

УДК 621.8  
DOI 10.17513/snt.39733

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Худяков К.В., Долгополов Д.Д.

*Волжский политехнический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,  
Волжский, e-mail: kvk\_2002@mail.ru*

Современное опытное производство активно использует системы автоматизированного проектирования (САПР) на всех этапах жизненного цикла изделия. Всегда стоит вопрос, какую САПР выбрать и использовать, в частности, в опытном производстве и при обучении будущих инженеров. В настоящее время существует дополнительное условие выбора: чтобы САПР имела отечественное происхождение. Рассматривается использование нескольких САПР – отечественной «КОМПАС-3D», а также известной зарубежной «SolidWorks». Исследуются дополнительные модули инженерного анализа для этих САПР – соответственно «APM FEM для КОМПАС-3D» и «SolidWorks Simulation». Для исследования используется серийно выпускаемое промышленное изделие – наружное кольцо подшипника 7510A. В выбранных для сравнения САПР строятся трехмерные модели наружного кольца данного подшипника по номинальным размерам. Геометрия у моделей получается одинаковой, отличаются только форматы хранения данных, чтобы модуль инженерного анализа работал с «родным» форматом. Все САПР с дополнительными модулями установлены на компьютеры с одинаковой аппаратной конфигурацией и одной и той же операционной системой (Windows 10). Выбор версий САПР обусловлен возможностью установить их при необходимости под операционной системой Windows 7, еще достаточно распространенной на новых, но еще вполне производительных компьютерах, способных стать инженерными рабочими станциями. Модули инженерного анализа используются для проведения прочностного расчета под статической нагрузкой, одинаковой в используемых модулях. Настройки качества расчета, такие как сетка конечных элементов, настроены на максимум с целью увеличения времени расчета, чтобы его было удобнее измерять. Измерение времени проводится по загрузке центрального процессора компьютера. Чтобы исключить экспериментальные погрешности, для каждого модуля измерение проводится 30 раз и проводится минимальная статистическая обработка. В статье приводится результат, какая из САПР с модулем инженерного анализа оказалась более производительной.

**Ключевые слова:** системы автоматизированного проектирования, САПР, КОМПАС-3D, APM FEM, подшипник качения, наружное кольцо подшипника

## RESEARCH OF THE CAPABILITIES OF CAE SYSTEMS FOR STRENGTH CALCULATIONS OF ROLLING BEARINGS PARTS

Khudyakov K.V., Dolgoplov D.D.

*Volzhsky Polytechnical Institute (branch) of the Volgograd State Technical University, Volzhsky,  
e-mail: kvk\_2002@mail.ru*

Modern pilot production actively uses computer-aided engineering (CAE) systems at all stages of the production. Currently, there is an additional selection condition: CAE must be of Russian origin. The use of several CAE systems is considered – Russian “APM FEM for KOMPAS-3D” and worldwide known “SolidWorks Simulation”. For the study, a commercially produced industrial product is used – the outer ring of the bearing 7510A. In the CAD systems selected for comparison, three-dimensional models of the outer ring of a given bearing are built according to nominal dimensions. The geometry of the models is the same, only the data storage formats differ so that the CAE module works with the native format. All CAE systems are installed on computers with the same hardware and software configuration. The choice of CAE versions is due to the ability to install them under the Windows 7 operating system, by necessary. CAE systems are used to carry out strength analysis under static load, the same in the all examined modules. Calculation quality settings such as element mesh are set to maximum to increase the calculation time to make it easier to measure. The measurement of time is carried out according to the load of the central processor of the computer. The measurement is carried out 30 times and minimal statistical processing is carried out. The article presents the result, which of the CAE systems turned out to be more productive.

**Keywords:** CAD, CAE, KOMPAS-3D, APM FEM, roller bearing, outer ring of bearing

В современном машиностроении роль систем автоматизированного проектирования (САПР) сложно переоценить. Наиболее очевидная их функция – проектирование новых изделий с максимальной точностью, сопровождаемое изготовлением конструк-

торской документации согласно действующим стандартам. Трехмерное моделирование будущих деталей и узлов – скорее всего первое, что упомянет неспециалист. Этот класс САПР известен как САД-системы (Computer-Aided Design) [1]. Не менее

важны САПР, осуществляющие расчеты и инженерный анализ (CAE, Computer-Aided Engineering), и САПР, взаимодействующие с оборудованием с числовым программным управлением, ЧПУ, (CAM, Computer-Aided-Manufacturing). Далеко не все САПР поддерживают все перечисленные направления работы [2]. Это не всегда нужно, но для задач опытного производства сочетание разработки чертежей / трехмерных моделей, прочностных расчетов на уровне вычислительного эксперимента и после этого разработка управляющих программ для станков с ЧПУ являются наиболее удобным и желательным вариантом, но, к сожалению, далеко не всегда удобным по цене. Оборудование с ЧПУ с каждым годом становится все более желательным вариантом, так как сокращает время на обработку заготовок, обеспечивает их стабильное качество, а при правильном создании управляющей программы практически полностью исключает брак.

Задачей данного исследования было выявить узкие места в схеме работы современного опытного производства, в котором изначально в САД-системе разрабатывается трехмерная модель изделия, затем на той же модели в САЕ-системе проверяются физические характеристики будущей детали и в завершении с помощью САМ-системы составляется управляющая программа для оборудования с ЧПУ. Нетрудно заметить, что все этапы разработки являются виртуальными, проводимыми на вычислительной технике, а собственно изготовление возможно только после выявления всех возможных проблем, например учета в управляющей программе наличия оригинальной оснастки на станке [3].

Исследование проводилось в Волжском политехническом институте (филиале) Волгоградского государственного технического университета. Целью ставилось подобрать подходящую САПР, которая была бы достаточно масштабной, чтобы студенты могли знакомиться с ней с первых курсов, знакомиться с возможностями черчения и моделирования (CAD), инженерного анализа (CAE), автоматизированного создания и верификации управляющих программ для станков с ЧПУ (CAM), а придя на производство, познакомиться с другими функциями не просто САПР, а комплексного решения, такими как технологическая подготовка производства, автоматизированное проектирование технологических процессов и безбумажный документооборот. В частности, ставилась задача выяснить, какая САПР более производительна в задачах прочностных расчетов, т.е. затрачивает

наименьшее количество времени на одни и те же расчеты при одинаковых входных данных на одном и том же оборудовании. Попытки сравнивать возможности разных САПР характерны для профессионального сообщества и для молодых специалистов [4], но так как различных САПР достаточно много [1], а моделируемые детали достаточно многообразны, то и сравнение как функциональных особенностей программ [5], так и производительности одной и той же программы на разной аппаратной части [6] остается актуальной задачей.

### Материалы и методы исследования

Одним из требований к масштабной САПР, включающей в себя САД, САМ и САЕ-систему, является ее отечественное происхождение. Требованию максимального охвата всех производственных потребностей на текущий момент удовлетворяют разработки от компаний «Аскон» и «Топ-системы», известные по своим наиболее узнаваемым продуктам «КОМПАС-3D» и «T-Flex CAD» [7]. Для исследования был выбран «КОМПАС-3D» с САЕ-дополнением «АРМ FEM» и САМ-дополнением «Модуль токарной обработки», ранее известный как «CNC Turn». Сам по себе «КОМПАС» является средством проектирования исходной трехмерной модели изделия, «АРМ FEM» предназначен для прочностных расчетов, а «Модуль токарной обработки» и «Модуль фрезерной обработки» составляют управляющие программы для оборудования с ЧПУ. «КОМПАС» является самостоятельным решением, в котором возможно трехмерное моделирование и двухмерное черчение, модули же без него не работают и функционируют на правах так называемых «библиотек» – дополнений к «КОМПАСу», которых довольно много, например «Машиностроительная конфигурация» или «Библиотека пружин».

Отечественным конкурентом такой тройной связки является пакет программ от компании «Топ-системы», где базовая программа «T-Flex CAD» является средством разработки трехмерных моделей, модуль «T-Flex Анализ» предназначен для прочностных расчетов, а модуль «T-Flex ЧПУ» – для создания управляющих программ.

До недавних пор на роль универсального решения претендовал «SolidWorks» с множеством дополнений, из которых для прочностных расчетов (в русифицированной версии называемых статическим анализом) использовалось дополнение «Simulation», а для создания управляющих программ ЧПУ – «SolidCAM». Сейчас изучение данной системы возможно, но толь-

ко на правах одновременного знакомства с отечественными аналогичными разработками. Также, поскольку наш опыт работы с данной системой отсчитывается с 2011 г., сравнение с ней представлялось уместным и интересным, особенно в контексте сравнения с ранее проведенными исследованиями. Все рассматриваемые программы являются лицензионными: «SolidWorks» – бессрочная учебная версия, «КОМПАС» – версия для образовательных учреждений, «T-Flex» – академическая лицензия.

Существует достаточно САПР помимо упомянутых, как отечественных, так и зарубежных. Многие из них, например Siemens NX или Creo, являются полноценными CAD/CAM/CAE-системами, то есть удовлетворяют поставленному запросу, но зарубежное происхождение подразумевает трудности с лицензиями. Также эти системы являются профессиональными, т.е. знание технологии машиностроения перед знакомством с ними является крайне желательным.

Достаточно много САПР не удовлетворяет поставленной задаче из-за того, что в них присутствуют только модули CAD (трехмерное моделирование, в некоторых случаях вообще только двумерное черчение) Так обстоят дела с отечественным NanoCAD [8]. Есть класс САПР с открытым исходным кодом, позиционируемых как бесплатные (LibreCAD, FreeCAD, QCAD). Многие из них зарубежные, но это не является проблемой, так как скачать их может любой желающий с официальных сайтов разработчиков. Несмотря на привлекательные условия для ознакомления, существует платная поддержка, что свидетельствует о том, что на самом деле освоение данных программ может наткнуться на подводные камни. Бесплатных CAD/CAM/CAE-систем на текущий момент найти не удалось.

Объектом исследования стали модули для прочностного расчета (статического анализа) для САПР «SolidWorks» и «КОМПАС-3D». Следует отметить, что не всегда компания, выпускающая основной продукт, выпускает и дополнения к нему. Так, дополнения для «КОМПАСа» выпускают сторонние разработчики. Приобрести их можно двумя путями – как через «Аскон», разработчика «КОМПАСа», так и разработчиков дополнений. Приятным обстоятельством является то, что перечисленные дополнения к «КОМПАСу» имеют бесплатный пробный 30-дневный период, что позволяет легально ознакомиться с ними и принять решение о приобретении, либо, для студента, имея на личном компьютере бесплатную студенческую версию «КОМПАСа», до-

бавить к ней пробный модуль. 30 дней достаточно для выполнения, например, курсовой работы. Версии программ были выбраны исходя из возможности установить программы под операционной системой Windows 7, которая на сегодняшний день является минимально допустимой для рабочего места проектировщика и компьютеров под ее управлением, этих систем сохранилось и работает достаточно много. Так, версия SolidWorks 2020 является последней, которую можно установить под «семеркой». Версии расчетных модулей соответствуют версиям основных программ – при установке программного обеспечения комплект модуль всегда соответствует версии основной программы, а при самостоятельной установке студентом обычно там, где возможно скачать расчетный модуль для 30-дневного бесплатного ознакомления (например, на сайте «Аскона»), всегда указывается, с какой версией основной программы модуль будет работать.

Теоретической базой прочностных расчетов в CAE-системах служит метод конечных элементов, основная концепция которого заключается в том, что любую непрерывную величину, такую как деформации, напряжение, можно аппроксимировать дискретной моделью, построенной на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Множество объемных трехмерных элементов (тетраэдров), на которые разбита исследуемая область (модель детали), называется конечно-элементной сеткой. Способ разбиения модели сеткой конечных элементов, выбор типа конечных элементов и граничные условия оказывают влияние на точность статического анализа, поэтому достоверная оценка его результатов ощутимо зависит от уровня квалификации специалиста. Качество расчетов будет низким, если конечных элементов будет слишком мало. Максимально допустимой величиной конечно-го элемента является его размер в 3–4 раза меньше самого тонкого фрагмента детали. Увеличение их количества улучшает качество расчетов, приводя его к уровню, когда в целом результату можно доверять, а производительность вычислительных средств позволяет установить максимальное количество конечных элементов без существенных потерь времени на расчеты. В данном исследовании были взяты нагрузки уже стандартизированные для изделия, так как вариации нагрузок могут привести к результатам, которые молодые специалисты могут интерпретировать неверно: следует помнить, что нагрузки должны удовлетворять основным условиям статического ана-

лиза: все деформации и напряжения в материале модели подчиняются закону Гука; вызванные перемещения достаточно малы, чтобы можно было пренебречь изменениями в жесткости, вызванными нагружением; граничные условия не изменяются во время приложения нагрузок.

В качестве входных данных для CAE-систем, выполняющих прочностной расчет, является трехмерная твердотельная модель будущего изделия. Было решено проверить работу расчетных модулей на изделии, уже производящемся на предприятии «ЕПК Волжский», подшипникового завода в г. Волжский Волгоградской области, а именно подшипнике 7510А (наружный диаметр 90 мм, внутренний диаметр 74,9 мм, толщина 23 мм) [9]. Конкретно, исследованию подверглось наружное кольцо данного подшипника. Нагрузка была взята штатной номинальной статической, 14000 Н.

Несмотря на развитие техники, ее усложнение и совершенствование, подшипники не сильно поменялись в своей конструкции и предназначении, однако увеличивается их номенклатура; также существует научно-производственная потребность в изготовлении экспериментальных подшипников [10], причем прогрессивными методами. Прежде чем применять САМ-системы, в которых связь разработки и производства проявляется наиболее ярко при создании управляющих программ для станков с ЧПУ, в проектируемом изделии требуется проверка прочностных характеристик.

Следует отметить, что молодое поколение инженеров склонно к построению трехмерных моделей и сборок, но им знание тонкостей технологии производства приходит только с опытом. Создание чертежа или трехмерной модели деталей, которые впоследствии экспортируются в САЕ-систему, где в дальнейшем производится прочностной расчет, представляется студентам машиностроительных направлений самым логичным и правильным.

Для каждой системы трехмерная модель наружного кольца подшипника создавалась в «родном» формате (файлы с расширением .sldprt для «SolidWorks» и .m3d для «КОМПАС-3D»). Использование общего формата все равно требует создания трехмерной модели в родном формате одной из программ и дальнейшей конвертации, а привлечение дополнительной САПР, чтобы формат для исследуемых был «неродным», было признано избыточно сложным.

Наружное кольцо выбранного подшипника не отличается слишком сложной геометрией и не представляет особых затруднений при построении его трехмер-

ной модели. Исследуемые программные средства, безусловно, отличаются в характере построения трехмерной модели и заслуживают сравнения по эргономичности использования: насколько доступны основные команды, сколько раз нужно щелкнуть мышью, каков ее «пробег» и в итоге время, затраченное на построение. Но здесь слишком много субъективных факторов: следовало бы сравнивать время построения модели при одинаковых навыках владения каждой из программ, что нечасто встречается даже среди профессиональных разработчиков – обычно есть какая-то излюбленная программа или та, которая используется на предприятии и хорошо специалистом изучена.

Поэтому в качестве критерия производительности каждой из программ (а точнее, расчетных модулей) было принято время, которое затрачивает один и тот же персональный компьютер на прочностной расчет (статический анализ) на одной и той же трехмерной модели при одинаковых заданных нагрузках: статические, радиальные. Критерии расчета, главнейшим из которых было разрешение сетки конечных элементов, также не отличаются. С целью иметь возможность измерить время вручную, параметры были выставлены на максимум. Аппаратная конфигурация использовавшегося компьютера была следующей:

процессор: Intel(R) Core(TM) i5 4590, тактовая частота 3.30 ГГц;

материнская плата: Intel(R) 8 Series/C220 Chipset Family SATA AHCI Controller; оперативная память: 8 ГБ DDR3, тактовая частота 800 МГц;

видеокарта: AMD Radeon R7 250 (2 ГБ DDR3), разрешение дисплея 1920x1080, частота обновления 75 Гц;

жесткий диск: Western Digital WD Blue 500 ГБ WD5000AAKS;

операционная система: Windows 10 Home 21H2, 64-разрядная.

Получаем однофакторный эксперимент, где для одной и той же трехмерной геометрии в модели при одинаковых заданных нагрузках и одинаковых условиях закрепления измеряем время прочностного расчета. Время, затраченное на выполнение программой поставленной задачи, замеряем по загрузке процессора. Во время расчета процессор нагружается близко к 100%, когда же нагрузка процессора падает до фоновых значений, близких к нулю, констатируем, что программа выполнила обсчет. Программы выводят служебные сообщения о ходе расчета, но измерять время загрузки процессора проще, так как методика уже была отработана в другом исследовании авторов [11].

### Результаты исследования и их обсуждение

Трудоёмкость исследования была подобрана такой, чтобы данные были достаточно репрезентативны, чтобы подвергнуть их минимальной статистической обработке (30 опытов на каждый программный модуль). Затраченное время соответствует важности задачи (численно подкреплённая оценка для неспециалистов в технологии машиностроения, занимающихся закупками и установкой программного обеспечения). Методика масштабируема для оценки других модулей тех же программ (например, SolidWorks Motion).

Испытания САПР для статического расчёта одинаковых моделей наружного кольца подшипника 7510А

№ испытания	Время на расчёт, с	
	APM FEM для КОМПАС-3D	SolidWorks Simulation
1	7,95	13,77
2	7,11	13,86
3	7,82	13,48
4	8,13	14,03
5	8,42	14,00
6	8,23	14,09
7	7,35	14,15
8	7,79	13,82
9	8,14	14,65
10	7,67	14,51
11	7,01	14,13
12	7,17	13,52
13	7,15	13,65
14	7,88	13,74
15	7,2	13,52
...	...	...
30	7,25	14,10
Среднее значение	7,668	14,07
Средне-квадратическое отклонение:	0,4024	0,0288
Медиана:	7,79	14,09
Мода:	7,8	14,17

### Заключение

Полученные результаты позволяют заключить, что наибольшее время на прочностной расчёт показывает модуль SolidWorks Simulation. APM FEM для КОМПАС-3D за-

тратил на выполнение той же задачи меньше времени – результат, не претендующий на фатальный разрыв, а скорее предопределённый алгоритмами, заложенными внутри программы. Модуль для «КОМПАСа» оказался впереди по производительности и потому был рекомендован как система, с которой стоит знакомить будущих специалистов в первую очередь. Этот вывод подкрепляется развитой экосистемой КОМПАСа, который доступен широкому кругу интересующихся даже домашней версией, стоящей доступных для среднего домохозяйства денег. Поскольку КОМПАС уже давно используется в учебном процессе, была дана рекомендация руководству в следующей версии расширить используемую конфигурацию, пополнив ее модулями APM FEM, а также модулями токарной и фрезерной обработки.

Дальнейшие исследования будут касаться САМ-модулей (токарной и фрезерной обработки для «КОМПАСа» и SolidCAM), так как работа с проектируемым опытным изделием после прочностного расчёта переходит к ним, и было бы интересно выяснить, сохранится ли установленное в данном исследовании соотношение производительности. Также дальнейшие исследования будут направлены на сравнение КОМПАС-3D и T-Flex CAD, особенно при использовании геометрически более сложных трехмерных моделей. Также планируется определить влияние аппаратной и программной части на их производительность – повторить исследование как на более, так и менее производительных компьютерах – последнее актуально, так как не всем молодым специалистам полагается «по рангу» высокопроизводительная техника, но идей и навыков моделирования у них вполне достаточно и хотелось бы, чтобы они оказывались востребованными.

### Список литературы

1. Дунаева В.С. Обзор современных систем автоматизированного проектирования (САПР) // Научный лидер. 2022. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <https://scilead.ru/article/2269-obzor-sovremennikh-sistem-avtomatizirovannogo> (дата обращения: 17.06.2023).
2. Горшкалев А.А., Кривцов А.В., Сайгаков Е.А., Сморгалов Д.В. Использование CAD/CAE-систем для расчёта на прочность деталей кривошипно-шатунного механизма ДВС // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 1. С. 172–176.
3. Кондрашева С.Г., Хамидуллина Д.А., Лашков В.А. Инженерное проектирование механизмов и машин с использованием системы APM WinMachine // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018: материалы IX международной научно-технической конференции (Казань, 05–07 декабря 2018 г.). Казань: Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий, 2018. С. 103–107.

4. Казаков Е.П., Богданова Н.Ю. Сравнительные характеристики пакетов САПР: SolidWorks и T-Flex CAD // Молодой исследователь Дона. 2017. № 5. С. 50–57.
5. Чернышов Д.Н., Григорьев А.В. Моделирование физических процессов в САПР // IV Международный научный форум Донецкой Народной Республики: материалы международной научно-технической конференции (Донецк, 22–24 мая 2018 г.). Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2018. № 1. С. 109–112.
6. Зуев Е. Тестируем железо под SolidWorks Simulation // САПР и графика. 2021. № 1. С. 28–31.
7. Дятлов М.Н., Юдкин И.Ю., Шляховский А.А. Тенденции развития современных интегрированных систем // Молодой ученый. 2015. № 2. С. 148–150.
8. Стремнев А. Не все так гладко в мире САПР: о сопряжениях в КОМПАС-3D, nanoCAD и Fusion 360 // Isicad: портал САПР, PLM и ERP. 2023. [Электронный ресурс]. URL: [https://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=22626](https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22626) (дата обращения: 17.06.2023).
9. ГОСТ 27365-87 (СТ СЭВ 3338-86, СТ СЭВ 1477-78). Подшипники роликовые конические однорядные повышенной грузоподъемности. Основные размеры. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 25 с.
10. Матлин М.М., Санинский В.А., Худяков К.В., Карпов В.Г. Подшипник качения // Патент на полезную модель РФ №217485. Патентообладатель: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». 2023. Бюл. № 10.
11. Крамер И.А., Хилько П.Р., Худяков К.В. Исследование возможностей оптимизации управляющих программ для станков с числовым программным управлением при обработке внешних колец подшипников скольжения // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-2. С. 299–303.