“Продукты *LMS* обеспечивают инновационный подход к моделированию и испытаниям сложной техники”

Интервью П.А. Тараненко (Южно-Уральский государственный университет, директор НОЦ “Экспериментальная механика”)

Александра Суханова, Сергей Павлов (CAD/CAM/CAE Observer)

Этим материалом мы открываем новую рубрику в журнале – **“Наука для промышленности”**, в которой планируем рассказывать о достойных широкого внимания достижениях вузовской науки в сфере САПР/*PLM* и результатах, ориентированных на практическое использование в высокотехнологичных производствах, а также о работах, выполненных вузами по заказам промышленных предприятий. Такие достижения и результаты появляться просто обязаны, поскольку правительством РФ на это выделены десятки миллиардов рублей – как на поддержку Национальных исследовательских университетов **(НИУ)**, так и на финансирование мероприятий по кооперации российских вузов и промышленных предприятий.

Одним из таких университетов является Южно-Уральский государственный университет, в котором создана уникальная научно-исследовательская база, сосредоточенная в научно-образовательных центрах.

Сегодняшний наш гость – **Павел Александрович Тараненко**, кандидат технических наук, директор Научно-образовательного центра **(НОЦ)** “Экспериментальная механика” Южно-Уральского государственного университета **(ЮУрГУ)**. Павел Александрович считает, что России требуется абсолютно новый, современный и инновационный, подход к моделированию нагрузок и испытаниям сложной и ответственной техники, особенно при создании перспективных конструкций и элементов в аэрокосмической и автомобильной отраслях. С этим трудно спорить – неудачи могут дорого стоить.

Важность и необходимость импортозамещения не подвергается сомнению, но не следует под этим лозунгом наглухо закрывать страну от технологически развитого и продвинутого Запада, вместо того чтобы настойчиво перенимать передовые зарубежные технологии и опыт. В Южно-Уральском государственном университете делают это вдумчиво и успешно. Главное свое предназначение сотрудники центра “Экспериментальная механика” видят в предоставлении квалифицированной экспериментальной поддержки при разработке предприятиями сложных изделий. Первыми в России ученые ЮУрГУ разработали методику виртуальных виброиспытаний, что необходимо для ответственных и очень дорогостоящих конструкций. В её основе лежат передовые

Павел Александрович Тараненко родился 28 января 1979 года в Челябинске. В 1996 году окончил среднюю школу с золотой медалью. В 2002 году окончил Южно-Уральский государственный университет, специальность – “Динамика и прочность машин”. 2 марта 2011 года защитил кандидатскую диссертацию по специальности “Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры”.

С 2011 года – доцент кафедры “Прикладная механика, динамика и прочность машин” ЮУрГУ. Читает курсы “Аналитическая динамика и теория колебаний” и “Динамика машин”.

С 2012 года – директор научно-образовательного центра “Экспериментальная механика”.

В 2012–2013 гг., в сотрудничестве с инженерами *LMS*, группа ведущих специалистов университета под руководством П.А. Тараненко осваивает передовую методику виртуальных вибропрочностных испытаний ответственных изделий аэрокосмической техники.

В настоящее время под руководством П.А. Тараненко в ЮУрГУ активно внедряются передовые технологии *LMS/Siemens* и осуществляется расчетная и экспериментальная поддержка крупных проектов, которые университет выполняет вместе с рядом машиностроительных предприятий – АО “Уралтрансмаш” (г. Екатеринбург), ОАО “СКБ “Турбина” (г. Челябинск), ОАО “КАМАЗ” (г. Набережные Челны) и др. Одним из проектов является создание плавающего бронеавтомобиля с броней из композитных материалов по гранту Российского научного фонда.

технологии компаний *Siemens* и *LMS*, аналогов которым в России просто нет.

Этим технологиям и была посвящена львиная доля докладов и презентаций на проходившем в третьей декаде апреля в городе Сочи форуме ***PLM Connection Russia 2015*** (см. репортаж в *Observer #3/2015*), где и состоялась наша беседа с г-ном Тараненко.

– Павел Александрович, расскажите, пожалуйста, какая сфера деятельности зашифрована под названием "Экспериментальная механика"? Кто вас финансирует?

– Я начну немного издалека. В 2010 году, в рамках государственной программы по формированию и развитию сети Национальных исследовательских университетов, наш Южно-Уральский государственный университет заслуженно получил этот статус. Продолжительность программы поддержки НИУ составляет 10 лет. Первые пять лет программа финансируется государством, вторую пятилетку вуз финансирует себя самостоятельно. В рамках первого этапа, который длился с 2010 года по 2014 год, ЮУрГУ оснастился самым современным оборудованием и ПО. На базе вуза было создано несколько научно-образовательных центров: Центр машиностроения (со станками с ЧПУ), Суперкомпьютерный центр, Центр нанотехнологий, Центр композитных материалов, наш Центр "Экспериментальной механики" и другие. Идея заключалась в том, чтобы сформировать в вузе взаимодействующие друг с другом структуры, способные выполнять комплексные проекты, включая разработку конструкторской документации, расчеты, испытания и изготовление опытного образца. Но, самое главное, такое устройство позволяет вузу эффективно сотрудничать с промышленными предприятиями.

С.Б. Сапожников

Хочу заметить, что госпрограмма НИУ – это только первый шаг к налаживанию такого взаимодействия. Шаг №2 – это постановление № 218 Правительства РФ "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства", а также федеральные целевые программы и гранты Российского научного фонда.

Научно-образовательный центр "Экспериментальная механика" создан приказом ректора в 2012 году, в том же году к нам поступило соответствующее высокотехнологичное оборудование. Для работы в новом подразделении и выполнения комплексных проектов привлекаются специалисты различных профессий – механики, гидравлики, специалисты по системам управления. В настоящий момент основная роль нашего Центра состоит в том, чтобы сопровождать совместные проекты вуза и промышленных предприятий, выполняемые в рамках упомянутого 218-го постановления и федеральных целевых программ, в части испытаний и расчетов динамики и прочности разрабатываемых изделий и элементов конструкций.

– Каким образом ваш Центр оснащался оборудованием и специализированным ПО, кто этим занимался?

– **Ключевую роль в создании Центра "Экспериментальной механики", на мой взгляд, сыграл Сергей Борисович Сапожников**, профессор нашей кафедры "Прикладной механики, динамики и прочности машин". 2 марта 2011 года я защитил свою кандидатскую работу, и буквально через несколько дней он привлек меня к процессу выбора оборудования и ПО. До конца 2011 года мы присматривались к имеющимся на рынке предложениям по нашей тематике и формировали необходимую нам комплектацию. В 2012 году состоялась поставка оборудования.

– Как выбирались поставщики оборудования и ПО?

– Нас сильно заинтересовали возможности комплекса *LMS*. Я имею в виду сочетание возможностей для расчетов и эксперимента в решениях *LMS*, которых нет у конкурентов. Одним из дистрибьюторов *LMS* в России является компания "Новатест". У нас состоялось несколько встреч, на которых представители компании нам более подробно рассказали о возможностях комплекса. Сергей Борисович первым в университете познакомился с богатыми возможностями комплекса *LMS*, сумел увидеть перспективы и убедить руководство университета в том, что приобретение передового аппаратно-программного комплекса *LMS* принесет университету пользу. После того как университет определился с комплектацией, было получено экспертное заключение научно-технического совета университета и сформирована аукционная документация. Поставщик оборудования и ПО определялся на конкурсной основе.

– По каким критериям осуществлялся выбор продуктов LMS?

– В нашем случае корректнее говорить не о критериях выбора, а о соображениях, которыми мы руководствовались, решая задачу оснащения нашего Центра. Всё сложилось удивительным образом. Закупки происходят так: кафедры/центры/подразделения университета пишут заявки о том, что им нужно

на следующий год. На их базе формируется перечень, определяется необходимая сумма финансирования, проводится научно-технический совет и, на основании его экспертного заключения, принимается решение о необходимости приобретения оборудования. Сама закупка оборудования осуществляется на конкурсной основе. Главной мотивацией для приобретения продвинутых решений *LMS* тогда служило желание развивать вуз, развиваться самому, получить современное передовое оборудование и новые технологии.

На тот момент я лишь в общих чертах представлял себе возможности этого комплекса. С течением времени мое представление о нём постепенно меняется. Сегодня для меня это уже не просто комплекс, который соединяет расчеты и эксперимент, – **это новый подход к организации работы по проектированию изделий**.

– Рассматривались ли конкурирующие продукты от других вендоров?

– Если говорить об аналогах *LMS*, то нам, конечно же, было известно, что для проведения конечно-элементного анализа в мире применяют различные решения – компаний *MSC Software, ANSYS* и др. К примеру, на нашей кафедре исторически используется связка *SOLIDWORKS* и *ANSYS*. На аэрокосмическом факультете нашего вуза предпочитают *MSC Nastran*. **Сегодня университет может похвастаться сочетанием расчета и эксперимента на базе решений *LMS* и *Bruel & Kjaer Vibro*, которое нам поставлено компанией "Новатест"**.

Сравнительно близко от нас, в городе Миасс, расположен "Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева". При выборе оборудования и ПО, мы, разумеется, исходили из потенциальной возможности сотрудничества с этим предприятием, где могли бы применить *LMS Test.Lab* и датчики для решения их задач.

По нашему запросу предложение о составе комплекса "железа" и ПО поступило к нам и от компании "Новатест", и от российского офиса *LMS*. Оно включало в себя четыре вибростенда и решения *LMS SCADAS*, датчики, модальные вибровозбудители, *LMS Test.Lab, LMS Test.Xpress, LMS Virtual.Lab* и *LMS Imagine.Lab Amesim.* Основная идея такого решения заключалась в том, чтобы наш Центр мог закрывать ряд задач, связанных с наземными частотными испытаниями летательных аппаратов.

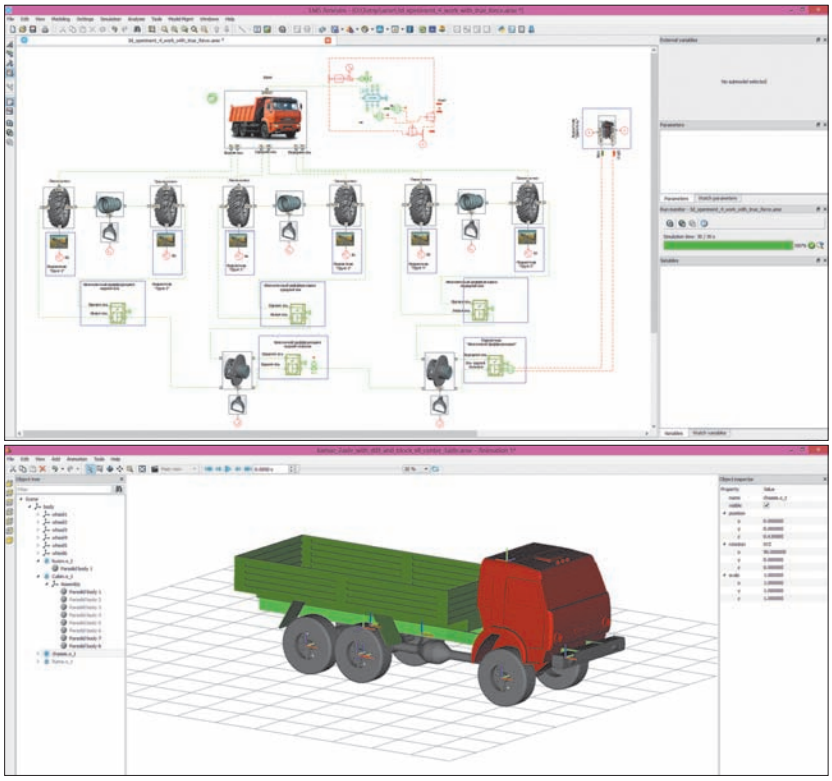
– Какие коммерческие проекты ведет ваш Центр?

– Сейчас наш центр участвует в трех коммерческих проектах: **с АО "Уралтрансмаш", ОАО "СКБ "Турбина" и ОАО "КАМАЗ"**. Наш вуз выиграл их в рамках конкурсов, которые объявляются Министерством образования и науки согласно Постановлению №218 и федеральной целевой программе "Исследования и разработки". Продолжительность таких проектов составляет два с половиной года. Еще один проект – по разработке ударостойких композитных материалов и конструкций для плавающих бронеавтомобилей – мы выполняем вместе с Российским научным фондом. В нашем университете появился свой конструкторский отдел, который полностью занят реализацией конструкторской части этих проектов.

Я абсолютно уверен в том, что мы могли бы расширить сотрудничество с предприятиями в отношении виртуальных испытаний и натурных экспериментов, которые проводит наш Центр. Наша задача – активнее рассказывать о наших возможностях и компетенциях. Поэтому приглашение выступить с докладом на форуме *Siemens* в Сочи и дать интервью вашему журналу я рассматриваю как возможность сделать шаги в этом направлении.

– Возникла ли необходимость после присоединения LMS к Siemens PLM Software изменить применяемый набор программных инструментов, в том числе по рекомендации нового владельца ПО?

– Пока такой необходимости нет. Однако, есть нюансы. В состав нашей делегации, приехавшей на форум в Сочи из Челябинска, входит начальник управления научной и инновационной деятельностью ЮУрГУ – **Андрей Владимирович Келлер**,



Функциональная блок-схема автомобиля "КАМАЗ" с полностью дифференциальной трансмиссией (LMS Amesim Imagine.Lab)

который ведет совместный проект нашего вуза с ОАО “КАМАЗ” в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки”. Проект с КАМАЗом начался во второй половине 2014 года, он рассчитан на два с половиной года. Как известно, на площадке КАМАЗ связка *NX/Teamcenter* является стандартом де-факто. Соответственно, для того чтобы эффективно сотрудничать с ОАО “КАМАЗ”, нам тоже необходимо предпринимать шаги в этом направлении. Внедрив у себя *Teamcenter* и получив доступ к некоторым разделам *PDM*-системы КАМАЗа, нам будет легче создавать *3D*-макеты изделий, обмениваться *3D*-моделями с предприятием и, соответственно, эффективно выполнять совместные проекты.

Я считаю, что наличие тех или иных продуктов в университете должно определяться тем предприятием-партнером, которое ставит перед нами задачу. С системой *Teamcenter* мы пока не знакомы, но я надеюсь, что это произойдет в самое ближайшее время.

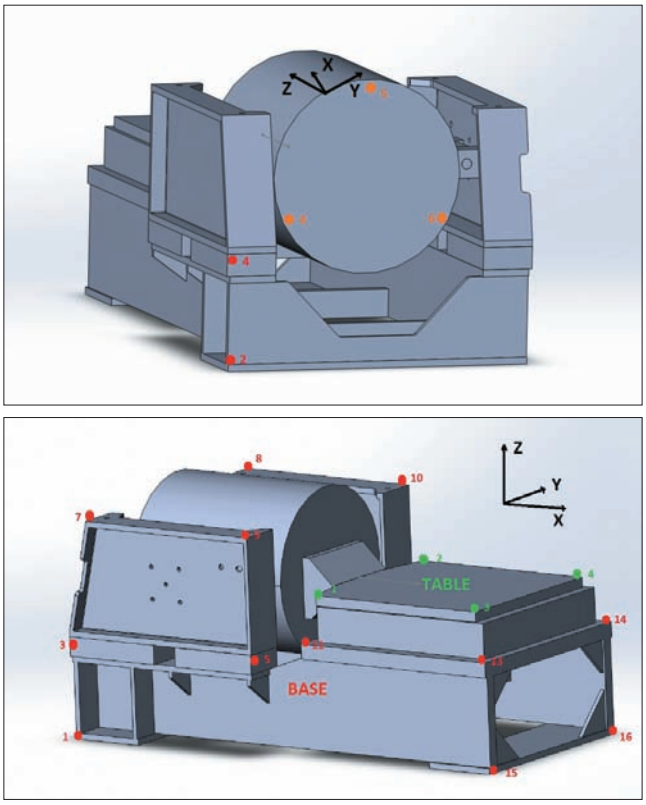
– Не секрет, что приобрести дорогостоящее ПО и оборудование, но не овладеть в полной мере методикой работы с ним – это крайне опрометчивый шаг. Как было в вашем случае?

– Когда принималось решение о приобретении комплекса оборудования и ПО *LMS*, мы обдумывали и эту задачу. Мы понимали, что получаем мощный инструмент, но просто факта обладания передовым оборудованием и ПО нам показалось недостаточным. Нам нужно было научиться пользоваться его богатыми возможностями. Не буду скрывать, что и оборудование, и ПО, о котором мы беседуем, очень дорогостоящие. Поэтому мы приобрели не только “железо” и софт, но и методику работы с ними – эта методика нарабатывалась в рамках проекта “**Виртуальный шейкер**”, реализованного совместно с *LMS*.

Это крайне важный момент. С целью обучения мы трижды ездили в Лёвен, на родину *LMS* – эти поездки позволили нам приобрести опыт применения технологий *LMS* в аэрокосмической отрасли. В результате этих визитов мы освоили модальный анализ, модули пакета *Test.Lab*, реализующие виброиспытания при синусоидальном, случайном и ударном воздействии, освоили базовые функции *LMS Virtual.Lab*. Сегодня уже ощущается необходимость в новом обучении – по созданию динамических моделей автомобиля и его подсистем на ранних стадиях проектирования, что связано с реализацией совместного проекта с ОАО “КАМАЗ”.

– Расскажите, пожалуйста, о проекте “Виртуальный шейкер”…

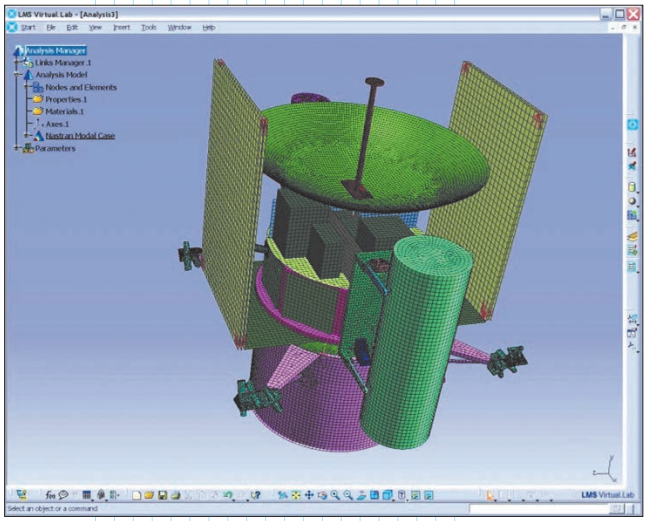
– Суть проекта “Виртуальный шейкер” заключалась в том, чтобы сначала создать верифицированные результатами натурных испытаний виртуальные модели изделия и вибростенда по отдельности, а затем провести виртуальные виброиспытания изделия (то есть его *3D*-модели) на виртуальной модели вибростенда. Весь проект осуществлялся совместно с *LMS*.



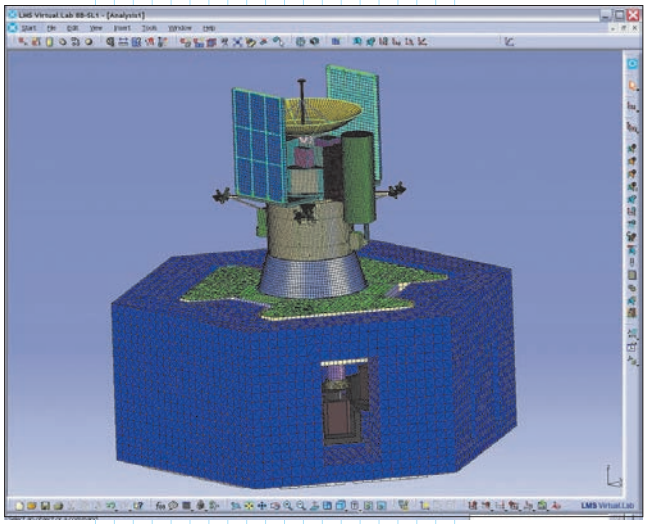
Точки крепления акселерометров на вибростенде для модальных испытаний

Виброиспытания изделия на стенде LDS V875HBT900 Combo

Виртуальную модель вибростенда мы делали самостоятельно. Для этого был выбран один из четырех имеющихся у нас стендов – вибростенд *LDS V875-HBT900Combo* – с горизонтальным скользящим столом. Наша задача состояла в том, чтобы правильно определить динамические характеристики стенда – его собственные частоты и формы. Для экспериментального определения собственных частот и форм вибростенда (массой 5 тонн) в 23-х измерительных точках стенда были наклеены акселерометры. В качестве средств возбуждения использованы большой ударный молоток *PCB* (весом 5 кг) и модальный вибростенд. В каждой точке измерены виброускорения в трех направлениях и экспериментально определены частотные передаточные функции. Далее с помощью алгоритма *PolyMax* идентифицированы собственные частоты и формы стенда. Кроме того, в пакете *LMS Amesim Imagine.Lab* построена его электрическая схема.



Конечно-элементная модель спутника (LMS Virtual.Lab)



Связанная модель "спутник – оснастка – вибростенд" (КЭ-модель спутника, оснастки и стенда – LMS Virtual.Lab, электромеханическая модель стенда – LMS Amesim Imagine.Lab)

Чтобы воочию увидеть оборудование *LMS* в действии, мы вместе со специалистами *LMS* ездили в ознакомительную командировку в Голландию – в Европейский космический технологический инженерный центр Европейского космического агентства. Особенно мне запомнилась абсолютная стерильность помещений и люди в белых халатах. ☺ Фотосъемка была запрещена. Там мы увидели большие вибростенды в действии, увидели отдельную виброплощадку, под которой в разных направлениях было установлено восемь 6-тонных вибростендов, что позволяло реализовывать вибровозбуждение испытуемого изделия по всем шести степеням свободы. Меня поразило, что руководителем группы, проводившей испытания, оказался сравнительно молодой человек, не старше 30-ти лет, который сопровождал нас и с горящими глазами рассказывал об этом оборудовании. Было видно, что он очень увлечен своей работой, и что весь инженерный проект делается на очень высоком уровне.

– Какая проблема или идея послужила толчком для осознания потребности в симуляции виброиспытаний на виртуальном стенде?

– Как я уже упоминал, мы понимали, что недостаточно обладать испытательным оборудованием и ПО *LMS* – **мы хотели получить методику, которая и была наработана в рамках выполнения проекта "Виртуальный шейкер"**. Тот факт, что Южно-Уральский государственный университет расположен вблизи "Государственного ракетного центра имени академика В.П. Макеева", где такие испытания можно реализовать, определил выбор типа проекта. Посоветовавшись

Испытания спутника с помощью связки из двух 16-тонных вибростендов на площадке Европейского космического технологического центра в Голландии

со специалистами “Новатест” и *LMS*, мы решились воплотить в жизнь идею “Виртуального шейкера”. Как выяснилось позже, это требует наличия всего комплекса продуктов *LMS*: необходимы измерительная система с датчиками, система управления виброиспытаниями *LMS Test.Lab*, а также системы моделирования *LMS Virtual.Lab* и *LMS Imagine.Lab Amesim*.

Работа по проекту “Виртуальный шейкер” началась с экспериментальной части, реализованной на площадке и оборудовании вуза. Расчетную часть компания *LMS* проводила позже у себя в Бельгии. К нам в университет приехали два иностранных специалиста из *LMS*. В течение трех недель на нашем оборудовании, вместе с ними и под их руководством, мы проводили модальные испытания. Благодаря тому, что эксперимент проводился совместно, на базе вуза и нашем оборудовании, мы освоили технологию модального анализа и получили практический опыт по экспериментальному определению собственных частот и форм конструкций. Обучение ведь тогда идет эффективно, когда есть реальная задача, которую необходимо решить. Когда специалистов *LMS* называют “людьми в белых халатах”, это верно. ☺ В оборудовании и ПО *LMS* достаточно много тонких настроек.

Когда речь заходит об испытании ответственных изделий, где требуется высокая квалификация и тонкие настройки, – тут уже заложенные в *LMS* возможности переоценить трудно. С этими возможностями нам удалось познакомиться во время “домашних” испытаний. По рекомендации *LMS*, для эксперимента мы выбрали несложное изделие, которое обладало набором из 15-ти собственных частот в диапазоне до 120 герц. Самостоятельно изготовили из стали достаточно простую сварную конструкцию, сделали расчеты и убедились в том, что требуемый диапазон частот обеспечивается. Этот простой макет, который легко считался методом конечных элементов, был необходим именно для отработки методики работы с ПО и оборудованием.

– В чём заключается новизна подхода в этом проекте?

– **Наша методика предназначена для проведения виброиспытаний ответственных и очень дорогостоящих конструкций, где физические испытания стóят дорого, поскольку дорого обходится поломка испытуемого изделия**. Взять, например, спутник. Перед непосредственным выводом на орбиту спутник должен пройти квалификационные испытания на вибростенде. При этом его нельзя сломать, так как это уникальное изделие, существующее в единственном экземпляре.

Как мне кажется, главный вывод из нашей совместной работы с *LMS* заключается в том, что мы получили понимание, как эту методику применять дальше на сложных изделиях, какой должна быть последовательность шагов и операций.

Мне неизвестно, кто является идейным автором представленной в проекте “Виртуальный шейкер” методики, но уверен, что **для России – это абсолютно новый современный и инновационный подход к моделированию и испытаниям**. По моим сведениям, в России его пока никто не использует. Мне кажется, что и для меня, как инженера и ученого, и для университета, и для предприятия было бы весьма интересно применить методику “Виртуальный шейкер” в реальных условиях. Считаю, что те технологии, которыми сейчас обладает наш университет, должны работать на благо нашей промышленности и использоваться при создании перспективных конструкций и элементов аэрокосмической и автомобильной отраслей.

– Вы упомянули, что первый этап финансирования программы для вашего НОЦ завершился в 2014 году. Как вы будете действовать сейчас, когда появляется потребность в новых модулях программных продуктов Siemens, в дополнительном обучении?

– Мы будем обосновывать целесообразность приобретения новых модулей в рамках проектов, где они будут применяться. А решение принимает руководство вуза на основе решения НТС. К примеру,

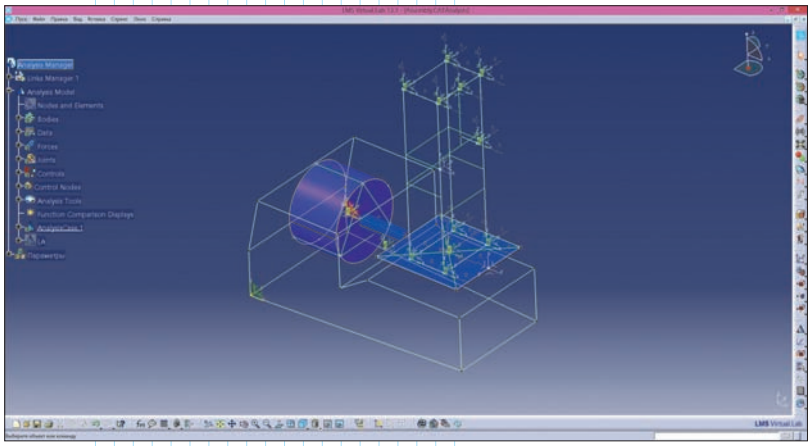
Команда проекта “Virtual Shaker”: LMS/Siemens (Лёвен, Бельгия) – LMS Russia – ЮУрГУ

в настоящее время в проекте с ОАО “КАМАЗ” мы разрабатываем новую модель трансмиссии в пакете *LMS Amesim Imagine.Lab*, поэтому ощущаем необходимость повышения квалификации в области создания *1D*-моделей автомобилей и их подсистем. Но не это самое главное. Главное – с появлением комплексных проектов в вузе появились точки роста. Для выполнения проектов мы привлекли молодых специалистов – студентов и аспирантов. Когда они освоятся и пройдут обучение, у нас начнет формироваться компетенция: сначала – просто умение работать с ПО, потом – больше.

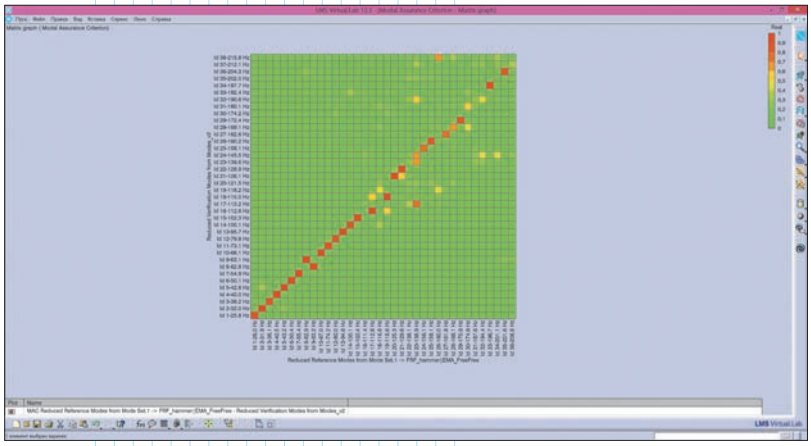
С каждым днем я убеждаюсь в том, что решения *LMS* – это не просто системы для создания автомобиля или датчики с измерительными системами, это нечто гораздо большее. Сейчас наша задача состоит в том, чтобы грамотно организовать работу коллектива, который выполняет проекты совместно с предприятиями. Идеальными сотрудниками для таких проектов я считаю наших аспирантов: они освобождены от занятий, пишут кандидатскую диссертацию и работают над проектом, получая заработную плату, а над ними есть научный руководитель. Предприятие же получает новые технологии, позволяющие на порядок ускорить вывод нового изделия на рынок. Наличие комплекса решений *LMS* позволяет выстроить в вузе условную пирамиду “студенты – аспиранты – кандидаты и доктора наук”, плюс обеспечить выполнение высокотехнологичных проектов для отечественной промышленности на высоком инженерном и научном уровне.

– После приобретения продуктов LMS компания Siemens PLM Software стала единственным из поставщиков PLM-решений, кто обладает полным набором программных инструментов, который включает возможность натурных исследований прототипов. Как появление семейства продуктов LMS изменило жизненный цикл разработки изделия, какие новые возможности открываются перед инженером-конструктором?

– На этот вопрос легче ответить, используя в качестве примера наш проект с ОАО “КАМАЗ”. **Целью проекта является создание автомобиля 6×6 с новой, полностью дифференциальной, трансмиссией**. В современных грузовых автомобилях блокировка дифференциалов возможна, но только тогда, когда машина стоит на месте. В нашем же случае поставлена задача сделать так, чтобы блокировку дифференциалов можно было осуществлять на ходу. Я не представляю, как эту задачу вообще можно решить без соответствующих программных средств моделирования.



Расчетная динамическая модель “изделие – вибростенд” (LMS Virtual.Lab)



MAC-матрица. Проверка совпадения расчетных и экспериментальных собственных форм изделия, закрепленного на вибростенде (LMS Virtual.Lab)

Мы строим виртуальную модель автомобиля и выполняем серию тестовых расчетов – виртуальных ходовых испытаний. Причем, подчеркну, на этом этапе у нас нет практически ничего. Я имею в виду не только конструкторскую документацию на новый автомобиль – нет даже *3D*-модели. Есть только идея, эскиз и перечень проектных параметров. И уже на этом этапе, еще до начала разработки трехмерных моделей, мы уже можем получить сведения о допустимой разнице угловых скоростей полумуфт, определить последовательность включения блокировок, проверить различные скоростные режимы, прокатить автомобиль с новой трансмиссией по виртуальному полигону. На основании этой серии расчетов мы получаем нагрузки, которые присутствуют в элементах трансмиссии. Далее эти нагрузки передаются в расчетный модуль, где осуществляется КЭ-расчет на прочность двух зубьев, которые входят в зацепление. На основании этих расчетов по допускаемым напряжениям мы должны выдать требования по разнице угловых скоростей двух элементов, которые блокируются.

Следующий шаг – реализация управления приводом, который будет выполнять смыкание полумуфт. Без средств моделирования осуществить это невозможно!

Модель получается комплексная, она охватывает как вопросы прочности, так и системы управления и пневматики. В этом проекте мы используем связку ***Matlab Simulink*** и ***LMS Imagine.Lab Amesim***.

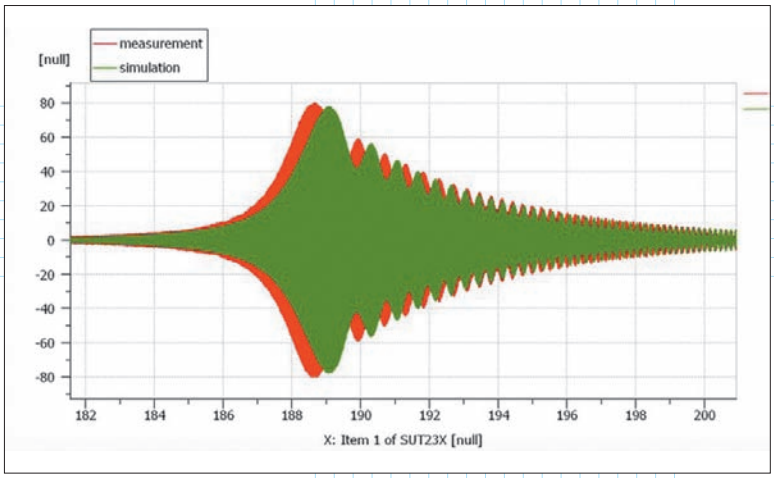
Итогом наших испытаний моделей и виртуальных тестов является информация, которую мы передаем конструкторам еще до того, как они начали разрабатывать *3D*-модель! Чувствуете эффективность подхода?!

– Конечно-элементные модели позволяют изучать поведение изделий в различных условиях без изготовления прототипов. Однако любое численное исследование требует верификации на основе результатов натурных экспериментов. Каким образом результаты измерений на стендах с применением пакетов от LMS используются для настройки ваших КЭ-моделей?

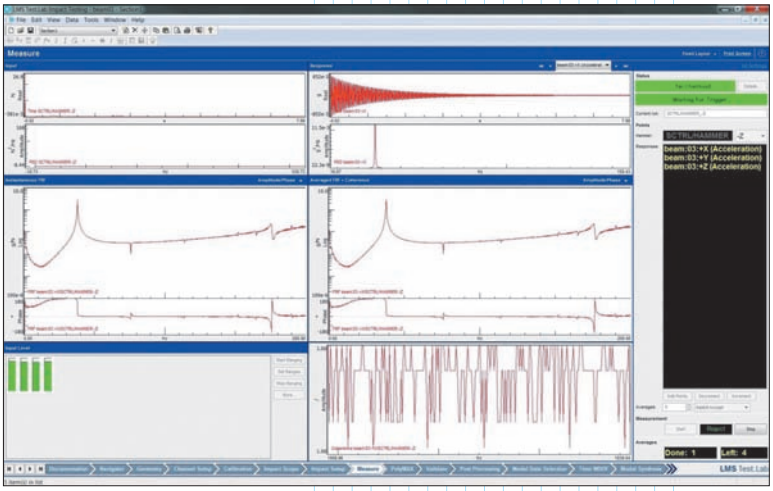
– В первую очередь, виртуальные испытания проводят перед квалификационными испытаниями ответственного изделия. **Методики и подходы *LMS* во главу угла ставят эксперимент**. Квалификация специалистов, которые его проводят, должна быть достаточно высокой. Она служит гарантией того, что характеристики изделия, полученные экспериментальным путем, найдены правильно.

Сначала на *3D*-модели изделия делают *пре-тест*, в котором указывают требуемый частотный диапазон. Далее программа подсказывает оптимальное количество и места расположения датчиков/акселерометров на реальном изделии, с помощью которых можно надежно определить собственные частоты и формы изделия при проведении натурного эксперимента. Потом изделие изготавливают. Для получения динамических характеристик на нём устанавливают датчики, обеспечивают условия закрепления. Специалисты, занимающиеся виброиспытаниями изделий аэрокосмической техники, знают о том, что собственные частоты колебаний твердого тела на подвеске должны быть примерно в 10 раз ниже, чем собственные частоты колебаний, на которых изделие начинает деформироваться. Поэтому подбирать подвеску следует корректно – её жесткость и точки крепления к изделию определяются экспериментальным путем на основе предварительных расчетов.

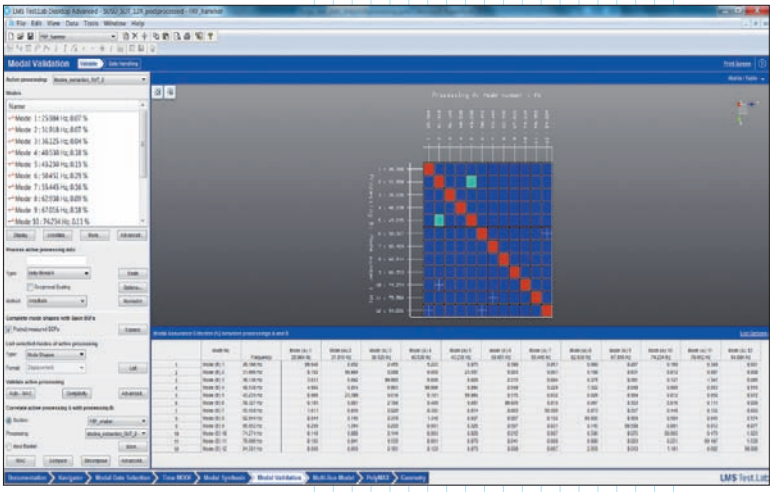
Когда у нас на руках оказываются данные и расчета, и эксперимента на реальном изделии, начинается самое интересное. Результаты эксперимента загружают в ту же программную оболочку, где хранятся результаты расчета. **Смысл этой операции – построить на компьютере модель**



Виброускорения на изделии при виртуальных и натурных виброиспытаниях (LMS Amesim Imagine.Lab)

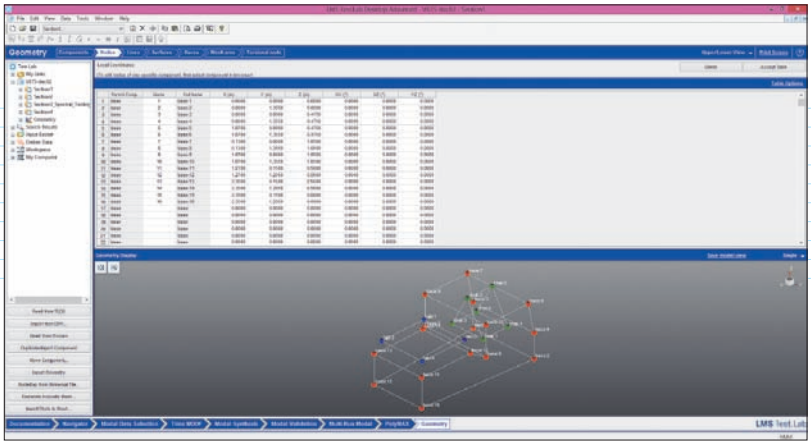


Экспериментальное определение собственных частот и форм изделия с помощью ударного молотка и модуля Impact Testing (LMS Test.Lab)

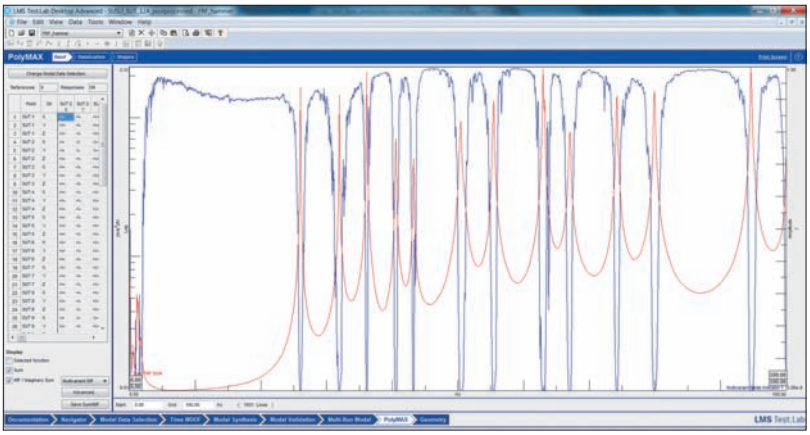


MAC-матрица. Проверка совпадения экспериментальных собственных форм вывешенного изделия, найденных с применением модального вибростенда и ударного молотка (LMS Test.Lab)

изделия, собственные частоты и формы которой по определенным критериям близки к результатам эксперимента. Можно назвать эту операцию “подгонкой”, но мне удобнее называть её настройкой: мы настраиваем конечно-элементную модель по результатам испытаний. Опыт показывает, что эта операция необходима; если просто создать *3D*-модель и выполнить расчет её собственных частот и форм, то этого часто оказывается недостаточно. В соответствии с нашей методикой, мы получаем КЭ-модель объекта испытаний, подтвержденную результатами экспериментального определения его собственных частот и форм. Когда мы проводим такие испытания строго по нашей методике, сломать дорогостоящее изделие практически невозможно.



“Проволочная” геометрическая модель вибростенда (LMS Test.Lab). Каждый узел модели соответствует акселерометру, установленному на реальном вибростенде



Алгоритм Polymax идентификации собственных частот и форм изделия (LMS Test.Lab)

После завершения этого этапа операция построения конечно-элементной модели по результатам натурных модальных испытаний повторяется для вибростенда. Таким образом, мы получаем так называемые модальные модели изделия и стенда по отдельности. И та, и другая модели подтверждены результатами испытаний и представляют собой, по существу, набор экспериментальных частотных передаточных функций, полностью характеризующих собственные частоты, формы и декременты колебаний.

Далее мы ставим модальную модель изделия на модальную модель вибростенда. Естественно, что мы получаем новую, объединенную, модель со своими собственными частотами и формами. Реальный же объект (стенд + изделие) мы снова обклеиваем датчиками и заново проводим натурные модальные испытания уже на объединенной системе. Сравнивая собственные частоты изделия на стенде, полученные на компьютере, и собственные частоты и формы изделия, найденные экспериментальным путем, мы можем оценить жесткость соединения изделия с вибростолом и учесть её в расчетной модели. Таким образом, **последовательно, на каждом этапе мы строим компьютерные модели (только изделия, только вибростенда, затем изделия на вибростенде) и каждый раз подтверждаем их результатами реальных модальных испытаний**. Такая последовательность позволяет очень аккуратно построить на компьютере довольно сложную связанную модель “изделие-вибростенд”.

Подчеркну еще раз: для такой работы **требуется иметь весь комплекс оборудования и ПО *LMS*** – измерительную систему *LMS SCADAS* с датчиками, систему управления виброиспытаниями *LMS Test.Lab*, системы *LMS Virtual.Lab* и *LMS Imagine.Lab Amesim*. Если какого-то из компонентов не хватает, то эту методику реализовать невозможно.

– В настоящее время применение численного моделирования на основе КЭ-моделей уже можно рассматривать как неотъемлемый этап каждодневной работы конструктора. Для сокращения сроков проектирования многовариантные расчеты проводятся уже на ранней стадии, зачастую вызывая радикальную переработку конструкции, то есть имеет место достаточно тесная обратная связь. Как и на каком этапе натурные испытания изделия на стендах влияют на процесс проектирования? Как осуществляется взаимодействие стендистов с инженерами-конструкторами и инженерами-расчетчиками?

– Для проведения виброиспытаний (и виртуальных, и натурных) необходим опытный образец изделия. Далее на опытном образце мы проводим модальные испытания в условиях свободного вывешивания и передаем результаты испытаний расчетной группе, которая осуществляет коррекцию конечно-элементной модели изделия. Эта же задача повторяется при закреплении изделия на вибростенде.

– Какие продукты LMS/Siemens используются для подготовки расчетной модели испытуемого изделия?

– Для подготовки расчетной модели испытуемого изделия можно использовать *MSC Nastran* и *ANSYS*. На мой взгляд, более удобным инструментом для экспорта результатов расчетного модального анализа в *LMS Virtual.Lab* является *MSC Nastran*. Дальнейшая работа с моделью изделия осуществляется с применением *LMS Virtual.Lab*.

– Какие возможности имеются у вас для подготовки системной модели вибростенда и учета параметров, могущих влиять на динамическое поведение испытуемых изделий?

– При подготовке модели вибростенда используется связка *LMS Test.Lab + LMS Virtual.Lab,* что необходимо для построения модальной модели стенда – то есть динамической модели в виде набора собственных частот, форм и декрементов колебаний. Пакет *LMS Amesim Imagine.Lab* применяется для построения электромеханической модели стенда. Связка *LMS Amesim Imagine.Lab + LMS Virtual.Lab* служит для построения гибридной модели стенда и управления виртуальными виброиспытаниями.

– Как осуществляется валидация расчетной модели изделия и системной модели вибростенда?

– Валидация расчетной модели изделия осуществляется по *MAC*-критерию (*Modal Assurance Criterion*). То есть, собственные частоты и формы расчетной модели изделия должны быть близки к собственным частотам и формам изделия, найденным экспериментальным путем.

Что же касается модели изделия на стенде, то валидация осуществлялась путем сопоставления передаточных функций – отличие между передаточными функциями модели изделие-стенд в эксперименте и в расчетной модели должно быть минимальным.

– Как создается контроллер виртуального вибростенда, какие имеются инструменты для описания алгоритмов работы стенда?

– Виртуальный контроллер передан нам компанией *LMS* в виде “черного ящика”. Он позволяет проводить виртуальные виброиспытания при синусоидальном возбуждении. У этого “черного ящика” есть ряд параметров, аналогичных параметрам программы *Sine Control* (частотный диапазон, скорость развертки и т.д.), есть несколько входных измерительных каналов, к которым подсоединяются виртуальные акселерометры, а также несколько каналов, по которым осуществляется управление с обратной связью. Таким образом, внутреннее устройство контроллера нам неизвестно, но он соответствует реальному контроллеру, который используется в *LMS SCADAS*.

Сертификационные испытания кресла оператора промышленного трактора

– Как передается отработанная на виртуальном стенде технология тестирования и параметры управления виртуальным стендом на физический вибростенд?

– За рубежом общепринятым становится следующий подход. Строят имитационную модель и проводят виртуальные испытания изделия при существенно меньших нагрузках, чем требуется. Затем эти же испытания при таких же нагрузках воспроизводят на реальном вибростенде – и таким образом подтверждают правильность расчетной модели. Полномасштабные же виброиспытания изделия на реальном стенде не проводят, а выполняют виртуально.

– Какие проблемы, из числа могущих иметь место при физических виброиспытаниях на стенде, удалось решить (или избежать) при виртуальных испытаниях?

– Во-первых, удается исключить случайный фактор – когда вдруг, по каким-то причинам, виброиспытания пошли не так, как планируется, что привело к недопустимым виброускорениям и поломке изделия.

Во-вторых, при установке на реальный вибростенд изделий, сравнимых по массе с массой стенда, мы получаем новую связанную систему “изделие-вибростенд”, динамические характеристики которой неизвестны, а значит при реальных виброиспытаниях она может повести себя непредсказуемо.

В-третьих, исключается человеческий фактор и ошибки, которые при виброиспытаниях может допустить оператор, управляющий вибростендом.

– Какие отрасли в первую очередь нуждаются в имитационном воспроизведении вибрационных испытаний на виртуальном стенде?

– В первую очередь, это авиационная, аэрокосмическая и автомобилестроительная отрасли. Главный вопрос – зачем это нужно предприятиям. **Выгода методики в том, что их ценное изделие не сломается до проведения квалификационных испытаний**. Во-первых, на этапе проектирования инженеры не всегда предвидят, где будет “ахиллесова пята” изделия. Во-вторых, в случаях, когда вибростенд и изделие при виброиспытаниях начинают оказывать влияние друг на друга, предсказать (без имитационных виброиспытаний), в какой точке

изделия будут возникать максимальные виброускорения при натурных испытаниях, становится попросту невозможно. У нас есть возможность расставить датчики в любых местах модели. В рамках виртуального эксперимента мы можем выяснить, где именно возникают недопустимые виброускорения. Зная это, мы размещаем в этом же месте датчик на реальном изделии, и, благодаря системе управления *LMS*, при физических виброиспытаниях ограничиваем в опасной точке уровень виброускорений заранее заданной величиной.

Когда идут испытания больши́х конструкций, сопоставимых по весу с вибростендом, то в рамках эксперимента мы получаем связанную систему "изделие-вибростенд", составные части которой могут оказывать взаимное влияние друг на друга. **Если не использовать нашу методику, то предусмотреть такой аспект – динамику связанной системы – до проведения виброиспытаний просто невозможно**. На самом крупном нашем вибростенде можно испытывать изделия весом до двух тонн. В Европейском космическом технологическом центре действует связка из двух больши́х вибростендов, каждый из которых обладает максимальным толкающим усилием 16 тонн. Вот они уже предназначены для испытаний реальных космических аппаратов, в том числе и спутников.

– Один из центров, созданных параллельно с НОЦ "Экспериментальная механика", специализируется на суперкомпьютерной тематике. Используете ли вы его возможности при проведении своих расчетов?

– Да, мы используем суперкомпьютер для прочностных расчетов каркаса кузова нового низкопольного трамвайного вагона.

– Как осуществляется обмен данными с партнерами по разработке изделий? Какие наборы программных инструментов используются вашими партнерами? Совпадают ли они с вашими?

– В рамках возможностей по Постановлению №218 и ФЦП "Исследования и разработки" наш вуз сотрудничает с такими предприятиями, как АО "Уралтрансмаш", ОАО СКБ "Турбина" и ОАО "КАМАЗ". Проектированием изделий и обменом данными пока занимаются другие группы/центры вуза, на нас эти обязанности пока не возложены. А вот все механические испытания по этим проектам выполняем мы.

В нашей практике уже было несколько наглядных примеров, подтверждающих, что далеко не всё можно корректно посчитать без проведения эксперимента. Например, в микротурбинной установке есть вал стартер-генератора. Он представляет из себя металлическую часть, на которую насажены магниты, обмотанные сверху углелентой. Перед нами стояла задача оценки двух низших собственных частот этого вала расчетным и экспериментальным путем. **Когда мы сравнили результаты компьютерного расчета с результатом испытаний, то выявилось отличие по первой изгибной собственной частоте на 30%!** Выполнить конечно-элементный расчет такой конструкции довольно сложно, поскольку в ней использован углепластик с пропиткой, магниты, неизвестны условия сопряжения магнитов и вала. В подобных случаях дать реальную картину может только эксперимент. Без информации, полученной экспериментальным путем, при проектировании ротора были бы заложены неверные параметры.

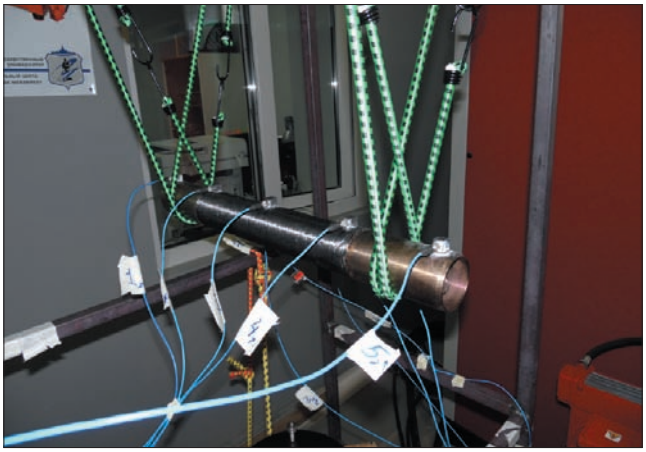
Второй случай. С помощью лазерного трехкомпонентного виброметра, подключенного к измерительной системе *LMS*, экспериментальным путем мы определяли собственные частоты лопаток колеса компрессора. По требованию конструкторов эти частоты должны были быть больше шести килогерц, но, проведя эксперимент, мы установили, что они расположены в недопустимом диапазоне. На основании результатов испытаний конструкция колеса компрессора была доработана.

Всё это – примеры того, что расчет порою не дает корректной картины, и необходимо провести эксперимент. Но для этого необходимо обладать компетенцией, оборудованием и методикой. В этом состоит **главное предназначение нашего Центра – осуществлять экспериментальную поддержку при разработке предприятиями сложных изделий**.

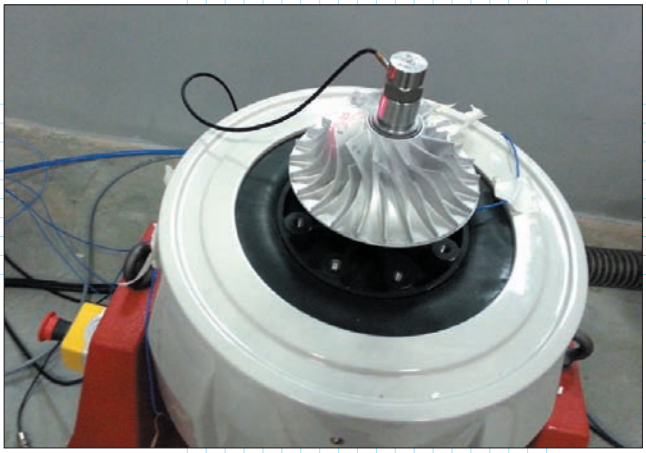
При выборе оборудования для себя мы исходили в первую очередь из того, чтобы оно было передовым. Ряд выполненных экспериментов показал, что на базе аппаратно-программного комплекса, которым мы обладаем, можно выполнять крупные проекты совместно с предприятиями.

– В чём, на Ваш взгляд, заключается уникальность проделанной вами работы?

– Мы первыми в России отработали методику виртуальных виброиспытаний. Близость результатов натурного эксперимента (то есть испытания изделия на вибростенде при синусоидальном возбуждении с разверткой по частоте) и эксперимента виртуального (то есть виброиспытаний трехмерной модели "изделие-вибростенд-система управления") подтвердила правильность этой модели. В расчетной модели



Экспериментальное определение собственных частот и форм вала стартер-генератора микротурбинной установки



Экспериментальное определение собственных частот лопаток колеса компрессора

удалось объединить модальную модель вибростенда (представляющую из себя по существу набор экспериментально найденных частотных передаточных функций), конечно-элементную модель изделия, электромеханическую схему вибростенда и модель контроллера, управляющего виброиспытаниями. При этом каждая из подсистем была еще и верифицирована результатами натурных испытаний. Всё это в сумме резко повышает достоверность построения расчетных моделей для предсказания виброотклика при проведении натурных испытаний.

– Каковы перспективы развития этого направления работ для вуза, и чем это привлекает Вас лично?

– Мне видится развитие того, что мы начали, в двух направлениях. Во-первых, Южно-Уральскому государственному университету будет приносить ощутимую пользу выполнение совместных с промышленными предприятиями проектов – в том числе и в финансовом плане. Во-вторых, для меня лично, как инженера, эта тема очень интересна, и мне хотелось бы принести пользу нашей промышленности. В-третьих, эта тема нам интересна еще и с научной точки зрения. Её развитие дает возможность выращивать компетентные кадры, владеющие современными технологиями, готовить научные публикации по данной тематике, выстраивать вертикаль от студента до доктора наук, о которой я уже говорил. Не исключаю, что моя докторская работа тоже будет касаться этой тематики. Я уже не представляю своей жизни и работы без передовых технологий *Siemens* и *LMS* – там достаточно много новых, сложных и интересных возможностей по виброиспытаниям и моделированию, в которых очень хочется разобраться…

– Чем ваш подход будет выгоден для российских предприятий?

– С одной стороны, наша методика позволяет отчасти заменить натурные испытания виртуальными. Но, опять же, мы наталкиваемся на противоречие в нашем российском (фактически советском) подходе к проектированию изделия. Как мы знаем, главные этапы проектирования – это техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка КД и приемочные испытания, которые осуществляют на опытном образце изделия. Когда речь идет о спутниках или военной технике, мы не сможем убедить приемочную комиссию в том, что если на компьютерной модели проблем не выявлено, то и с реальным образцом всё будет в порядке. Если удастся изменить утвержденную ГОСТами систему и порядок проектирования изделий, то нашу методику можно применять смело.

На тематических конференциях я слышу, как сотрудники известных в России КБ и предприятий сетуют на то, с каким трудом продвигается внедрение новых подходов в процесс создания изделия. Да, **мы предлагаем новый и совсем другой подход к симуляции и испытаниям – на наш взгляд, он более эффективен, чем применяемые сегодня методики**.

Совершенно очевидно, что всем нам следует идти в этом направлении, перенимать зарубежный опыт. И дело постепенно движется. Как сказал великий Конфуций, даже путь в тысячу ли начинается с первого шага. Тем предприятиям, которые будут заинтересованы в применении данной методики, необходимо понимать, что работа в рамках предлагаемого нами подхода предстоит сложная и кропотливая. Я вижу эту работу только как совместную, когда наши знания объединятся с предметными знаниями специалистов предприятий, участвующих в разработке изделия.

Для того чтобы начать работу в данном ключе, мы предлагаем предприятиям воспользоваться возможностями, предоставленными государством в рамках 218-го постановления. Когда мы готовим подобный проект и расписываем все его стадии в течение отведенных двух с половиной лет, мы можем предусмотреть и заложить в проект все необходимые виртуальные и натурные испытания. Предприятию, по условиям финансирования этой программы, это будет выгодно.

– Благодарю Вас, Павел Александрович, за беседу и желаю достичь всех поставленных целей!

Сочи, 22 апреля 2015 г.