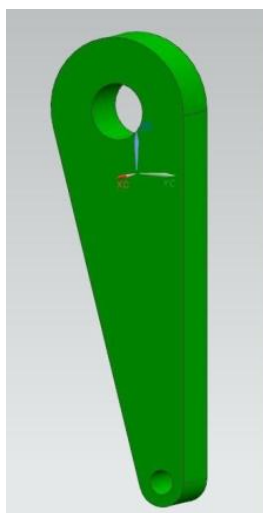


Рис.9 “Перевернутый” физический маятник

Период колебаний физического маятника, рассчитанный с помощью ПА9 составляет 0,9992с.

3. Анализ гироскопического эффекта

В данном примере (рис.10) зеленый цилиндр (радиус 250мм, ширина 100 мм) первоначально располагается в пространстве таким образом, что его центр тяжести находится в точке $X=1000$ мм, $Y=0$ мм, $Z=0$ мм и с помощью сферического шарнира закреплен в начале координат. Осевой момент инерции цилиндра относительно оси X составляет $J = 468750$ кг · мм². Масса цилиндра – $m = 15$ кг. Цилиндру задается начальная скорость вращения вокруг оси X равная $\omega = 18000$ град/с (50 об/сек).

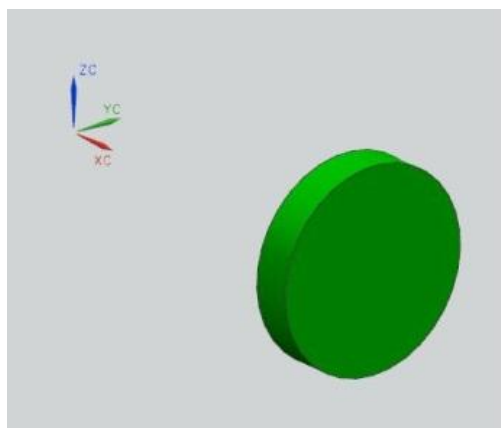


Рис.10 К анализу гироскопического эффекта

Кроме вращения вокруг своей оси, под воздействием силы веса цилиндр начинает совершать поворот вокруг оси Z (прецессия) с одновременным покачиванием вдоль оси Z (нутация). График перемещения центра тяжести цилиндра относительно оси Y представлен на рис.11.

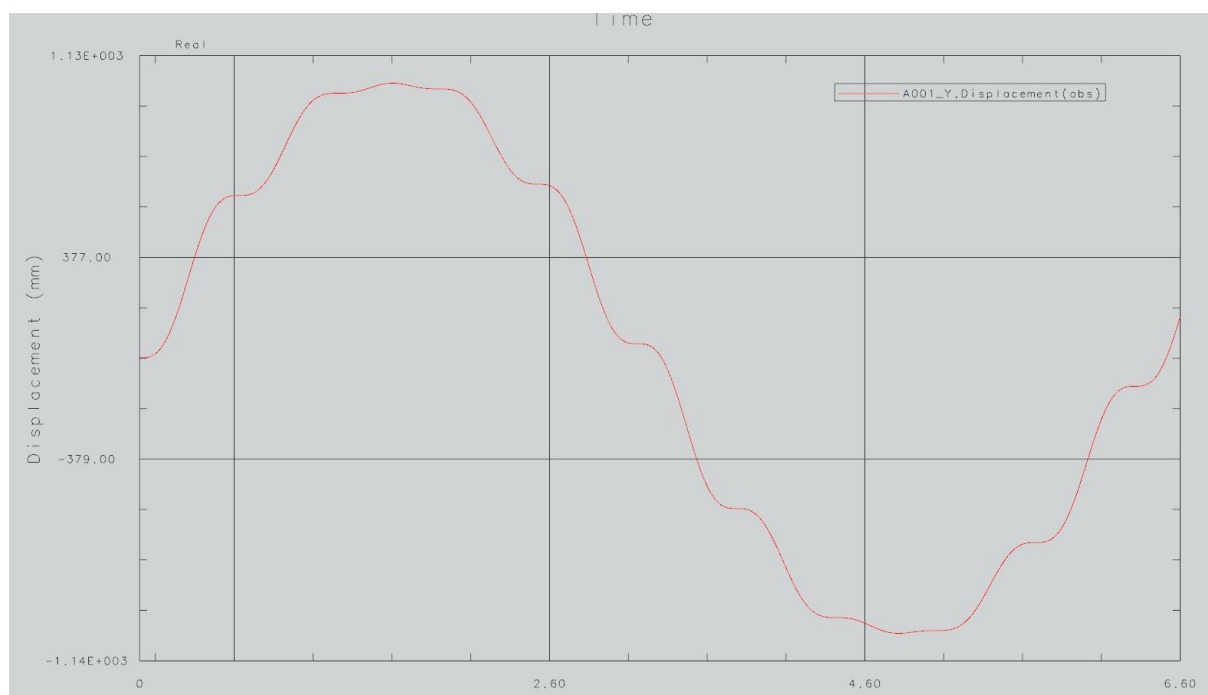


Рис.11 График перемещения центра тяжести цилиндра относительно оси Y , полученный с помощью комплекса NX

Время полного оборота цилиндра, полученное с помощью комплекса NX, вокруг оси Z составляет 6,51 сек. Аналогичное время, рассчитанное в системе ПА8, составляет 6,3 сек. Период прецессии в приближенной теории гироскопов, рассчитывается по формуле

$$T_{\text{пр}} = 2\pi \frac{J\omega}{mgl},$$

где g – ускорение свободного падения; $l=1000\text{мм}$ – расстояние от центра масс до опоры.

Из этой формулы следует $T_{\text{пр}}=6,288\text{с}$. График перемещения центра тяжести цилиндра относительно оси Z (нутация) представлен на рис.12.

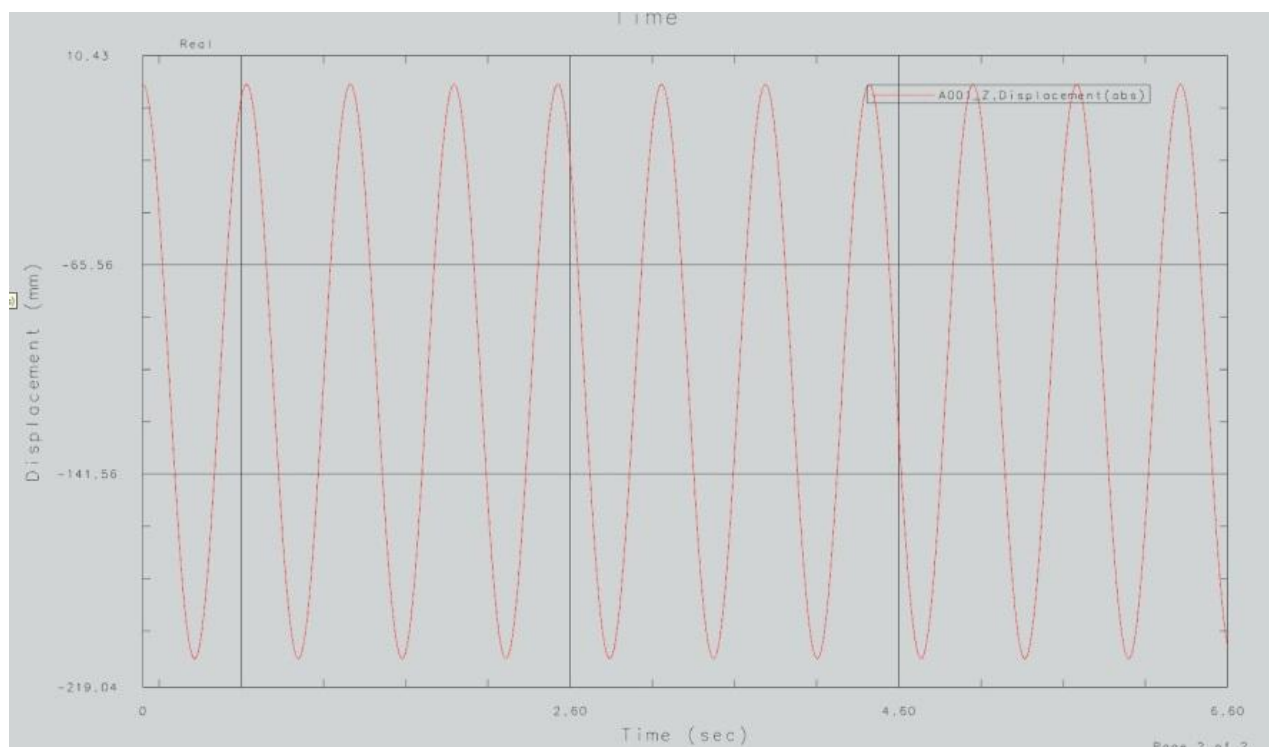


Рис.12 Нутация гироскопа: комплекс NX

Период нутации, рассчитанный с помощью комплекса NX, составляет 0,6317 с. Аналогичное время, рассчитанное в системе ПА8, составляет 0,63 с. Период нутаций в приближенной теории гироскопов рассчитывается по формуле $T_{\text{нут}} = 2\pi \frac{J}{J_1\omega}$, где J_1 – момент инерции относительно оси, перпендикулярной к оси вращения и проходящей через неподвижную точку, отсюда следует $T_{\text{нут}} = 0,674\text{с}$.

4. Двухзвенный механизм

На рис.13 изображен двухзвенный механизм. Исходное состояние механизма представлено на рис.14.

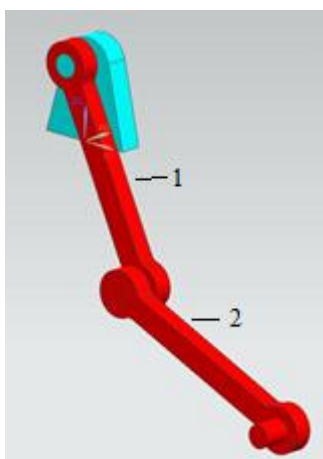


Рис.13 Двухзвенный механизм

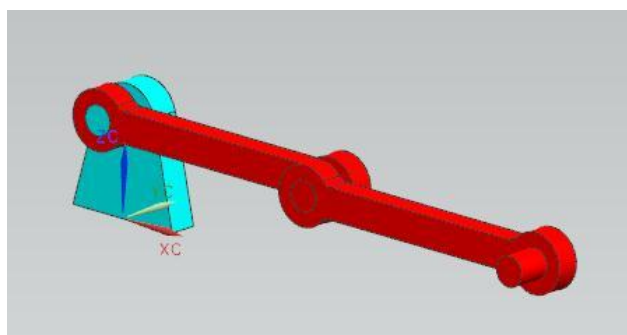


Рис.14 Начальное положение двухзвенного механизма

Полагаем, что механизм эволюционирует только под действием собственного веса. На рис.15 красным цветом показано перемещение по оси X центра масс тела 2, синим цветом – реакция в подвижном шарнире. На рис.16 – представлены результаты, полученные с помощью комплекса ПА9. Как видно они практически совпадают.

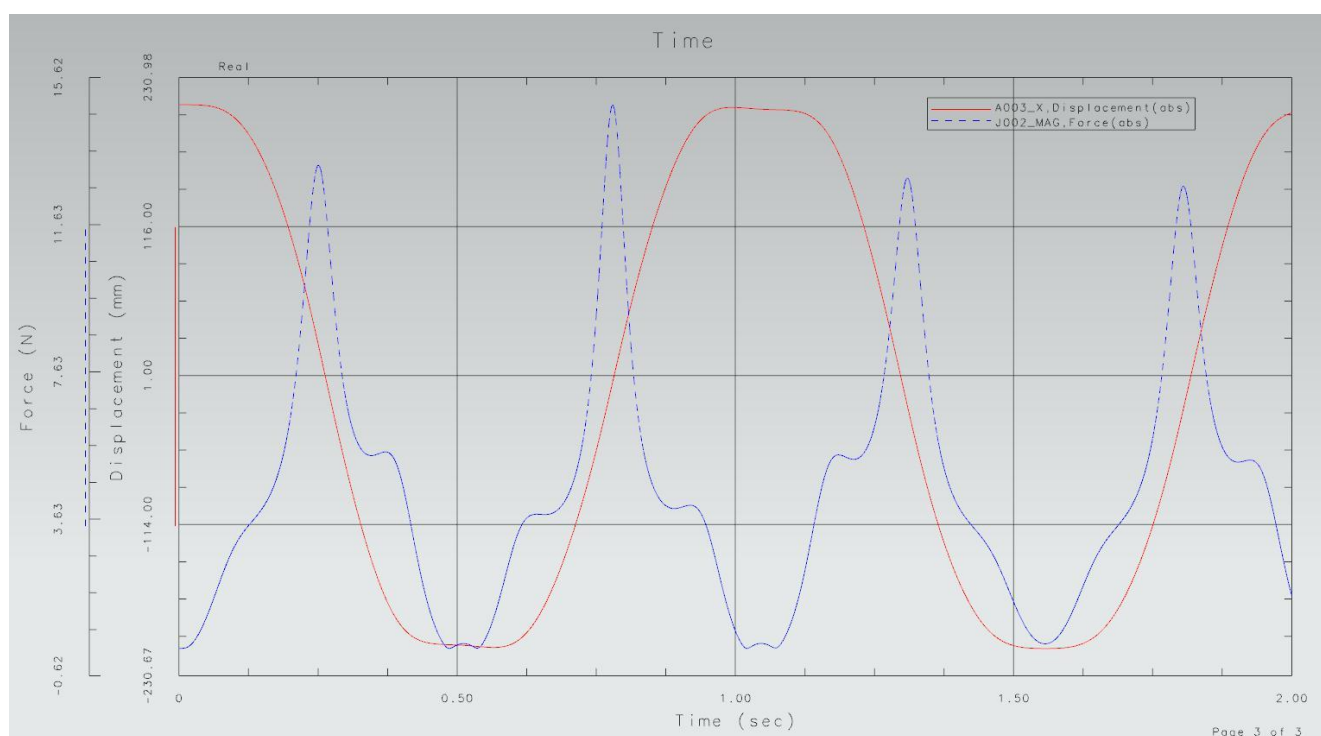


Рис.15 Перемещение по оси X (красный цвет) и реакция в шарнире(синий цвет); комплекс NX

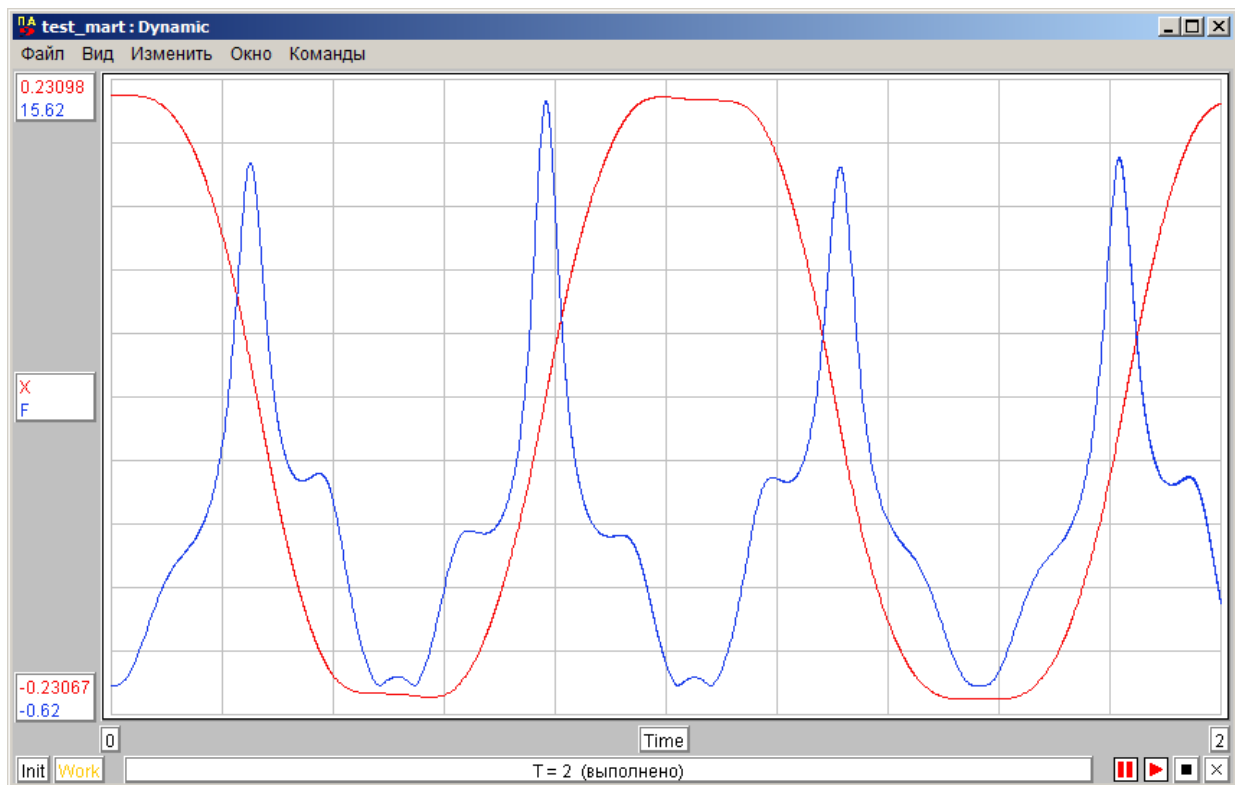


Рис.16 Перемещение по оси X (красный цвет) и реакция в шарнире(синий цвет); комплекс ПА9

5. Сравнение динамических характеристик сложного механизма

Рассматриваемый механизм представлен на рис.17.



Рис.17 Анализируемый механизм

Механизм включает в себя гидроцилиндр (механическая часть), различные тяги, вращательные шарниры, сферические шарниры и пр. Анализ осуществлен только для механической части устройства, без учета гидравлики. Моменты, препятствующие движению механизма, составляют $500 \text{ н} \cdot \text{м}$. Причиной перемещения является движение штока гидроцилиндра. В качестве расчетного параметра, с помощью которого осуществляется сравнение результатов, была принята реакция нагрузки в одном из вращательных шарниров - реакция в шарнире, так называемой “качалки” (рис.18).



Рис.18 Качалка

На рис.19 показана зависимость реактивной силы от времени, полученная с помощью системы NX.

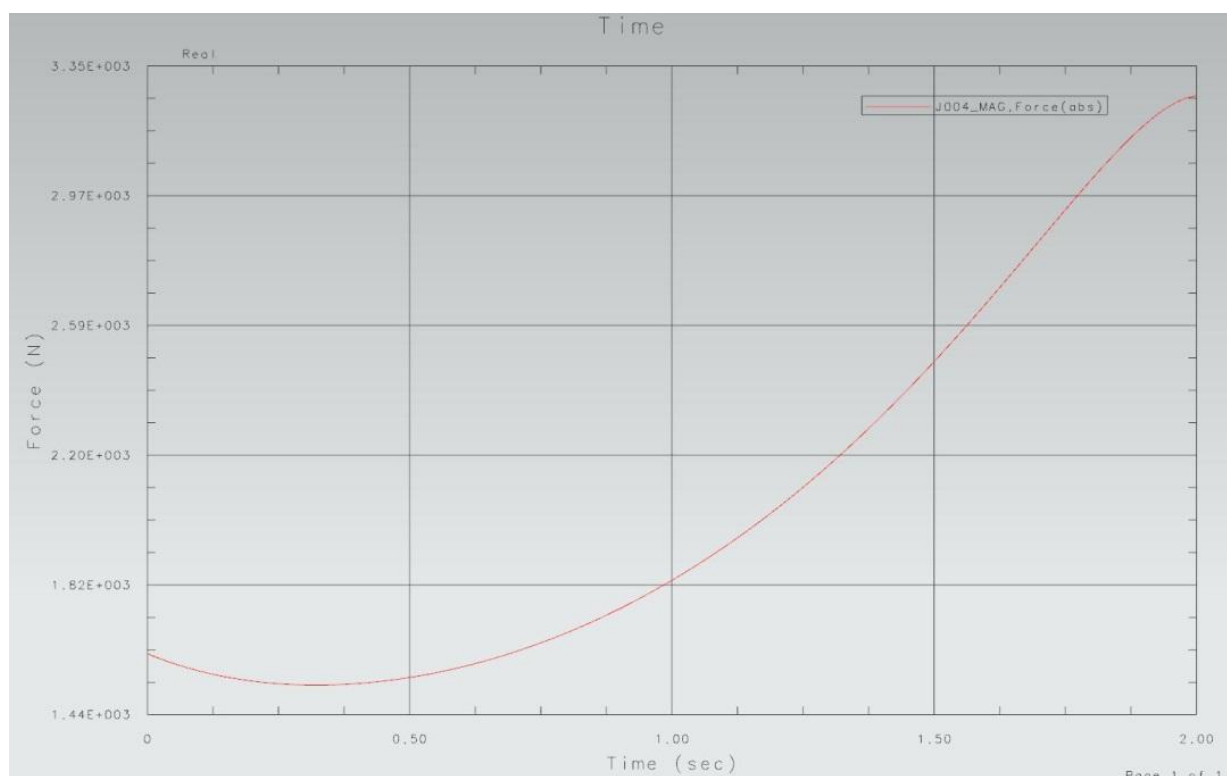


Рис.19 Зависимость силы от времени; комплекс NX

На рис.20 показана аналогичная характеристика той же реактивной силы, полученная в комплексе ПА9.

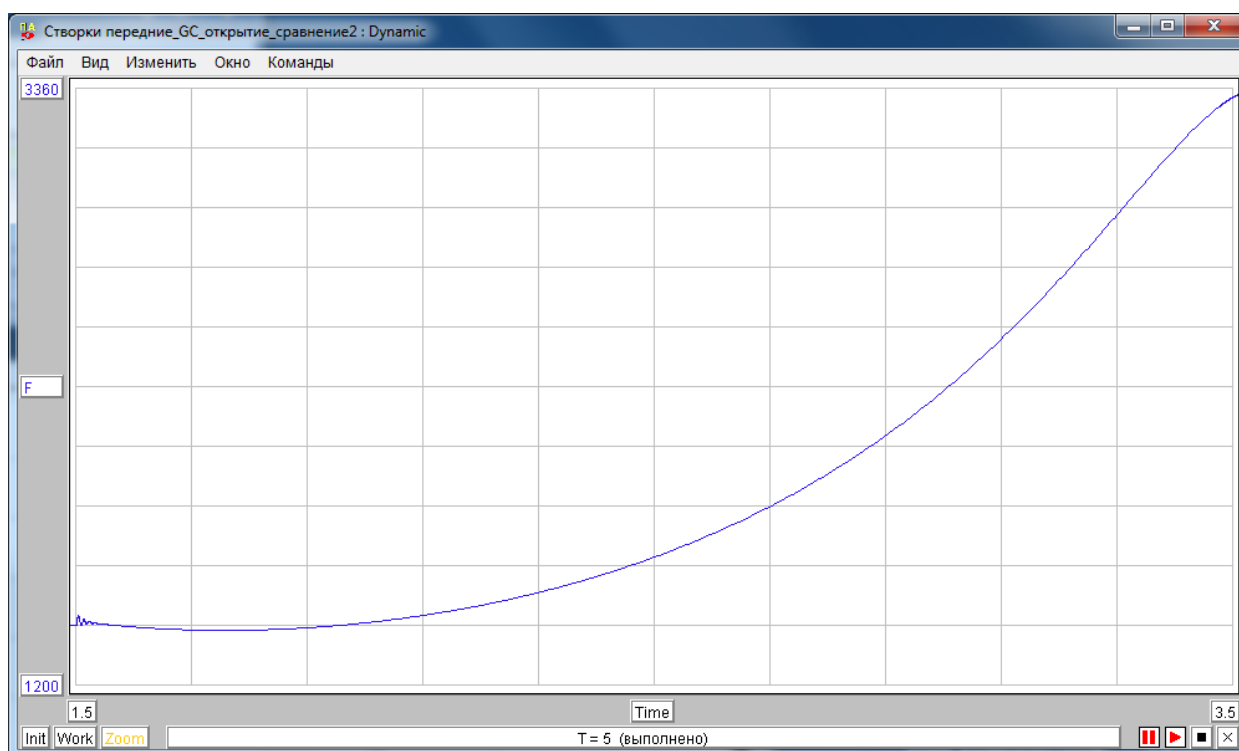


Рис.20 Зависимость силы от времени; комплекс ПА9

Максимальное отклонение результатов составляет 10%. Чтобы не путаться в масштабах полученных графиков, приведем численные значения рассчитанных величин для некоторых, выборочных точек (таблица 1.)

Таблица 1. Зависимость силы от времени для комплексов NX и ПА9

Время (с)	Сила (Н)	
	NX	ПА9
0.22	1534	1403
1.2	2046	1848
2.0	3262	3320

Различие результатов довольно велико. Но нужно отметить сложность подобных численных экспериментов: различные модели компонентов, методы формирования итоговой системы уравнений, численные методы решения дифференциальных уравнений, различная реализация возмущения - (в ПА9 возмущение задается источником давления в гидравлической части гидроцилиндра, в NX такой возможности нет и возмущение задается источником силы). В отсутствие натурного эксперимента не ясно, какая из систем совершает большие ошибки.

Заключение

Отечественные комплексы являются открытыми для пополнения новыми моделями компонентов, чего не скажешь о зарубежных, так например, NX позволяет выполнять

динамический и кинематический расчет без учета гибкости элементов. Для очень многих инженерных расчетов это просто необходимо. И в комплексах ПА8 и ПА9 такая возможность есть. Кроме того в комплексе ПА9 реализована возможность получения частотных характеристик исследуемых динамических систем, что весьма ценно для определения резонансных частот. Также в этом комплексе возможна оптимизация объекта по параметрам.

Отечественные системы моделирования вполне конкурентоспособны по сравнению с западными и при наличии отечественных графических редакторов и программного интерфейса к ним можно получить хорошую САПР с открытой библиотекой математических моделей и методов.

Список литературы

1. Прохоренко В.П. SolidWorks практическое руководство. М.: Бином Пресс, 2004. 448 с.
2. Боргоньен Р. Учимся 3D-моделированию вместе с Solid Edge. М.: ДМК Пресс, 2012. 596 с.
3. Концевич В.Г. Твердотельное моделирование машиностроительных изделий в Autodesk Inventor. М.: ДМК Пресс, 2007. 672 с.
4. Басов К.А. CATIA V5 Геометрическое моделирование. М.: ДМК Пресс, 2008. 269 с.
5. Pro/ENGINEER // RuCadCam.Ru: website. Режим доступа: http://rucadcam.ru/publ/pro_engineer/proengineer/7-1-0-14 (дата обращения 01.10.2015).
6. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осюк В.А. NX для конструктора-машиностроителя. М.: ДМК Пресс, 2010. 498 с.
7. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX Siemens. М.: ДМК Пресс, 2011. 331 с.
8. Применение комплекса ПА9 для проектирования объектов машиностроения // Центр дистанционного обучения МГТУ им. Н.Э. Баумана: сайт. Режим доступа: <http://wwwcdl.bmstu.ru/Press/Press.html> (дата обращения 01.10.2015).
9. Решения LMS для моделирования и проведения испытаний // Siemens PLM Software: company website. Режим доступа: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/lms/index.shtml (дата обращения 28.08.2015).
10. Норенков И.П., Жук Д.М., Маничев В.Б., Трудоношин В.А. Анализ электронных схем при совместном применении явных и неявных методов интегрирования // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1979. Т. 22, № 6. С. 25-28.

Domestic and Foreign CAD System -based Comparison of Analysis Results of Dynamic Systems at the Macro Level

V.A. Trudonoshin^{1,*}, V. A. Martynyuk¹,
V.G. Fedoruk¹

*trudonoshin@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: CAD, mathematical models, dynamics, kinematics, 3D-mechanics

The article compares the modeling results of dynamic processes in the three-dimensional mechanical systems, obtained through the application "simulation of kinematic mechanisms" of NX system and domestic PA8 and PA9 systems. Comparison is done for mathematical and physical pendulum whose behavior is described by an analytic solution that allows an objective evaluation the resulting numerical solution. The periods of pendulum swing, obtained in NX and PA9 systems coincide to the third decimal place. The paper implements a modeling gyroscopic effect, calculation of precession and nutation periods, as well as comparison with the analytical values of the approximate theory of gyroscopes; for NX and PA8 a divergence is maximum 6.5%. Simulation of two-link mechanism in NX and PA9 systems has shown almost complete consistency of the results. For a system mechanism consisting of bodies, cylindrical and ball joints, a divergence of the results is of 10%, due to different models of elements and because of differently specified impact. The research results allow us to draw a conclusion on the competitiveness of PA8 and PA9 systems (and even on their advantages). So in case of available Russian graphic editors and their programming interface, creating the high-quality domestic CAD can be suggested.

References

1. Prokhorenko V.P. *SolidWorks prakticheskoe rukovodstvo* [SolidWorks practical guide]. Moscow, Binom Press, 2004. 448 p. (in Russian).
2. Borgonjen R. *Uchimsia 3D-modelirovaniu vmeste s Solid Edge* [Learning 3D-modeling with Solid Edge] (Russian translation). Moscow, DMK Press, 2012. 596 p.
3. Kontsevich V.G. *Tverdotel'noe modelirovanie mashinostroitel'nykh izdelii v Autodesk Inventor* [Solid modeling of engineering products in Autodesk Inventor]. Moscow, DMK Press, 2007. 672 p. (in Russian).

4. Basov K.A. *CATIA V5 Geometricheskoe modelirovanie* [CATIA V5 Geometric Modeling]. Moscow, DMK Press, 2008. 269 p. (in Russian).
5. *Pro/ENGINEER*. RuCadCam.Ru: website. Available at: http://rucadcam.ru/publ/pro_engineer/proengineer/7-1-0-14 , accessed 01.10.2015. (in Russian).
6. Goncharov P.S., El'tsov M.Iu., Korshikov S.B., Laptev I.V., Osiuk V.A. *NX dlia konstruktora-mashinostroitelia* [NX for Designer-Machine Engineer]. Moscow, DMK Press, 2010. 498 p. (in Russian).
7. Danilov Iu., Artamonov I. *Prakticheskoe ispol'zovanie NX Siemens* [Practical use of NX Siemens]. Moscow, DMK Press, 2011. 331 p. (in Russian).
8. *Primenenie kompleksa PA9 dlia proektirovaniia ob"ektov mashinostroeniia* [Application of PA9 complex for design of engineering objects]. Distance Learning Center of the Bauman MSTU: website. Available at: <http://wwwcdl.bmstu.ru/Press/Press.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
9. *LMS Simulation and Testing Solutions for Functional Performance Engineering*. Siemens PLM Software: company website. Available at: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/lms/index.shtml , accessed 28.08.2015. (in Russian).
10. Norenkov I.P., Zhuk D.M., Manichev V.B., Trudonoshin V.A. Analysis of electronic circuits in a joint application of explicit and implicit integration methods. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika*, 1979, vol. 22, no. 6, pp. 25-28. (in Russian).