

Генеративное проектирование: инопланетные детали как результат естественной эволюции

John Hitch, старший редактор (*MachineDesign.com*)

©2019 Informa USA, Inc.

Последние инновации в проектировании делают настоящее всё более похожим на будущее и разгружают конструкторов, чтобы они могли насладиться этим.

До 2020 года осталось всего несколько месяцев, и мы, глядя на то, как формируются и как выглядят нынешние детали, наконец испытываем ощущение, что входим в будущее. Это будущее создается интеллектуальными 3D-принтерами и обрабатывающими центрами – они используют материалы, поставляемые глобальной цепочкой поставщиков, и соединяются с супермощными гаджетами, количество которых растет по экспоненте. Сегодня действительно нет причин считать, что какие-то производственные задачи решить невозможно. Если чего-то не существует, то только потому, что мы этого еще не постигли.

Эта футуристическая *техтопия* (техническая утопия), несущая в себе большой потенциал, была бы недостижимой, если бы не инженеры – целеустремленный, сверхкреативный народ, прокладывающий этот курс и непрерывно улучшающий мир вокруг, опираясь на суперсилу ... математики.

Математика уже давно выступает незаменимым движителем, позволяющим делать невозможное возможным, – по крайней мере, со времен Древнего Египта, то есть более 4000 лет. Великая пирамида в Гизе являет собой самое древнее монументальное свидетельство её мощи. Удивительно, что геометрическая элегантность этой пирамиды была просчитана на папирусных свитках, большинство из которых давно превратилось в пыль. Но универсальный язык математики всё еще говорит с нами через её пропорции, и это будет продолжаться невообразимо долго.

Сами математические истины не изменились, но появилось немало улучшений в том, как мы получаем к ним доступ. Вести вычисления стало гораздо проще и можно даже обходиться без бумаги, так как теперь расчеты выполняют CAD- и CAM-программы.

В последние несколько лет математика, лежащая в основе этого ПО, подверглась форсированной модернизации в отношении возможностей генеративного проектирования, которые теперь являются стандартными функциями решения *Fusion 360* от *Autodesk*. Генеративное проектирование – это метод проектирования деталей и структур, который напрямую подключается к исходному коду вселенной, чтобы



осуществить ряд перестановок в 3D-модели (от десятков до нескольких сотен) за малую долю того времени, которое потребовалось бы мозгу человека. Затем команда проектировщиков может выбрать ту форму, которая объективно лучше подходит для конкретного применения и потребителя.

Подпитываемая средствами машинного обучения программа генеративного проектирования (требующая указать такие основные исходные данные, как материал, метод производства, значения физических параметров и нагрузок) позволяет пользователю остановиться на оптимальной конструкции. Аналогичный выбор делали и его древнеегипетские предшественники – хотя вряд ли сгенерированная форма будет выглядеть похоже. Такие программы, не скованные прежними производственными ограничениями (что стало возможным благодаря появлению 3D-печати и совершенствованию механической обработки), создают весьма необычные детали. Они больше походят на горячечные фантазии швейцарского художника Ханса Рудольфа Гигера (наиболее известного своими работами для фильма “Чужой”), чем на основные геометрические формы.

Вскрытие “пришельцев”

В прошлом году немецкая компания *Claudius Peters* – 113-летний производитель оборудования для цементной, гипсовой, стальной и алюминиевой отраслей – обнаружила, как много преимуществ можно получить, используя средства генеративного проектирования от *Autodesk*. В течение четырех часов обучения, проводимого специалистами *Autodesk*, инженеры компании итерационно улучшали варианты конструкции изготавливаемых массивных металлических лотков, в которых гранулы цемента (цементный клинкер) транспортируются из



С помощью этих тяжелых металлических лотков горячий клинкер цемента транспортируют через массивную камеру охлаждения. Функционал генеративного проектирования решения Fusion 360 позволил создать более дешевый и легкий вариант конструкции

печи в охладитель. Поскольку размеры оборудования соответствуют половине футбольного поля, то для его комплектации необходимо от 60 до 100 таких лотков – каждый весом 170 кг.

Ранее компания уже оптимизировала конструкцию этой детали, перейдя от преимущественно плоской формы секретарского стола к чему-то похожему на шкатулку для хранения ювелирных изделий. Такая самостоятельно переработанная и оптимизированная деталь была литой и весила всего лишь 80 кг, что считалось хорошим достижением.

После обучения в *Autodesk* инженеры компании воспользовались средствами генеративного проектирования системы *Fusion 360* и поняли, что их улучшения конструкции лотка всё еще далеки от оптимальных. Система предложила каркасную структуру этой детали, похожую на нечто выпавшее из антикварной печатной машинки. Сгенерированная деталь весила на 25% меньше, чем та, которая раньше считалась «оптимизированной».

«Мы назвали её инопланетной деталью», – говорит **Thomas Nagel**, операционный директор компании *Claudius Peters*, который открыл для



Так выглядит путь от оригинальной детали, которую использовала компания Claudius Peters, к улучшенной версии, а затем к созданной средствами генеративного проектирования

себя генеративное проектирование в 2017 году на конференции *Autodesk University*. Сначала он даже подумал, что были введены неверные данные.

«Результат нас удивил – как он может настолько отличаться от нашей оптимизированной детали», – вспоминает он.

Проверка с привлечением метода конечных элементов подтвердила, что новая деталь не только легче оригинальной, но и прочнее. И это могло бы сократить общие затраты при создании лотка дополнительно на 113 долларов за деталь. Поскольку при генерации был указан аддитивный метод изготовления, а оборудования для 3D-печати у компании не было, конструкцию изменили так, чтобы её можно было изготовить с помощью лазерной резки и сварки. Теперь лотки можно делать на месте, а не в Индии, что позволяет экономить время и уменьшить транспортные расходы.

Г-н *Nagel* считает, что сотрудничество с *Autodesk* и использование их продвинутого ПО позволит компании избежать угасания или распада и сохранить рыночную конкурентоспособность.

Разница очень ощутима

Появление генеративного проектирования не могло произойти в более подходящее время, чем сейчас, так как потребность в более легких деталях никогда еще не была так сильна. Производство цемента создает 8% выбросов CO_2 во всём мире, поэтому усилия компании *Claudius Peters* повысить свою энергоэффективность имеют большой смысл. Еще больший смысл это имеет для транспортного сектора, на который приходится 15% всех ежегодных выбросов парниковых газов. Уменьшение массы обычных автомобилей снижает расход топлива, а в случае электромобилей – увеличивает пробег. Неудивительно, что присущая генеративному проектированию способность формировать легковесные конструкции привлекла внимание автомобилестроителей. В сочетании с методами аддитивного производства это постепенно меняет способ проектирования и изготовления автомобилей.

Компания *General Motors* хочет быть в авангарде движения по созданию электромобилей – к



2023 году планируется подготовить 20 новых моделей. С помощью средств генеративного проектирования от *Autodesk* им удалось сделать 3D-печатный кронштейн ремня безопасности из нержавеющей стали на 40% прочнее и на 20% легче исходного варианта, состоящего из восьми сваренных деталей.

“Генеративное проектирование освобождает вас от ограничений”, – говорит **Kevin Quinn**, директор по аддитивному проектированию и производству компании *GM*. – “Этот подход открывает целый новый ряд возможностей по снижению веса за счет изменения конструкций, чего мы не можем получить никаким другим способом”.

Но случай с кронштейном – это подтверждение концепции для относительно маленькой детали автомобиля. Недавний же проект компаний *Volkswagen* и *Autodesk* показал генеративное проектирование во всей его нездешней славе. В честь 20-й годовщины VW в Калифорнии, а также чтобы показать доступность технологий будущего, они оснастили микроавтобус *Volkswagen Microbus* 1962 года электродвигателем и “голографической развлекательной системой”. Кроме того, появились весьма своеобразные оранжевые акценты – органически выглядящие диски колес, причудливо переплетенные крепления боковых зеркал и руля, – почерпнутые, возможно, в Зоне-51 (*Area 51* – военная база в штате Невада, существование которой правительство США признало только в 2013 году. Повышенная секретность объекта породила массу теорий заговора, в особенности касающихся НЛО. – *Прим. ред.*).

Всё это, конечно, служит хорошим примером генеративного проектирования и прекрасной темой для обсуждения. Однако эти



инопланетные диски имеют и реальное назначение.

“Такие колеса на 18% легче обычных. А это ведь электромобиль, поэтому каждый грамм экономии веса обеспечивает дополнительный пробег”, – говорит руководитель проекта **Paul Sohi**, технический проповедник *Fusion 360* из компании *Autodesk* (единственный человек из всех, кого я знаю, пишущий докторскую диссертацию по 3D-печати).

Самым большим преимуществом для любого инженера является радикальное ускорение проектирования. По словам г-на *Sohi*, в отношении колес сроки сократились с полутора лет до четырех месяцев. Новый подход позволил команде не только выполнить больше тестов и симуляций, но еще и приблизить момент, когда колеса будут установлены на автомобиль.

Старший конструктор **Andrew Morandi**, работающий в компании *Volkswagen*, оптимистично считает, что хотя для VW этот проект был лишь попыткой окурнуть пальцы в воды футуристического проектирования, лет через 10–15 это может стать стандартной производственной практикой.

“Возможно, это будет частью полного фундаментального изменения автозаводов и способа производства автомобилей”, – говорит он.

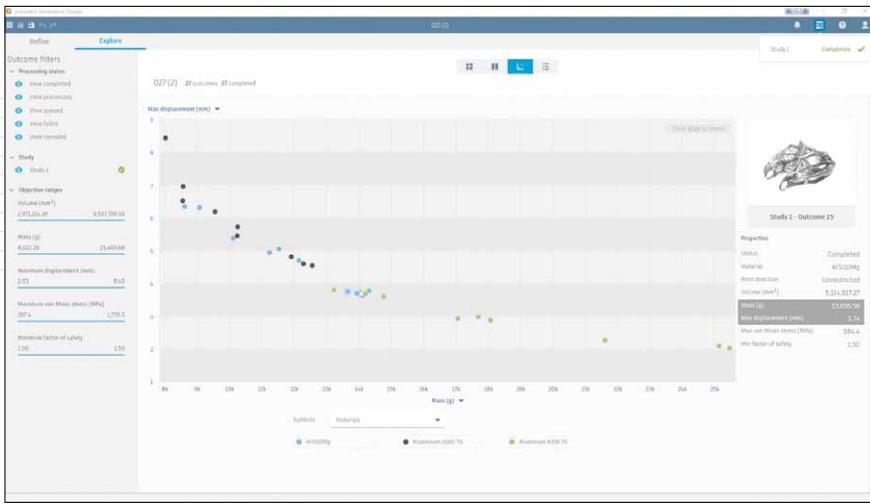
Как признаёт **Paul Sohi**, конструкции, порожденные алгоритмами, выглядят прекрасно с позиции левого полушария мозга, где происходит математическая и логическая обработка, но не с позиции правого, которое работает с информацией, выражаемой в образах и символах.

“Результаты генеративного проектирования технически совершенны, но это не гарантирует их визуальную привлекательность”, – говорит г-н *Sohi*. – “Получаемые на выходе очень органические формы воспринимаются полярно. Некоторые их любят, а некоторые – ненавидят”.

Он также отмечает, что такие оптимальные конструкции часто встречаются в природе – примером может служить тазобедренная кость.

“Природа – лучший инженер во вселенной”, – говорит г-н *Sohi*. – “Просто она начала на несколько миллиардов лет раньше нас, а теперь мы понемногу догоняем её”.





Пример диаграммы разброса параметров (Scatter Chart) в Fusion 360

Г-н *Sohi* работает с диаграммами, отражающими разброс параметров для разных вариантов конструкции, предложенных системой, и выбирает ту модель, которая наилучшим образом соответствует определенным факторам (например, соотношение массы и надежности). Вы можете поиграть с материалами, что изменяет результат. Если взять титановый сплав вместо алюминиевого, то колеса автобуса *VW Bus* получатся более тонкими и узкими, поскольку титан – намного более прочный материал, и чтобы конструкция выдерживала такую же нагрузку, его требуется меньше.

Но вопрос в том, что происходит, когда вы ошибаетесь.

“Как-то раз я непреднамеренно задал некорректные параметры, указав неподходящий материал, слишком мягкий для моих нагрузок”, – говорит г-н *Sohi*. – “Результат получался аллергически раздутым”.

И наоборот, если вы ошибетесь с количеством нулей в значении силы, то получите “безумные паутинообразные вещи”. Но, к счастью, имеется функция предварительного просмотра.

Что же касается времени, необходимого искусственному интеллекту для того, чтобы создать эти структуры (возможно, революционные), то оно зависит от сложности задачи. Обычно процесс занимает от 20 до 90 минут, говорит *Paul Sohi*. Поскольку алгоритмы решают задачу в облаке, то инженер в это время может заниматься другой работой или выпить чашечку кофе.

На вопрос о том, какие новые вызовы может создать генеративное проектирование для инженеров, г-н *Sohi* быстро ответил, что им придется подумать над тем, как распорядиться лишним временем, которое у них появится.

Пространственная ориентация

Иногда *Fusion 360* слишком старается, и требуются некоторые дополнительные действия

конструктора, чтобы сгладить маленькие канавки, которые система создает с целью сделать деталь еще более эффективной.

Расположенная в нью-йоркском районе Сохо компания **nTopology**, основанная в 2015 году, предлагает свой способ оптимизировать оптимизацию – с помощью её платформы *nTop Platform*.

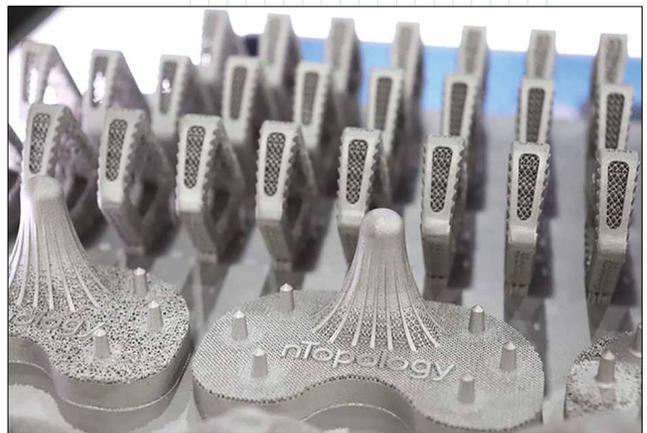
“В среде *nTop* инженер может автоматически преобразовать сгенерированную конструкцию в наш редактируемый формат – без необходимости трудоемкой ручной работы”, – говорит **Bradley Rothenberg**, учредитель и генеральный директор компании. – “Это верно даже для данных из сторонних программ генерации или оптимизации топологии,

которые выдают результат в виде грубой тетраэдральной сетки. Такой файл можно импортировать в *nTop* для мгновенной конвертации в наш родной редактируемый гладкий формат”.

Этот 34-летний выпускник Института Пратта является фанатичным защитником открытой платформы, позволяющей опытным инженерам менять правила генерации своих деталей.

“Индивидуальное создание рабочего процесса позволяет вам определить свой собственный алгоритм, которым вы можете управлять – вместо того, чтобы просто вращать регуляторы “черного ящика”, предоставленного вендором программного обеспечения”, – говорит он.

Миссия его компании проста: помочь инженерам быстрее поставлять детали с максимально высокими эксплуатационными характеристиками.



Медицинские устройства из титана, спроектированные nTopology и изготовленные на аддитивном оборудовании серии M2 компании Concept Laser. Длительность оптимизированного рабочего процесса, по данным nTopology, составила полдня



Титановый кронштейн спутника массой 1.7 кг был спроектирован за полдня с помощью средств генеративного проектирования nTop и изготовлен на EBM-станке Arcam Q20 Plus

И чем умнее становится искусственный интеллект, тем больше возрастает его ценность как реального инструмента повышения производительности.

“Не думаю, что мы заменяем инженеров. Мы даем им возможность больше фокусироваться на собственно инженерной работе”, – считает г-н *Rothenberg*.

Поскольку все эти футуристические обрабатывающие центры и аддитивные машины могут изготавливать детали не за месяцы, а за дни, то узким местом теперь становится проектирование. Решением г-на *Rothenberg* было добавить больше математики – поэтому он занялся кодированием и представил рынку ПО для оптимизации (которая тоже считается одной из форм генеративного проектирования).

И это, наконец, избавляет нас от древнего метода черчения в 2D, используемого со времен первых пирамид.

Даже CAD-системы всё еще могут представлять 3D-формы как слои, что г-н *Rothenberg* считает неэффективным.

“Совершенно новая технология моделирования позволяет нам представить твердое тело в 3D как действительно твердое тело, обсчитываемое параллельно и в центральном, и в графическом процессорах, и это на порядок быстрее по скорости рендеринга, особенно для сложных форм”, – поясняет г-н *Rothenberg*. – “**Вся форма, в основном, является одним большим уравнением**”.

Г-н *Rothenberg* отмечает также неограниченную сложность модели, что достигается благодаря беспримерной устойчивости и применению для визуализации метода трассировки лучей. Он утверждает, что nTop-модели “никогда не разваливаются и не тормозят” – независимо от того, сколько в них было сделано сопряжений, скруглений, булевых операций, смещений и всего прочего, что только может быть.

Платформа nTop уже использовалась при проектировании пресс-форм со сложными

внутренними каналами охлаждения для литья под давлением, медицинских устройств и даже кронштейна спутника *Zenith Tecnica*, который был изготовлен путем электронно-лучевой плавки порошка (*Electron Beam Melting, EBM*) на оборудовании *Arcam*. Результатом применения nTop стало уменьшение массы на 60%.

Г-на *Rothenberg* курирует **Carl Bass**, бывший генеральный директор *Autodesk*, ныне являющийся членом правления *nTopology*, получившей 20 миллионов долларов венчурного финансирования для финансирования дальнейшего развития. Когда это произойдет, это поможет еще большему количеству инженеров, чьи объекты находятся и на Марсе, и еще дальше.

У компании *Autodesk* есть планы сотрудничества с лабораторией *Jet Propulsion Lab* агентства *NASA* для осуществления самого дерзкого генеративного проекта: создания межпланетного спускаемого аппарата.

“Это будут самые большие и самые сложные вещи, которые когда-либо делались при помощи генеративного конструирования”, – говорит **Andreas Bastian**, главный научный сотрудник *Autodesk*.

И, определенно, одни из самых впечатляющих.

Гравитация – самая серьезная преграда для полетов в космос, и в компании *Autodesk* знали, что если массу спускаемого аппарата уменьшить на килограмм, это позволит облегчить ракету-носитель на тонну. В лаборатории *JPL* ожидали уменьшения массы на 10%, а получили – на 30÷35%. Как и в случае с электромобилями, это “увеличит пробег” – позволит продвинуться дальше в космос, чтобы найти там что-то действительно инопланетное.

“Мы собираемся найти инопланетную жизнь, если она есть, используя все лучшие и лучшие технологии”, – говорит г-н *Bastian*. 🤖