

УДК 629.78

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ С МАЛОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ОТКАЗОВ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

Ю.П. Похабов

*АО «НПО ПМ - Малое Конструкторское Бюро», Железногорск, Россия
pokhabov_yury@mail.ru*

Аннотация

Успешность перехода на цифровые технологии проектирования и инжиниринга в условиях Индустрии 4.0 определяется не только совершенствованием технических и программно-вычислительных средств проектирования, но и эффективностью человеческой деятельности при их использовании. Одним из вызовов новой промышленной революции является необходимость повышения профессионального уровня проектанта и конструктора в области подготовки и верификации исходных данных на входе в компьютерную модель и валидации результатов его работы на выходе. Главным образом это касается наиболее трудоёмких и ответственных работ по проектированию сложных изделий с малой вероятностью отказов. Результат может быть достигнут за счёт применения новых методов конструкторско-технологического анализа для смягчения или исключения человеческих ошибок при принятии технических решений. Использование методов конструкторско-технологического анализа надёжности не нарушает естественный ход процессов проектирования и конструирования, при этом обеспечивает обоснование параметров функционирования, которое необходимо для принятия конструкторских решений. Для этого используются методы анализа, позволяющие представить конструкторскую документацию в виде параметрической модели функционирования. Данная модель позволяет эмулировать аварийные ситуации при худших сочетаниях режимов и условий эксплуатации, что невозможно достичь при экспериментальной отработке. На основании такого моделирования принимаются обоснованные конструкторские решения, исключающие потенциальные отказы. Для исключения маловероятных отказов предусмотрена оригинальная опция, позволяющая устанавливать необходимые и достаточные требования в конструкторской документации для достижения бездефектного производства.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, цифровой двойник, цифровая тень, малая вероятность отказов, конструкторско-технологический анализ надёжности.

Цитирование: Похабов, Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 / Ю.П. Похабов // *Онтология проектирования*. – 2019. – Т.9, №1(31). – С.24-35. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-24-35.

Введение

В 2015 г. была определена концепция четвёртой промышленной революции – Индустрии 4.0 [1], в результате которой из привычного цикла промышленного изготовления в прошлое должны уйти длительные процессы конструкторских разработок, отработочных испытаний и постановки продукции на производство. Всё это будет заменено цифровыми технологиями на основе квазифизических моделей, которые позволят снизить стоимость разработок и создавать промышленную продукцию с уникальными потребительскими свойствами «с первого предъявления» (фактически без материальных затрат на экспериментальную отработку и доработку конструкций по результатам испытаний). Нет сомнений, что возможно осуществить основополагающие идеи Индустрии 4.0, но не лишне будет обратить внимание на то, с чем мы рискуем столкнуться на практике в техническом аспекте.

Более 40 лет в нашей стране уже развиваются отдельные элементы Индустрии 4.0 – вначале САПР, затем CAD/CAM/CAE-системы и CALS-технологии. За это время усовершенствовались технические и программно-вычислительные средства проектирования, но человек по-прежнему остаётся в автоматизированной среде проектирования слабым звеном: качество его мышления не улучшилось, аналитические способности не повысились, образовательная подготовка заметно упала. При этом значительно возросли навыки владения компьютерной техникой, но это слабо влияет на улучшение качества конструкторских разработок. Чтобы сделать шаг вперёд, необходимо подтянуть профессионализм проектантов (конструкторов) к вызовам Индустрии 4.0, и именно это должно стать одной из основных задач новой промышленной революции.

1 Предпосылки для реализации Индустрии 4.0 в области проектирования

Допустим, что можно построить «безупречную» *цифровую модель*¹ некоего объекта (включающую геометрические размеры, кинематические связи элементов конструкции, физико-механические характеристики конструкционных материалов, покрытий, параметры конструктивных соединений и пр.), которая является его тождественной копией в физическом мире (фактически это 3D-модель с детализацией физико-механических связей элементов конструкции). Предполагается, что количественное описание такой модели эквивалентно параметрам реального объекта: *геометрическим величинам* (конфигурации, формам, размерам, поперечным сечениям, допускам, зазорам, посадкам, люфтам и т.п.), *функциональным характеристикам* (силовым, жесткостным, кинематическим, электрическим, электромагнитным, термодинамическим и т.д.), *критериям* (показателям надёжности, живучести, безопасности, гидро- и газодинамическим критериям подобия и др.).

С одной стороны, такая цифровая модель представляет собой симулякр – репрезентативный образ некоего (будущего или реального) объекта в виртуальной реальности, который можно увидеть лишь с помощью цифровых средств визуализации (причём с любого ракурса – снаружи или изнутри, что в реальном мире невозможно); *с другой стороны*, цифровая модель существует в виртуальной среде в виде *числовой информации* об объекте и способна изменяться по законам, отражающим эквивалентные изменения данного объекта в условиях физического мира; наконец, *с третьей стороны*, при помощи конструкторских, технологических и производственных процедур цифровая модель может быть преобразована в физический объект, который можно не только видеть, но и пользоваться им по назначению в реальной действительности.

В отличие от цифровой модели в виртуальной реальности, материальный объект в реальном мире всегда выполняет предписанные ему функции (даже если он бездействует) и испытывает при этом различного рода нагрузки и воздействия (силовые, гравитационные, барические, атмосферные, тепловые, климатические, бактериологические, радиационные и т.п.). Такие нагрузки и воздействия могут быть внешними и внутренними (независимыми от внешних). В совокупности их принято называть *условиями и режимами* функционирования (эксплуатации) и именно они ограничивают возможности реального объекта выполнять заданные функции. Согласно тектологии А.А. Богданова [2], всё, что человек способен создать в техносфере, он может сделать с определённой (понятной ему) функциональностью, которая должна быть осуществлена в заданных условиях и режимах (т.е. известных наперёд). Другое дело, что не все условия и режимы функционирования человеку могут быть изначально известны, и вследствие этого человек рискует на практике создать неработоспособные, ненадёжные или неэффективные технические объекты. Предположим, что известны все

¹ Модель – сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира [ГОСТ Р 57188–2016, 2.1.1].

условия и режимы функционирования объекта и описывающая их *математическая модель*², определяющая изменения состояния объекта (например, величины нагрузок и условия их приложения к объекту). В этом случае, совмещая в виртуальной реальности *цифровую* и *математическую модели*, можно получить *динамическую модель* поведения объекта во времени (например, в виде анимации реакций на внешние нагрузки и онлайн-протоколов параметров состояния), эквивалентную его физическому поведению в реальном мире³.

Поскольку на реальный объект и его поведение существенное влияние оказывают условия и технологии изготовления, то *цифровая модель* должна отражать технологические возможности реального производства, обусловленные, например, типом имеющегося оборудования для изготовления конструктивных соединений деталей (сварки, пайки, клёпки, склеивания, скрепления болтами, винтами и т.п.), а *математическая модель* – включать наследственные факторы, порождённые технологическими режимами изготовления, которые способны изменять поведение изделия при функционировании, например из-за остаточных и монтажных деформаций, ошибок позиционирования при изготовлении и проведении сборочных операций и т.д. При изготовлении изделия на той или иной производственной площадке его *цифровые* и *математические модели* должны быть приведены в соответствие с возможностями конкретного производства, чтобы адекватно отражать его технологию и не навредить общему замыслу конструктора.

Цифровая модель объекта и *математическая модель* условий и режимов его функционирования являются субъективным отражением мозговой деятельности человека по восприятию объективной реальности. Чем больше человек осведомлён, тем больше он способен видеть причинно-следственных связей в физическом мире, соответственно, более точно может описать их логико-математическими зависимостями. Однако познания человека не могут быть абсолютными, поэтому в любом случае *динамическая модель* будет отличаться от поведения реального объекта «*пропорционально числу переменных, фигурирующих в его описании*» [3].

Для достижения целей Индустрии 4.0, *динамическая модель* поведения объекта должна с допустимой погрешностью совпадать с поведением физического объекта в реальном мире. Понятно, что сравнить напрямую поведение реального объекта с его *динамической моделью* невозможно. Для этого используют т.н. *цифровую тень* – виртуальный образ физической реальности в режиме реального времени. Построить *цифровую тень* можно путём получения необходимой и достаточной информации о поведении реального объекта (*безошибочно изготовленного* согласно цифровой рабочей конструкторской документации и находящегося в заданных условиях и режимах функционирования). Формально, соответствие с заданной погрешностью *цифровой тени* и *динамической модели* служит критерием качества выполненной конструкторской разработки.

Чтобы осуществить *безошибочное изготовление* объекта (одно из основных условий для получения достоверной *цифровой тени*), необходимо чтобы требования технологической документации строго соответствовали требованиям рабочей конструкторской документации, элементы конструкции и изделие в целом были изготовлены без отступлений от этих требований, а ожидаемое качество изготовления было подтверждено объективными средствами технического контроля. Предположим, что перечисленные условия полностью обеспечены

² Математическая модель – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений [ГОСТ Р 57188–2016, 2.1.2]. В данном контексте под математической моделью подразумевается пакет математических моделей для проведения мультидисциплинарных CAE- и НРС-расчётов (расчёты прочности, оптимизации, теплообмена, динамики, колебаний, вибрации, ударов, электромагнетизма, CFD-расчёты и т.п.).

³ В простейшем виде динамическую модель могут характеризовать реакции математической модели, визуализированные в виде отчётов и спецификаций, – внутренние силовые нагрузки, напряжения, деформации, перемещения, формы и частоты собственных колебаний и т.п.

системой менеджмента качества на производстве (например, ИСО 9001) и потому не влияют на процесс проектирования/конструирования (по результатам изготовления не нужно принимать конструкторские решения по доработкам).

Если критерии качества разработки выполнены, то *динамическая модель* по факту является *цифровым двойником* реального объекта (*«единой моделью, достоверно описывающей все характеристики, процессы и взаимосвязи как для отдельного объекта, так и для всего производства»* [4]). Такой *цифровой двойник* способен служить информационно-справочной основой для прогнозирования, диагностики, коррекции режимов работы и проведения ремонтов материального объекта в реальном времени, а также отработки чрезвычайных действий на случай угроз или возникновения нештатных ситуаций (поломок).

Теоретически *цифровой двойник* можно получить напрямую (минуя составление *динамической модели* и *цифровой тени*), но для этого необходимо иметь генеральную совокупность данных, включающую вариации нагрузок/воздействий, характеристик материалов и параметров технологических процессов, что неизбежно потребует огромных организационно-технических ресурсов по сбору, хранению, обработке и передаче информации, не говоря уже о привлечении значительных финансовых средств.

Таковы теоретические предпосылки до соприкосновения с реальностью (если на практике будут соблюдены все вышеизложенные условия и допущения реализации задуманного).

2 Реалии проектно-конструкторских разработок

Создание технологий автоматизированного проектирования позволили перевести процессы рисования и расчётов в область компьютерных вычислений на основе обработки больших массивов данных. Функции человека и компьютера резко дифференцировались. Компьютер выполняет рутинную часть работы по графическому отображению и компилированию геометрических фигур, копированию изображений, редактированию, форматированию, генерированию 3D-моделей и вычислениям параметров на основе конечно-элементных или иных моделей. Скорость проведения разработок выросла, а вот с качеством всё оказалось сложнее. Если у конструкторов, заставших «докомпьютерные времена» и переобучившихся на новые методы конструирования, качество разработок повысилось, то качество разработок молодых конструкторов заметно упало. Конструкторы нового поколения стали делать больше ошибок, связанных с принятием инженерно-технических решений. Примерно то же самое произошло и с расчётчиками. Старые расчётчики ещё помнят, как проверить правильность результатов автоматизированного расчёта с помощью аналитических формул, а молодёжь этого уже не знает и воспринимает результаты компьютерных вычислений как «истину в последней инстанции». Не менее значимым является тот факт, что процессы проектирования и конструирования переместились в виртуальную область, и это для сторонних лиц вуалирует ценность занятия конструктора. Видимая лёгкость появления конструкторской документации «из-под компьютера» приводит к нивелированию роли конструктора (с позиций стороннего наблюдателя чертежи разрабатывает не конструктор, а компьютер).

Таким образом реалии компьютеризации конструкторских работ привели к возникновению двух групп причин падения качества конструкторских разработок. С одной стороны, менеджеры совершенно искренне стали полагать, что компьютеры думают за человека. Они воспринимают конструкторов и расчётчиков как обслуживающий персонал и ставят их в условия директивного сокращения сроков разработки, не оставляя им времени на осмысление результатов своих действий (всерьёз обсуждается тезис о бессмысленности обучения современных инженеров сопротивлению материалов, поскольку на практике им необходимы только умения пользоваться готовыми программами [5]).

С другой стороны, современное поколение конструкторов/расчётчиков не всегда осознаёт, что основная их задача – это не виртуозное владение компьютером, а способность (по Роберту Шекли) *правильно задать компьютеру вопрос, для чего прежде нужно знать бóльшую часть ответа*. Именно эта часть работы конструктора/расчётчика не изменилась и не изменится по мнению автора даже в случае применения подходов *«проектирования за гранью интуиции генерального конструктора»* [4]. Сегодня функции человека и компьютера максимально разделены. Роль и задача компьютера – это проведение вычислений по заданию человека. Роль и задача конструктора/расчётчика сводится к *подготовке и верификации исходных данных на входе в компьютер и к валидации результатов его работы на выходе*. В противном случае конструктор неизбежно превращается в «рисовальщика», а расчётчик – в оператора по загрузке компьютера малопродуктивной работой.

3 Пути повышения качества цифровых технологий проектирования

Возможности по достижению требуемой точности *динамической модели* достаточно очевидны. Прежде всего необходимо иметь методики проектирования и конструирования изделий, которые необходимы для повышения эффективности принимаемых человеком решений и выполнения им чётких действий. На практике добиться этого достаточно просто: для каждого типа изделия разрабатываются формализованные принципы проектирования и правила конструирования [6], что позволяет избежать неоправданных ошибок, которые по тем или иным причинам невозможно обнаружить при разработке цифровой модели и нельзя учесть в математической модели.

При проектно-конструкторских разработках сложно избежать ошибок (пропуск графических элементов чертежа, неустановление требований, упущение смысловых нюансов, задание не тех допусков, не задание твёрдости или шероховатости рабочих поверхностей и т.п.). Количество таких ошибок резко возрастает при разработках в условиях ограниченного времени. Для их обнаружения необходим беспристрастный критически настроенный проверяющий, который думает не о том, как конструкция должна работать без сбоев, а о том, по какой причине она непременно не будет работать так, как это задумал конструктор. Данный аспект связан с тем, что разработчик всегда склонен находить оправдания своим решениям.

Наконец самое главное – это использование новых методик обеспечения работоспособности и надёжности, позволяющих выявлять причины отказов на ранних стадиях жизненного цикла (ЖЦ). Такие методики разработаны для высоконадёжных изделий единичного изготовления [6], в частности для механических устройств раскрытия конструкций космических аппаратов. Их концепция целиком вписывается в условия реализации Индустрии 4.0.

4 Конструкторско-технологический анализ надёжности

Традиционные методы классической теории надёжности основаны на сборе и обработке данных об отказах изделий при эксплуатации и выявлении логико-математических связей между показателями надёжности и параметрами конструкции для прогнозирования частоты отказов. Новые методы достижения надёжности связаны с обеспечением стабильности параметров конструкции (во времени). Это осуществляется с помощью процедур, применяемых при проектировании, конструировании и технологической подготовке производства, которые базируются на соблюдении физических законов и исключении ошибок при разработке конструкторской и технологической документации. Базовым методом новой методики обеспечения надёжности является конструкторско-технологический анализ надёжности (КТАН) [6], который подразумевает проведение оценок надёжности. Однако смысл таких оценок заклю-

чается не в получении частотных характеристик отказов реальных объектов во времени, а в своевременном обнаружении и смягчении (предупреждении) последствий отказов на основе анализа моделей: *цифровой* и *математической*. Если использовать терминологию цифровых разработок, то в классическом понимании показатели надёжности можно получить только на основе изучения вероятностно-статистических моделей надёжности *цифровой тени* при реализации генеральной совокупности. На практике, если результаты *цифровой квалификации* изделия и оценки надёжности методами КТАН удовлетворяют установленным критериям, например, расчётная вероятность безотказной работы выше заданного уровня и точность *динамической модели* не ниже допустимой, то этого может быть вполне достаточно для подтверждения заданной работоспособности и надёжности. В некоторых случаях исследование надёжности можно проводить на *цифровых двойниках*, например, при оценке ресурса работы изделия.

КТАН может использоваться на каждой из стадий проектно-конструкторско-технологических работ ЖЦ, проведение такого анализа является целенаправленной итерационной процедурой. Всякое новое конструкторско-технологическое решение в процессе разработки приводит к обновлению исходных данных и повторению итерационного цикла анализов.

4.1 Анализ-инициализация

Анализ-инициализация – это перевод чертёжно-технической документации в параметрическую модель функционирования. Если рассматривать данную процедуру в терминах цифровых технологий, то в качестве чертёжно-технической документации могут быть использованы цифровые модели, заданные условия и режимы эксплуатации, требуемые условия функционирования.

Анализ-инициализацию проводят последовательно:

1) декомпозируют конструкцию на конструктивные узлы, простейшие механизмы, функциональные группы и интерфейсы до уровня элементов, в которых может быть реализован режим точки единичного отказа.

Например, для однозвенной поворотной штанги космического аппарата одной из точек единичного отказа является шарнирный узел поворота.

2) выявляют полную функциональность (набор функций), способную удовлетворить заданные и подразумеваемые потребности, и делают словесное описание отказов как гипотетических ситуаций, препятствующих выполнению рассматриваемых функций.

Например, для шарнирного узла штанги отказами являются нарушение условий прочности (разрушения и деформации) и невозможность поворота в шарнире (без разрушений и деформаций);

3) фиксируют конкретные причины отказов при худших сочетаниях факторов режимов (включая состояние изделия после изготовления) и условий эксплуатации. Поскольку отказ может быть вызван одновременно несколькими причинами, то каждая из них становится привязанной к конкретному конструктивному элементу или узлу изделия, что автоматически указывает на его критичность.

Например, для поворотной штанги разрушение шарнира определяется сочетанием максимальной нагрузки и минимальной возможности конструктивного элемента сопротивляться ей (неудачный выбор конструкционного материала или назначение геометрических размеров и допусков поперечного сечения), а невозможность совершения относительных поворотов в шарнире может быть вызвана:

- *его запрессовкой из-за наихудшего сочетания радиальных зазоров после изготовления, толщины твёрдой смазки, механических нарушений трибосопряжения и воздействия теплового поля;*
- *заклиниванием из-за наихудшего сочетания осевого зазора и теплового перемещения элементов конструкции шарнира;*
- *торможением из-за худшего сочетания движущего момента на приводе и моментов сил сопротивления в шарнире при аномально низкой температуре;*

- невключением привода в шарнире из-за отказа, например вследствие производственного брака;
- зацеплением поворотной конструкции из-за ошибок проектирования, в результате которых на пути движения может возникнуть препятствие.

4) определяют свойства критичных элементов конструкции, наличие которых делает невозможной каждую из причин отказов (процедура реализуется методом парирования).

Например, для парирования отказов в шарнире поворотной конструкции необходимо:

- обеспечить необходимую несущую способность шарнира, исключающую отказы по условиям прочности;
- установить значения радиальных зазоров в шарнире, которые при худших сочетаниях толщины смазки, возможных механических нарушений трибосопряжений и тепловых воздействий не вызывают запрессовки шарнира;
- установить осевые зазоры в шарнире больше, чем относительные тепловые деформации в шарнире Δl ;
- обеспечить требуемый запас движущего момента на приводе, который приводит к устойчивому движению с заданными параметрами раскрытия;
- выбрать привод с требуемой вероятностью включения $R_d \geq R_{lim}$;
- доказать, что поворотная конструкция имеет траектории движения свободные от зацеплений за смежные конструкции, в том числе из-за возможных неконтролируемых положений нежёстких конструктивных элементов в невесомости.

Выполнение процедуры парирования возможных причин отказов приводит к составлению вектор-столбцов параметров, которые должны быть присущи конструкции, чтобы исключить причины возможных отказов. Для шарнира поворотной конструкции, используемой в качестве примера, вектор-столбец параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, выглядит следующим образом:

$$(1) \quad X = (T, \Delta_0, \Delta_{sh}, M_{дв}, R_d, Q_{st})^T,$$

где

T – несущая способность шарнира;

Δ_0 – радиальный зазор в шарнире;

Δ_{sh} – осевой зазор в шарнире;

$M_{дв}$ – движущий момент в шарнире;

R_d – надёжность включения привода;

Q_{st} – вероятность зацепления поворотной конструкции.

5) каждое из свойств критичных элементов определяют с помощью параметров, которые характеризуют отношения элементов конструкции как взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие внутри конструкции и вне её.

Параметры определяются:

- T взаимодействием объекта с внешней средой посредством нагрузки N ;
- Δ_0 – взаиморасположением оси и проушины шарнира в радиальном направлении, их взаимосвязью через твёрдую смазку, взаимодействием с внешней средой при тепловом воздействии среды или путём попадания абразивных частиц из окружающей среды в радиальный зазор;
- Δ_{sh} – взаиморасположением оси и проушины шарнира в осевом направлении и взаимодействием с внешней средой при тепловом воздействии;
- $M_{дв}$ – взаимосвязью с сопротивлением повороту в шарнире M_c и взаимодействием с температурой внешней среды, приводящей к увеличению сопротивления;
- R_d – взаимодействием с приводом;
- Q_{st} – взаиморасположением поворотной конструкции с внешними объектами.

6) каждому параметру определяют диапазон допустимых значений исходя из требований технического задания на разработку (представления изделия с точки зрения заказчика) и конструктивного исполнения изделия (представления конструкции изделия с точки зрения разработчика).

В результате вектор-столбец (1) может быть преобразован следующим образом

$$(2) \quad D_x = \left\{ \begin{array}{l} T > N \\ \Delta_0 > 0 \\ \Delta_{sh} > \Delta l \\ M_{дв} > M_c \\ R_d \geq R_{lim} \\ Q_{st} \rightarrow 0 \end{array} \right\}.$$

Множество D_x (2) является представлением будущего изделия в виде параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации.

4.2 Оценка теоретической надёжности

Оценка теоретической надёжности по проектным параметрам объекта – это расчёты надёжности в том смысле, как это понимается в современной инженерии. Отличие в том, что в новой методике расчёты надёжности проводят по каждому параметру в отдельности (определяется условная вероятность) и затем производится интегрирование условных вероятностей для получения полной надёжности [6–8]. Предусмотрены два метода оценки теоретической надёжности: детерминированный (путём задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы гарантировать нахождение их значений в допустимой области) [6] и стохастический (путём оценки конструкционной индивидуальной надёжности [7], суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействий и технологий изготовления изделий).

В качестве примера приведём оценку надёжности поворотной штанги детерминированным методом с учётом (2). Запишем параметрическую надёжность штанги в виде

$$(3) \quad \begin{aligned} R_1 &= P(\underline{T} > \bar{N}); \\ R_2 &= P(\underline{\Delta}_0 > 0); \\ R_3 &= P(\underline{\Delta}_{sh} > \Delta \bar{l}); \\ R_4 &= P(\underline{M}_{дв} > \bar{M}_c); \\ R_5 &= R_d; \\ R_6 &= 1 - Q_{st}. \end{aligned}$$

Каждая из составляющих параметрической надёжности (3) определяется с учётом обеспечения конструктивных запасов:

- резервирования путём m -ой кратности структурного резервирования для определения $R_5 = 1 - (1 - R_d)^{m+1}$;
- нормированных коэффициентов безопасности и запасов прочности для определения $R_1 = P(T/\eta > fN)$;
- запасов движущих моментов для определения $R_4 = P(\underline{M}_{дв} > kM_c)$;
- параметрической избыточности в виде силовых и температурных развязок, например для определения $R_3 = P(\underline{\Delta}_{sh} > \Delta \bar{l})$, когда конструктивными методами достигается условие $\underline{\Delta}_{sh} \gg \Delta \bar{l}$ (если из двух шарниров, образующих единую ось вращения, один не имеет ограничений по перемещению вдоль оси);
- процедур получения гарантированных результатов с использованием, например, минимаксных критериев для определения $R_2 = P(\underline{\Delta}_0 > 0)$, когда могут быть применены геометрические построения (3D-моделирование), либо факторов инженерной психологии для определения $R_6 = 1 - Q_{st}$ с учётом критического анализа ошибок проектирования, допускающих несанкционированные действия человека при работе с изделием.

Суммарная надёжность с учётом $R_1 \dots R_6$ определяется по формуле

$$(4) \quad R = \prod_{i=1}^n R_i.$$

При соответствующем выборе конструктивных запасов при определении проектно-конструкторских параметров теоретически может быть достигнута надёжность $R \equiv 1$. На основании формулы (4) производится подтверждение того, что выбранные значения параметров соответствуют требованиям технического задания, если $R > R_{зад}$.

4.3 Анализ соответствия

Суть анализа соответствия проектных параметров требованиям конструкторской и технологической документации заключается в том, чтобы убедиться, что выбранные проектные параметры функционирования соответствуют требованиям, установленным в документации согласно формуле

(5) 1 параметр : \Leftrightarrow минимум 1 требование.

Исходя из (5) каждому параметру должно быть предусмотрено соответствующее требование для изготовления и/или эксплуатации, выполнение которого может быть проверено средствами технического контроля.

4.4 Оценка рисков

Оценка рисков возникновения отказов вследствие неустановления требований в *документации*, т.е. по состоянию «как есть». Нерелевантность параметров и требований конструкторской и/или технологической документации, риски невыполнения или ненадлежащего выполнения требований при изготовлении рассматриваются как события C_i , где индекс i соответствует i -му элементу рассматриваемой системы. Вероятность совершения каждого из таких событий в формуле (3) может быть определена в виде

$$(6) \quad P(C_i) = \alpha_i R_i,$$

где α_i – корректирующие коэффициенты, которые могут быть получены экспертным путём, например, с применением шкалы балльных оценок критичности отказов согласно [8].

Для вычисления окончательной вероятности выполнения функции с учётом (3) и состояния конструкторской и технологической документации (6) используют формулу

$$(7) \quad P(C) = \prod_{i=1}^n P(C_i).$$

4.5 Окончательной оценка надёжности

Окончательная оценка надёжности с учётом *теоретической надёжности* и *рисков* возникновения отказов производится с учётом (7) по формуле $P(C) > R_{\text{зад}}$.

Последние три процедуры отражают новый подход к анализу и оценке надёжности, целесообразность которых возникает при требованиях к безотказности выше 0,999, т. е. для высокоответственных изделий. Смысл проведения анализа и оценки рисков возникновения отказов из-за нерелевантности проектных параметров требованиям *документации* вытекает из простой логики. Исходя из оценки *теоретической надёжности* можно получить расчётно-экспериментальный результат, согласно которому следует, что все параметры выбраны верно. Но такая оценка не учитывает, что не отражение или нечёткость любого из параметров в требованиях документации способна привести к непредвиденному отказу (как правило, с малой вероятностью). Например, отказ может оказаться следствием неопределённости требований по умолчанию⁴. Документация должна содержать все необходимые и достаточные требования, тогда их строгое выполнение приведёт к реализации проектных параметров.

Оценка теоретической надёжности является процедурой верификации параметров функционирования, а оценка рисков – это валидации соответствия реального объекта технической документации.

5 Об обязательности проведения анализов

Методика КТАН основана на парадигме А.И. Уёмова о триединстве вещей, их свойств и отношений [9], который, в свою очередь, опирался на модель Аристотеля. При этом отношения рассматриваются как взаиморасположение, взаимосвязь и взаимодействие вещей при определении свойств [6]. Такое понимание позволяет определять любые свойства через от-

⁴ Умолчание – соглашение о характеристике языкового объекта или выполняемом действии при отсутствии их явного описания [10].

ношения физических объектов, а сами свойства выражать количественно через параметры и показатели. Допустимые значения параметров определяются заданными требованиями технического задания на разработку и конструктивным исполнением изделия. В методике КТАН *цифровая модель* строится на основе определения взаиморасположения и взаимосвязей элементов конструкций, а *математическая модель* – с учётом взаимодействий объектов реального мира. Таким образом реальные объекты представляются в виде набора свойств, которые могут быть выражены через параметры с допустимыми границами изменения их значений. Такой подход универсален и может быть реализован при рассмотрении свойств как гипотетических отношений вещей, проявление которых в реальном мире возможно и вероятно. Сочетая в моделях предельные отношения свойств вещей, можно исследовать *динамическую модель* в критических ситуациях, приближая её к *цифровому двойнику*.

Указанный подход в процессе цифровых разработок позволяет:

- выявлять и принимать меры по устранению отказов на ранних этапах ЖЦ путём парирования причин возможных отказов за счёт придания будущему изделию предписанных свойств соответствующих критичных элементов;
- дополнять цифровые модели информацией, которую в виртуальной реальности человеку невозможно представить без применения органолептических методов;
- уйти от стереотипов при проведении расчётов, которые характерны для длительной практики конструкторских разработок однотипной продукции, и не всегда отражают целесообразность, необходимость и достаточность их применения с точки зрения обеспечения заданной работоспособности и надёжности;
- дополнить математические модели вероятностными моделями поведения элементов конструкций с сингулярностями, нелинейностями, логико-вероятностными зависимостями, статистическими закономерностями и пр.;
- определять целесообразность и критерии проведения анализов, расчётов⁵, экспериментов⁶, опытов и испытаний⁷ с целью получения необходимой информации для построения моделей.

Заключение

Производя компьютерные вычисления, необходимо заботиться о максимальном снижении доли человеческих ошибок в исходных данных и повышении знаний о физической природе мира. Анализы, подобные КТАН, позволяют балансировать на грани виртуальной реальности цифровых моделей и реальности физического мира, и на этом балансе производить валидацию конструкторских разработок до момента вывода их на стадию производства. Это позволит повысить качество разработок сложных изделий с малой вероятностью отказов.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НИР «Гарантия-2021-НПО ПМ МКБ» согласно Федеральной космической программе России на 2016-2025 годы.

⁵ Расчёт – документ, содержащий расчёты параметров и величин, например, расчёт на прочность и др. [11].

⁶ Эксперимент – система операций, воздействий и/или наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях [12].

⁷ Испытание – экспериментальное определение количественных и/или качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и/или воздействий [13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Шваб, К. Четвёртая промышленная революция. – М.: Эксмо, 2016. – 138 с. – ISBN 978-5-699-90556-0.
- [2] Богданов, А.А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). – М.: Экономика, 1989. – Кн. 1. – 304 с. – ISBN 5-282-00538-7.
- [3] Акоф, Р. Основы исследования операций / Р. Акоф, М. Сасиени. Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 533 с.
- [4] Боровков, А.И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин и др. // Оборонная техника. – 2018. – № 1. – С.6–33.
- [5] Кулешов, А.П. Преодолеть сопротивление материалов [интервью с ректором Сколтеха, акад. РАН / записал А. Механик] // Стимул: журнал об инновациях в России. – https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295.
- [6] Похабов, Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 338 с. – ISBN 978-5-7638-3812-1.
- [7] Тимашев, С.А. Инфраструктуры. Т. 1: Надёжность и долговечность. – Екатеринбург, 2016. – 530 с. – ISBN 978-5-7691-2434-1.
- [8] ГОСТ 27.310-95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analysis. Basic principles. Актуализация 12.09.2018.
- [9] Уёмов, А.И. Вещи, свойства и отношения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 184 с.
- [10] ГОСТ 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015) Информационные технологии (ИТ). Словарь. Information technologies. Vocabulary. Дата введения 2017-09-01.
- [11] ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов. Unified system for design documentation. Types and sets of design documentation. Дата введения 2014-06-01.
- [12] ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. Research tests. Experiment planning. Terms and definitions. Дата введения 1981-01-01.
- [13] ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. Дата введения 1982-01-01

DESIGNING COMPLEX PRODUCTS WITH SMALL PROBABILITY OF FAILURE IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Yu.P. Pokhabov

JSC "NPO PM SDB", Zheleznogorsk, Russia
pokhabov_yury@mail.ru

Abstract

The success of the transition to digital design and engineering in Industry 4.0 is determined not only by the improvement of technical and computer-aided design tools, but also by the efficiency of human activity in their use. One of the challenges of the new industrial revolution is to increase the professional level of designers and developers in the field of preparing and verifying initial computer input data validating the results of its work at the output. This mainly concerns the most time-consuming and responsible work on the design of complex products with a low probability of failure. The result can be achieved through the use of new methods of design and technological analysis to mitigate or eliminate human errors when making technical decisions. Using the methods of design & technology reliability analysis does not violate the natural course of the design and development processes, while providing a justification of the parameters of operation, which is necessary for making faultless design decisions. For this purpose, analysis methods are used, which allow to submit design documentation in the form of a parametric model of operation. This model allows simulating emergency situations with the worst combinations of modes and operating conditions, which is impossible to achieve with experimental testing. Based on such modeling, reasonable design decisions are made that exclude potential failures. To eliminate low probability failures, an original option is provided, which allows establishing the necessary and sufficient requirements in the design documentation to achieve defect-free production.

Keywords: Industry 4.0, digital twin, digital shadow, small probability of failures, design & technology reliability analysis (DTRA).

Citation: Pokhabov YuP. Designing complex products with small probability of failure in the context of Industry 4.0 [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(1): 24-35. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-24-35.

Acknowledgment

The work was partially supported from the research project “Garantiya-2021- NPO PM SDB” according to the Federal Space Program of Russia for 2016-2025.

References

- [1] Schwab K. Chetvortaya promyshlennaya revolyutsiya [The Fourth Industrial Revolution]. – Moscow: Eksmo, 2016. – 138 p. – ISBN 978-5-699-90556-0. [In Russian].
- [2] Bogdanov AA. Tektologiya: (Vseobshchaya organizatsionnaya nauka) [Tectology: (Universal organizational science)]. – Moscow: Ekonomika, 1989. – B. 1. – 304 p. – ISBN 5-282-00538-7. [In Russian].
- [3] Akof RL, Sasieni MW. Fundamentals of operations research. – John Wiley and sons, NY, 1968.
- [4] Borovkov AI, Ryabov YuA, Kukushkin KV. et al. [Digital counterparts and digital transformation of enterprises DIE] / *Oboronnaya tekhnika*. – 2018; 1: 6–33. [In Russian].
- [5] Kuleshov AP. [Overcome the resistance of materials] [interview with the Skoltekh rector, acad. RAS / recorded A. Mechanic] // Stimul: zhurnal ob innovatsiyakh v Rossii [In Russian] – https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295.
- [6] Pokhabov YuP. Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srabatyvaniya [Theory and practice of ensuring the reliability of mechanical devices of one-time operation]. – Krasnoyarsk: SFU, 2018. – 338 p. – ISBN 978-5-7638-3812-1. [In Russian].
- [7] Timashev SA. Infrastruktury. T. 1: Nadezhnost i dolgovechnost [Infrastructure. Vol. 1: Reliability and durability]. – Yekaterinburg, 2016. – 530 p. – ISBN 978-5-7691-2434-1. [In Russian].
- [8] GOST 27.310-95. Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analysis. Basic principles. [In Russian]. Update: 12.09.2018.
- [9] Uyomov AI. Veshchi, svoystva i otnosheniya [Things, properties and relationships]. – Moscow: USSR Academy of Sciences, 1963. – 184 p. [In Russian].
- [10] GOST 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015) Information technologies. Vocabulary. [In Russian]. Publication date: 2017-09-01.
- [11] GOST 2.102-2013 Unified system for design documentation. Types and sets of design documentation. [In Russian]. Publication date: 2014-06-01.
- [12] GOST 24026-80 Research tests. Experiment planning. Terms and definitions. [In Russian]. Publication date: 1981-01-01.
- [13] GOST 16504-81. The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. [In Russian]. Publication date: 1982-01-01.

Сведения об авторе



Похабов Юрий Павлович, 1959 г. рождения. Окончил филиал Красноярского политехнического института (завод-ВТУЗ, ныне – СибГУ им. М.Ф. Решетнёва) в 1982 г. Область интересов: проектирование, конструирование и обеспечение надёжности конструкций космических аппаратов. Канд. техн. наук (2013). Автор более 50 научных работ, в том числе 2 монографий.

Yuri P. Pokhabov (b. 1959). Graduated from the branch of the Krasnoyarsk Polytechnic Institute (currently – Reshetnev Siberian State University of Science and Technology) in 1982. Area of interests: design, develop and maintenance of reliability of structures of spacecraft. Ph.D (2013). Author of more than 50 scientific works, including 2 monographs.