

Влияние генеративного проектирования на разработку изделий

Возможности генеративного проектирования на платформе PLM меняют способы создания инновационной продукции

Keith Meintjes, Ph.D. (CIMdata), Ted Blacker, Ph.D. (Sandia National Labs)

©2018 CIMdata, Inc.



Dr. Keith Meintjes – ответственный консультант в компании *CIMdata*; ранее вел направление исследований, касавшихся ПО для инженерного анализа. До этого он отработал 29 лет в корпорации *General Motors*, где был главным пользователем решения *OptiStruct* компании *Altair Engineering* и занимал ряд руководящих должностей, в том числе управлял глобальной стратегией *GM* в отношении высокопроизводительных вычислений, руководил группой инженерного анализа в подразделении *GM Powertrain*, занимался разработкой ПО вычислительной гидродинамики (*CFD*) для продукции подразделения. Защитил докторскую диссертацию в Принстонском университете (шт. Нью-Джерси) по *CFD*-симуляции горящих потоков жидкости, а также получил степень бакалавра и магистра в Университете Витватерсранда (ЮАР).



Dr. Ted Blacker руководит департаментом *Simulation Modeling Sciences* лаборатории *Sandia National Laboratories* в Нью-Мексико, где он проработал 28 лет. Его департамент исследует методы проектирования, ориентированные на аддитивное производство (*AM*), и внедряет их в проекте *PLATO*, поддерживает разработку ПО геометрической декомпозиции и генерации сеток (проект *CUBIT*). Кроме того, д-р *Blacker* ведет “круглый стол” *Sandia* по оптимизации топологии. Ранее он был руководителем программы разработки коммерческих *CFD*-приложений в компании *Fluent*, которая с 2006 года является частью *ANSYS*. Докторскую диссертацию по теоретической и прикладной механике защитил в Северо-Западном университете (*Northwestern University*) в пригороде Чикаго (шт. Иллинойс).

Долгие годы технологии генеративного проектирования (*Generative Design*) и аддитивного производства (*Additive Manufacturing, AM*) созрели в отделах исследований и разработок (*R&D*), и теперь начинается эпоха широкого применения. С их помощью конструкторы зачастую создают поразительные новые продукты. Однако промышленность только-только начала объединять эти инновационные технологии, чтобы получить полный набор преимуществ. По мере конвергенции, синергетический эффект от их совместного использования будет проявляться неожиданными и даже потрясающими способами.

Введение

Средства генеративного (порождающего) проектирования – это набор инструментов, позволяющих создавать или модифицировать конструкцию, отталкиваясь от функциональных требований и конструкторских ограничений. Один из ключевых инструментов, поддерживающих генеративное проектирование, обеспечивает оптимизацию топологии (*TopOpt*). Команды исследователей из лаборатории *Sandia* под руководством д-ра *Ted Blacker* стремятся сделать эти инновационные инструменты используемыми на практике. Их цель – преобразовать *TopOpt* из интригующей концепции в то, что в лаборатории называют “серийными производственными” инструментами.

Обе эти технологии – аддитивного производства и генеративного проектирования – постепенно находят применение во всё новых областях. Большая часть нынешней суматохи относится к способу, которым *TopOpt* генерирует лучшие варианты конструкций, изготовить которые можно если не обычными методами, то аддитивными. Эта тема рассматривалась на вебинаре *CIMdata*, и запись доступна на странице www.cimdata.com/en/education/educational-zebinars/generative-design-the-changing-nature-of-product-development.

Сандийские лаборатории (*Sandia National Laboratories*) исследуют возможности продвинутых инструментов *TopOpt* в рамках проекта *Plato*. Чтобы сразу проектировать пригодные для печати детали, оптимизация топологии в этих работах гораздо сильнее связана с физическими свойствами, для чего используются преимущества новых архитектур центральных процессоров. Мы призываем разработчиков изделий к изучению наработок *Sandia* (www.sandia.gov/plato3d) и компании *CIMdata* (www.cimdata.com/en/resources/cimdata-blog) по средствам генеративного проектирования и *TopOpt*.

С учетом двух долгоиграющих процессов трансформации, сближение технологий генеративного проектирования и *AM* является следующим логичным шагом навстречу. Этими процессами являются:

- дигитализация, касающаяся информации предприятия (например, мастер-данных) и

большинства его активов (таких, как интеллектуальная собственность);

- платформизация практически всех корпоративных наборов программных инструментов.

Третья составляющая трансформирующей конвергенции – создание прогрессивных материалов, многие из которых являются совсем новыми, причем появляются они почти ежедневно. Визуальное представление взаимодействия эти трех областей дает рис. 1.

Конвергенция трех областей – генеративно-проектирования, аддитивного производства и создания новейших материалов – обеспечивает возможность проектирования и изготовления революционных изделий, которые не могли бы быть произведены еще несколько лет тому назад, что означает существенное изменение процессов создания инновационных продуктов.

Каждая из этих технологий служит для своих целей, но каждая область перекрывается со всеми остальными. Как показано на иллюстрации, в зонах 1, 2 и 3 возможности проектирования усиливаются за счет совместного использования генеративного дизайна и современных материалов, аддитивного производства и современных материалов, генеративного дизайна и АМ. Самая привлекательная часть диаграммы – зона 4, где пересекаются все три технологии.

Большой помощью станет организация взаимодействия этих технологий на одной платформе, что возможно в случае применения средств управления жизненным циклом изделий (*Product Lifecycle Management, PLM*); эта бизнес-стратегия

позволяет охватить деятельность сотрудников, рабочие процессы и технологии.

Функционал *PLM* жизненно необходим и для управления проектами, жизненными циклами продуктов и их компонентов, создаваемых с помощью средств генеративного проектирования, *TopOpt* и аддитивного производства – точно так же, как это делается для традиционно проектируемых изделий. Этому требуется уделять серьезное внимание, так как используются совершенно новые среды разработки изделий. Другими словами, мы находимся в неизведанных водах, где потенциал АМ, генеративного проектирования и *TopOpt* может, наконец, начать использоваться для генерации инновационных высокоценных изделий, ранее невозможных. Как результат, конструкторы вынуждены спешно менять подходы к решению своих задач.

Процесс конвергенции уже начался

После начального всплеска интереса в 1990-х, сфера генеративного проектирования и оптимизации топологии стагнировала почти 20 лет. Ранние версии программ были сложны для использования и генерировали такие конструкции, которые невозможно было изготовить на доступных тогда фрезерных и токарных станках. Из-за малой практической пользы для традиционного производства, интерес к ним пропал и со стороны ученых, и со стороны разработчиков ПО. Однако сейчас исследования вопросов генеративного проектирования возродилось в университетской среде, где инженеры начинают свои карьеры.

Генеративное проектирование и оптимизация топологии быстро выходят на передний край инициатив по созданию новых конструкций.

Сегодня всё меняется быстро. Конвергенция генеративного проектирования, *TopOpt* и АМ трансформирует способы использования ресурсов при разработке изделий, но многие инструменты и способы мышления всё еще отстают. Отслеживание такого большого количества элементов происходящей трансформации и контроль за ними – всё это может выходить за пределы возможностей тех средств управления данными об изделии (*PDM*), которые использовались десятилетиями.

Эта трансформация делает наличие объединяющей платформы решающим условием для успешного применения генеративного дизайна, *TopOpt* и АМ. Провайдеры *PLM*-решений уверяют нас, что они привержены идее создания платформ, которые смогут поддерживать вышеупомянутую конвергенцию.

Наличие множества технологий означает новые возможности. Эти технологии размывают сложившуюся сегментацию рынка, требуют новых навыков и объединяют компетенции из различных областей. Хотя иногда это и разочаровывает, но это первые, жизненно важные шаги для понимания и принятия.

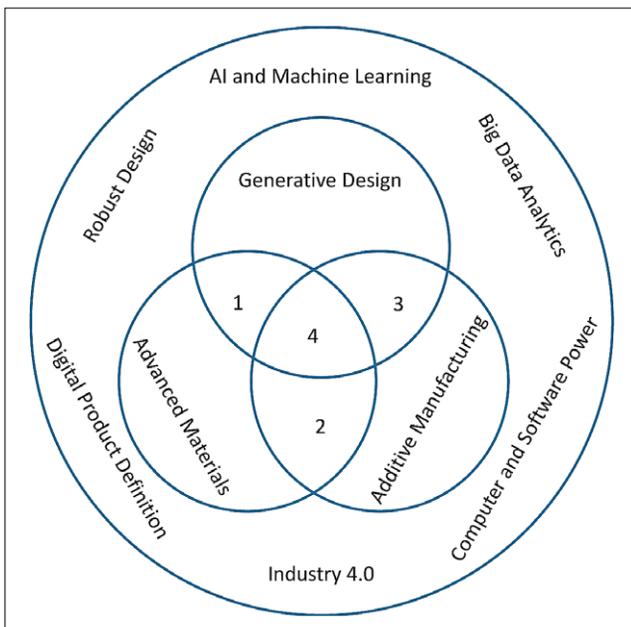


Рис. 1. Перекрывание и взаимодействие технологических доменов

Итак, мы полагаем, что способы создания инноваций будут радикально модернизированы вследствие конвергенции следующих трех технологий:

- генеративное проектирование;
- аддитивное производство (AM);
- создание новых материалов с необычными свойствами.

Генеративное проектирование

Генеративное проектирование подразумевает создание или модификацию конструкций деталей (геометрии, материалов) на основании требуемых характеристик (прочность, себестоимость, жесткость, масса, собственные частоты и т.д.), плюс такие параметры, как испытываемые нагрузки и центр тяжести. Инструменты генеративного проектирования позволяют сразу превратить требования прямо в практически возможный дизайн. Такие 3D-модели управляются текущими значениями эксплуатационных характеристик, а не историей построения и правилами, вытекающими из наложенных зависимостей и ограничений, как это было в прошлом.

Генеративное проектирование является двигателем, который обеспечивает нашу возможность создавать концепты революционных продуктов.

То, что конструкция стала определяться требованиями, а не историей построения, запустило переход от осуществляемого человеком (*human-driven*) проектирования к проектированию при помощи человека (*human-aided*). До этого каждый проект начинался с ревизии предыдущих наработок и последовательной подгонки подходящих конструкций под новые требования – на основании опыта и интуиции конструктора, методом проб и ошибок.

Генеративное проектирование переворачивает давно принятую CAD-парадигму: сначала создается какой-то вариант конструкции, затем он анализируется и оценивается. Переход к проектированию “при помощи человека” имеет большое значение для разработчиков изделий. Мы рассмотрим человеческий фактор ниже, в разделе “Организационные вопросы”.

На рис. 2 показано, как возможности генеративного проектирования и *TopOpt* были использованы при создании сельхозинструмента. С их помощью английский производитель сельскохозяйственной техники *AMAZONE Ltd.* (дочерняя компания немецкой *Amazonen-Werke*) смог преобразовать сложный сварной компонент подвески (слева) почвообрабатывающей машины в цельную отливку (справа); на иллюстрации видны диаграммы напряжений. Вес компонента был уменьшен на 8%, а срок службы увеличился в 2.5 раза. Устранение

процесса сварки и болтовых соединений резко сократило производственные издержки.

Одной из важных составляющих генеративного проектирования является топологическая оптимизация, в основе которой лежит идея, что плотность структуры можно рассматривать как переменную. Инструменты *TopOpt* позволяют заполнить доступное пространство конструкции материалом, провести прочностной (или другой) анализ, а затем удалить материал из каждой области, где нагрузки невелики, или же в соответствии с другими критериями. (Пионерскую работу по этой тематике написал *Anthony Michell* еще в 1904 году. – *Прим. ред.*)

В прошлом сложность применения *TopOpt* заключалась в том, что формулы и алгоритмы могут быть составлены только для узкого класса линейных конечных элементов, и это может оказаться недостаточным для правильной работы. Чтобы справиться с этим, разработчики ПО вводили эвристику, что является эвфемизмом угадывания методом перебора. Использование эвристики означает внесение изменений и проведение вычислений, чтобы понять, как это будет соответствовать требованиям. Если требование не выполняется, то пробуют другую модификацию.

Еще не так много лет назад такой подход зачастую приводил к мучительно медленным расчетам и предупреждению, что “диск заполнен целиком”, поскольку эвристика требовала интенсивных вычислений, когда процессор полностью захвачен одной задачей. Кроме того, ранняя эвристика делала маловероятным, что два разных приложения могут выдать одинаковый результат для одной и той же проблемы.

Однако сегодня вычислительная мощность, необходимая для генеративного проектирования и AM, становится доступной: бесконечно быстрые и всё более дешевеющие вычисления можно вести как на десктопе, так и в облаке – и даже на некоторых смартфонах. Стоит отметить, что те расчеты, которые сегодня можно осуществить всего за секунду, в 1960-е годы у инженеров программы NASA “Аполлон” заняли бы 14 веков!

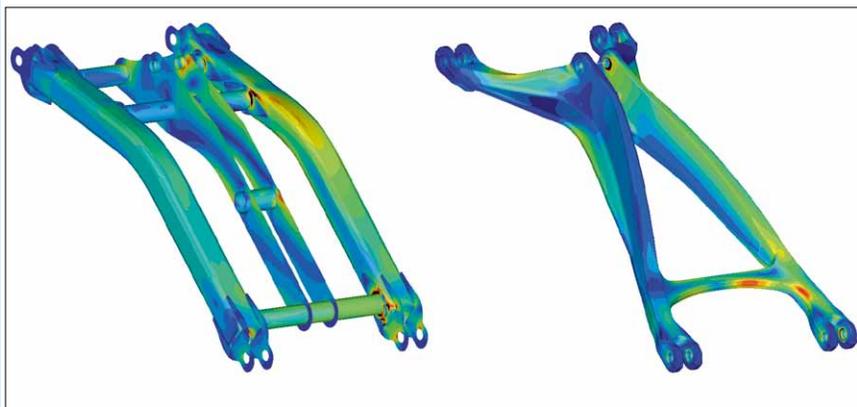


Рис. 2. Оптимизация компонента почвообрабатывающей машины (иллюстрация любезно предоставлена компанией *Altair Engineering*)

Топологическая оптимизация рассматривает плотность структуры как переменную, представляя возможность убирать материал из областей, испытывающих низкие нагрузки; это позволяет создавать более эффективные конструкции.

Давней проблемой *TopOpt* было то, что зачастую генерируются конструкции “органических форм”, без прямых линий и плоских поверхностей; такие формы прежде считались невозможными для изготовления. Два десятилетия тому назад это вынуждало накладывать ограничения на детали, предназначенные для обработки резанием (точение, фрезерование), штамповки, литья,ковки.

Сегодня *TopOpt* является такой же преобразующей технологией, как осуществлявшийся в 1970-е годы переход от черчения на кульманах к 2D/3D САПР. В той или иной степени возможности топологической оптимизации предлагаются в продуктах *OptiStruct* от *Altair Engineering Inc.*, *TOSCA* от *Dassault Systèmes*, *ANSYS Mechanical*, *Fusion 360* от *Autodesk*, *Creo* от *PTC* и многих других; теперь эти возможности автоматизированы и их стало проще использовать.

И хотя геометрические формы, сгенерированные средствами *TopOpt*, обычно выходят за границы воображения конструктора-человека (не говоря уже о возможностях производства), эффективность конструкций почти всегда является превосходной. Мы еще только начинаем осознавать силу оптимизации. Вот почему упомянутая выше конвергенция новых технологий так важна.

На рис. 3 показана форсунка реактивного двигателя, напечатанная на 3D-принтере специалистами *GE Aviation* (Эвендейл, шт. Огайо) – дочерней компании *General Electric*. Двадцать отдельных деталей были объединены в одну цельную, которая стала на 25% легче традиционно изготовленных форсунок, но в пять раз прочнее.



Рис. 3. Напечатанная цельная авиационная деталь (иллюстрация любезно предоставлена компанией GE)

Аддитивное производство

Первоначально методы аддитивного производства применялись только для быстрого прототипирования; в дальнейшем, когда были преодолены первоначальные ограничения по скорости, размеру деталей и используемым материалам, они были распространены на единичное и мелкосерийное производство. Сегодня на участках АМ изготавливается широкий спектр изделий, которые стали более прочными, легкими и менее трудоемкими. Эти продукты обладают органическими формами, которые было невозможно получить традиционными субтрактивными методами, требующими обработки металлов резанием.

Технологии АМ позволили кардинально упростить конструкции (особенно это касается узлов), за счет исключения готовых компонентов, которые должны быть правильно соединены друг с другом и затем скреплены болтами, заклепками, винтами, клеем или сваркой. Теперь же можно сразу формировать цельные детали и даже изделия вместо их сборки из десятка и более компонентов, причем производить их стало проще и быстрее, а количество ошибок и затраты уменьшились. Но даже когда жизненные циклы изменяются до неузнаваемости, рациональные PLM-практики, процессы и передовые технологии всё еще остаются существенно важными.

Аддитивное производство сделало возможным изготовление конструкций необычных форм, генерируемых с помощью средств генеративного проектирования – теперь они могут воплотиться в качестве физических объектов.

Кроме того, АМ устраняет потребность во многих инструментах, штампах, зажимах и других приспособлениях, широко используемых на традиционном производстве. Это предвещает переворот в производстве, обеспечиваемый числовым программным управлением и промышленными роботами.

Иллюстрация (рис. 4) показывает, как современные материалы будут использоваться при выпуске автомобиля-пикапа *Sierra Denali* компании *General Motors*, модель 2019 года. Кузов машины изготавливается не из стали и алюминия, а из пластика, армированного углеродным волокном

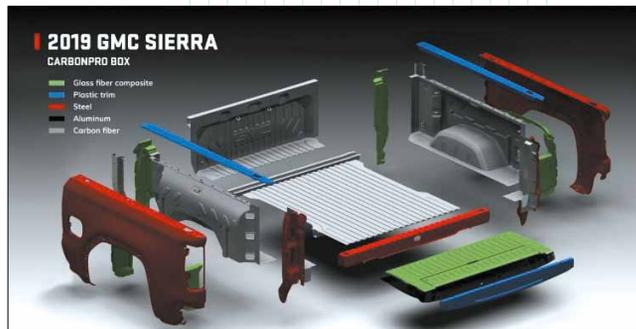


Рис. 4. Использование современных материалов при производстве автомобилей (иллюстрация любезно предоставлена компанией GM)

(углепластик). Эти новые кузова (предлагаемые как опция) лучше сопротивляются вдавливанию, поэтому на них остается меньше вмятин; кроме того, как сообщает GM, они обладают устойчивостью к коррозии, а полный вес грузовика уменьшается. Это хороший пример применения методов AM в производстве основной продукции.

Прогрессивные материалы

Технологии создания материалов с улучшенными свойствами расширили возможности аддитивного производства путем добавления композитов (углеволоконных, графеновых и др.) и полимеров к традиционному набору производственных металлов (сталь, титан, золото, серебро), сплавов (нержавеющая сталь), стекла и термопластиков. Использование в аддитивном производстве всех прогрессивных материалов в различных формах стало обычным делом. Многие “легкие” материалы теперь создаются в виде оптимизированной пространственной решетки ячеек, что обеспечивает лучшее соотношение эксплуатационных свойств и веса. Иногда эти материалы называют мета-материалами.

Некоторые современные материалы можно назвать революционными. Ткани человеческого организма могут быть сгенерированы из стволовых клеток. Кость может быть выращена из фосфата кальция, силикона, цинка и костных клеток (www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/additive-manufacturing-materials).

Современные материалы открывают возможность задействовать технологии аддитивного производства для изготовления инновационных продуктов.

В исследованиях о возможностях проектирования для обеспечения необходимых характеристик, центральное место занимает оптимизация. Кроме того, тенденция на сближение генеративного проектирования, *TopOpt*, AM и современных материалов подталкивается развитием методов искусственного интеллекта (*Artificial Intelligence, AI*), в том числе машинного обучения, что позволяет проводить (и ускорять) более глубокие исследования возможностей проектирования, используя для этого алгоритмы, разработанные для “добычи” ценной информации из огромного количества данных.

Технологии из сферы искусственного интеллекта вводятся в рабочие процессы разработки и изготовления изделий, чтобы использовать данные, поступающие от подключенных к интернету “умных” устройств, а также от приложений дополнительной (AR) и виртуальной (VR) реальности. Эти входящие потоки данных питают цифровых двойников и цифровые нити (то есть точные, непрерывно обновляемые цифровые представления изделий и процессов, соответственно). Многие считают, что это делает возможными реализацию концепции *Industry 4.0*, основа которой – управление жизненным циклом.

По мере общемирового роста потребности в интеллектуальных, подключенных к интернету товарах и сервисах, все эти технологии подталкиваются друг к другу. Нарботанные за десятилетия практики разработки изделий полностью пересматриваются. Более того, успехи, достигнутые разработчиками любой из упомянутых технологий, вызывают прогресс в развитии остальных. Вот три примера:

- Генеративное проектирование и *TopOpt* учитывают растущие возможности AM, что позволяет производить продукты и их компоненты таких форм, которые не могут быть изготовлены другим способом. Соответственно, технологии аддитивного производства ориентируются на возможности генеративного проектирования.

- Полезность AM частично зависит от способности исследователей и разработчиков современных материалов расширить возможность выбора материалов, которые позволяют получать структуры в виде сложных решеток с материальными свойствами, различающимися в разных областях.

- Разработчики новых материалов и средств генеративного проектирования опираются на работы друг друга по материаловедению и облегчению конструкций, особенно в том, что касается использования преимущества *TopOpt* по упрощению геометрии за счет симуляции, анализа и оптимизации. Пользовательские материалы и решетчатые структуры из нано- и мета-материалов можно создавать и определять с большой уверенностью.

Сближение технологий

Недавние разработки позволили получить сверхлегкие структуры, масса которых на 97% меньше, чем у идентичных деталей, изготовленных из цельной заготовки. Кроме того, можно создавать детали с уникальными свойствами, отсутствующими в природном виде – например, с отрицательным коэффициентом Пуассона (при приложении растягивающего усилия поперечное сечение тела увеличивается) или с нулевым коэффициентом теплового расширения.

Однако до завершения конвергенции еще далеко. Остается сделать еще много работы, так как разработчики ПО стремятся не отставать от прогресса в виде появляющихся новых материалов и новых возможностей симуляции, оптимизации и анализа. Но для архитектуры некоторых существующих решений может оказаться сложным делом вместить быстро развивающиеся разработки в сфере генеративного проектирования, *TopOpt*, AM и современных материалов. Файлы моделей становятся всё более “гранулированными”, количество уровней детализации постоянно растет, объем данных значительно увеличивается и требуется решать всё более трудоемкие цифровые проблемы.

Как уже отмечалось, сегодняшние программные решения для генеративного проектирования, *TopOpt*, AM и создания продвинутых материалов пока еще не являются достаточно практичными для широкого применения в промышленности и

медицине; это еще не волшебная палочка. Тем не менее, аналитическая компания *CIMdata* и другие лидеры отрасли считают, что конвергенция уже зашла гораздо дальше, чем многие полагают.

Организационные вопросы и ожидаемые выгоды

Поскольку генеративное проектирование и топологическая оптимизация отталкиваются от требуемых технических характеристик, а не от унаследованных проектов и от знаний конструктора, то наблюдается переход от проектирования человеком к проектированию при помощи человека. Внимание к истории построения предыдущих конструкций неизбежно уменьшается. Конструкторы освобождаются от предрассудков в отношении ограничений и традиционных физических свойств, получают независимость от коллективной мудрости и предположений о негативном воздействии органических природных процессов на свойства конструкции.

Новые парадигмы уже в ближайшие годы окажут глубокое воздействие на то, как будущие продукты будут проектироваться, изготавливаться и обслуживаться – многим людям придется поменять способы своей работы, чтобы идти в ногу со временем.

Для достижения максимальной эффективности средства генеративного проектирования и *TopOpt* должны применяться в качестве первого шага проектирования геометрии, и, возможно, для пересмотра того, как разработаны компоненты сборки.

Поскольку интеллектуальные, динамично подключаемые изделия используются всё шире, то остаются следующие вызовы:

- Организационные структуры и ведомственная политика. Это затрудняет совместную работу специалистов по *CAD*, инженерному анализу, технологиям производства для выработки набора специфических требований к каждому новому изделию.

- Фактом становится то, что человек (инженер, промышленный дизайнер – а это некоторые наши умнейшие, наиболее способные мужчины и женщины) отодвигается на периферию создания нового продукта. Возрастные инженеры и те, кто принимают решения, десятилетиями использовали *CAD*- и *CAE*-системы. Некоторые из них будут сопротивляться современному опыту, очерченному алгоритмами, когда алгебраические уравнения заменяют творческое создание геометрии.

- Новые нанимаемые инженеры, которые всю свою жизнь использовали компьютеры и социальные сети, отвернутся от старой *CAD*-парадигмы; в итоге статус-кво будет нарушен.

- Необходимы новые навыки, когда старые перестают использоваться.

Потенциал генеративного проектирования, *AM* и современных материалов обещает слишком много преимуществ по созданию инноваций, чтобы существующие практики разработки изделий сохранялись бесконечно. Необходимость сокращения

затрат и сроков выхода на рынок, давление конкуренции фактически гарантируют, что конвергенция рассматриваемых технологий станет сердцевинной завтрашних программных платформ для создания инноваций. Но пока мы должны признать, что сегодня эти инструменты используются в основном для генерации идей и концептов.

В терминах “лучше–быстрее–дешевле” воздействие ожидаемых трансформаций может значительно превзойти влияние обычных новаций [в развитии ПО]. Критерий стоимости окажет положительное воздействие. Финансисты и те, кто принимают решения, увидят на 30÷60% лучшую отдачу от инвестиций в новые технологии, наряду с большим снижением общей стоимости владения.

В терминах “лучше–быстрее–дешевле” воздействие ожидаемых трансформаций может значительно превзойти влияние обычных новаций в развитии ПО.

Авторы уверены, что если графически отобразить разрабатываемые новые возможности и создаваемые инновации, то кривая резко пойдет вверх уже в обозримом будущем. В 21 веке концепты неисчислимого количества продуктов рождаются ежедневно в бешеном темпе.

Некоторые из них воплотят такие инновации, какие мы себе еще и представить не можем. Рекламные картинки кресел странной формы и стилизованных мотоциклов – это только начало. Новые продукты будут более радикальными и разрушительными для статус-кво в процессах, документообороте и для целых рынков. *CIMdata* может помочь тем, кто хочет подготовиться (www.cimdata.com/en/resources/cimdata-blog/itemlist/category/4-simulation-cae).

Современные инженеры и дизайнеры могли бы поспособствовать исследованию новых инструментов проектирования, принимая участия в таких конференциях, как *Topology Optimization Roundtable*, которую проводит *Sandia*, и *PLM Road Map* компании *CIMdata*. При поддержке технического руководства компаний результаты конвергенции генеративного проектирования, *TopOpt*, *AM* и новейших материалов со временем окажутся поразительными. Однако без [комплексного применения] *PLM* полученные результаты могут быть и разочаровывающими. 🙄

О лабораториях Sandia National Laboratories

Многопрофильные Сандийские национальные лаборатории с 2017 года управляются компанией *National Technology and Engineering Solutions of Sandia LLC*, принадлежащей конгломерату *Honeywell International*. Лаборатории были основаны в 1949 году с целью проведения исследований для Национального управления по ядерной безопасности США. Количество сотрудников превышает 10 000 человек, бюджет – свыше 3.1 млрд. долларов.