

Для цитирования

Смелов В.Ю. Практические аспекты подтверждения качества при производстве технически сложных систем / III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов, Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 262–269.

УДК 658.562

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ КАЧЕСТВА
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Смелов В.Ю., канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», «ГПБ Комплект» (АО), г. Москва

Рассмотрены практические аспекты подтверждения качества при производстве технически сложных систем (ТСС). Показано, что рост сложности неизбежно ведет к увеличению рисков, влияющих на качество и надежность. Проанализированы экономические закономерности (график десятикратного увеличения затрат), показана взаимосвязь этапов проектирования и производства с качеством эксплуатации. Предложены методы управления рисками и предупреждения отказов (FMEA) и методы статистического управления процессами (SPC). Приведены рекомендации по интеграции этих подходов в систему менеджмента качества (СМК) высокотехнологичных производств.

Ключевые слова: технически сложная система, управление качеством, обеспечение качества, надежность, FMEA, SPC, риск, жизненный цикл, проектирование, производство, система менеджмента качества.

**PRACTICAL ASPECTS OF QUALITY ASSURANCE IN THE PRODUCTION OF TECHNICALLY
COMPLEX SYSTEMS**

Smelov V.Y., PhD in Engineering, Plekhanov Russian University of Economics, “GPB Complect” JSC, Moscow

The paper considers practical aspects of quality assurance in the production of technically complex systems (TCS). It is shown that the growth of system complexity inevitably leads to an increase in risks affecting quality and reliability. The economic pattern of the “tenfold cost increase” is analyzed, and the relationship between design and production stages and the quality of operation is demonstrated. Methods of risk management and failure prevention (FMEA), as well as statistical process control (SPC) tools, are proposed. Recommendations are given for the integration of these approaches into the quality management system (QMS) of high-tech enterprises.

Keywords: technically complex system, quality management, quality assurance, reliability, FMEA, SPC, risk, life cycle, design, production, quality management system.

Введение

Технически сложные системы (ТСС) – это изделия и комплексы, содержащие большое число взаимосвязанных подсистем (аппаратных, программных, электронных, мехатронных и т.д.), часто разрабатываемые и эксплуатируемые в условиях высокой ответственности (авиация, космос, медицина, строительство, энергетика). Подтверждение качества таких систем требует системного подхода, сочетания инженерных практик, управленческих процедур и статистических методов контроля и обеспечения качества.

Целью работы служит анализ и систематизация практических подходов к подтверждению качества при производстве ТСС, а также разработка предложений по интеграции проектных и производственных инструментов управления качеством для

снижения эксплуатационных рисков, что, в свою очередь, должно привести к повышению надежности конечного изделия и удовлетворенности потребителей, в качестве которых в рамках данной работы прежде всего рассматривается эксплуатант.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть понятие сложности как фундаментальное свойство технических систем.
2. Проанализировать зависимость затрат на исправление дефектов от этапа жизненного цикла.
3. Предложить методы предупреждения отказов и управления рисками на стадии проектирования.
4. Рассмотреть инструменты инспекционного контроля и применения методов SPC в рамках этой деятельности для подтверждения качества, надежности и безопасности конечного изделия, представляющего собой ТСС.

Сложность как фундаментальное свойство технических систем

Любая техническая система представляет собой не просто совокупность взаимосвязанных элементов, а организованные иерархические структуры, функционирование которых определяется множеством нелинейных взаимодействий. Понятие сложности в отношении таких систем имеет фундаментальный характер и отражает не только количественные параметры – число компонентов, связей и состояний, – но и качественные характеристики: самоорганизацию, адаптивность и устойчивость к внешним возмущениям [1]. При этом сама система согласно определению доктора У.Э. Деминга – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, объединенных общей целью. Если нет цели, то нет и системы [2].

Классические труды по сложным системам, начиная с работ Н. Винера, Г. Гуда и Р. Мэкола, а также У. Р. Эшби, заложили основу понимания сложности как необходимого условия устойчивости и управляемости систем. Эшби в «Введении в кибернетику» сформулировал принцип необходимого разнообразия, согласно которому только система, обладающая достаточным внутренним разнообразием, способна эффективно реагировать на внешние воздействия [3]. Винер, в свою очередь, показал, что управление сложными системами требует наличия обратных связей и способности перерабатывать информацию в режиме адаптации [4]. Эти идеи легли в основу системного мышления, развитого Р. Акоффом, который трактовал сложность как проявление целостности и целеустремленности организационно-технических систем [5].

Гуд и Мэкол в фундаментальной монографии «Системотехника» определили сложные системы как объекты, чье поведение невозможно полностью описать с помощью аналитических моделей из-за высокой степени взаимодействия между элементами и наличия стохастических факторов [6]. Они подчеркивали, что для таких систем важна не только разработка оптимальной структуры, но и обеспечение надежности функционирования при неизбежных неопределенностях среды. В этом контексте управление сложными системами на всех этапах их существования рассматривается как мультидисциплина, объединяющая инженерные, математические и организационные методы для управления сложностью.

Сложность – это не просто свойство технических систем, а их естественное состояние, обусловленное стремлением к повышению функциональности и эффективности. С увеличением числа взаимосвязей возрастает не только потенциальная производительность, но и уязвимость – любое изменение в одном компоненте способно вызвать непредсказуемый каскад эффектов. Именно поэтому подтверждение качества и надежности таких систем требует системного подхода, включающего анализ рисков, проектирование с избыточным резервированием и запасом, а также постоянную работу с обратной связью на всех этапах жизненного цикла.

Таким образом, сложность выступает как фундаментальное условие существования технических систем, формируя требования к методам проектирования, производственного контроля и последующей эксплуатации. Она определяет необходимость перехода

от линейного инженерного мышления к системно-статистическому подходу Шухарта-Деминга, где качество – это не конечный результат, а динамическое свойство, поддерживаемое в процессе функционирования.

Правило десятикратного увеличения затрат

Авторство правила десятикратного увеличения затрат часто приписывается Ст. Биру, однако подробное изучение трудов британского кибернетика, переведенных на русский язык, не позволило ни подтвердить, ни опровергнуть это утверждение [7]. Приведенный на рис. 1 график десятикратного увеличения затрат визуализирует данное правило.

Правило десятикратного увеличения затрат нельзя считать жестким правилом или строгой моделью, оно скорее отражает эмпирическую закономерность роста стоимости устранения дефектов по мере продвижения системы по стадиям жизненного цикла. Согласно данному правилу затраты на исправление ошибки, допущенной на этапе проектирования, возрастают примерно в 10 раз при переходе к производству и еще в 10 раз при выявлении той же ошибки в процессе эксплуатации. Так, если на этапе проектирования дефект можно устранить корректировкой документации или модели, то на производстве это уже требует переделки узлов, вмешательства в технологический процесс и переналадки технологического оборудования, а также производства исправленных узлов и компонентов и повторных испытаний. В эксплуатационной фазе последствия ошибки становятся наиболее затратными: сюда входят ремонт, отзыв изделий, включая возможные высокие затраты на логистику, простои и репутационные потери.

Таким образом, правило десятикратного увеличения затрат подчеркивает ключевое значение раннего выявления и предупреждения возможных дефектов как основы эффективного управления качеством ТСС.

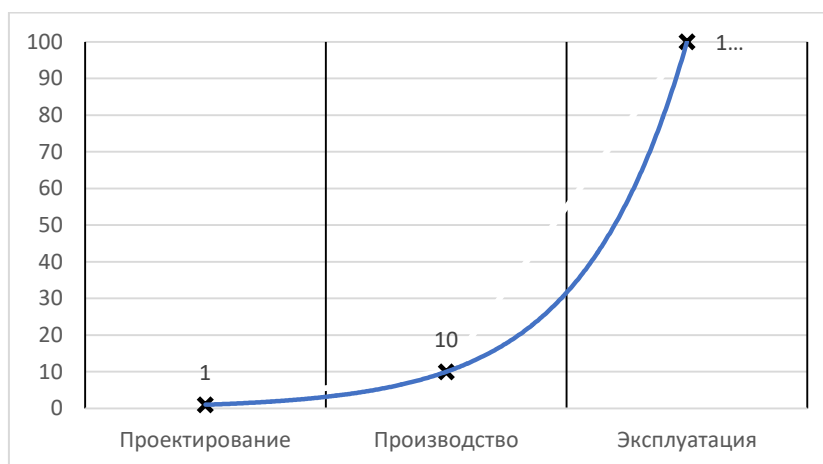


Рис. 1. График десятикратного увеличения затрат

Теперь стоит обратить внимание еще на один этап, который обычно входит в проектирование, но с точки зрения подтверждения качества это существенно важный момент. Речь идет об этапе определения требований к ТСС, то есть к разработке и согласованию технического задания (ТЗ). Критерием эффективности данного этапа можно считать однозначность понимания требований как заказчиком, так и производителем. Надлежащая организация работ на данном этапе позволяет минимизировать потери примерно по тому же принципу, в том числе и за счет того, что не придется на позднем этапе уточнять и менять исходные требования, которые, в свою очередь, могут привести как к дорогостоящим изменениям конструкторской документации, так и к вмешательству в производственный процесс. Потому рис. 1 можно дополнить и представить в виде рис. 2.

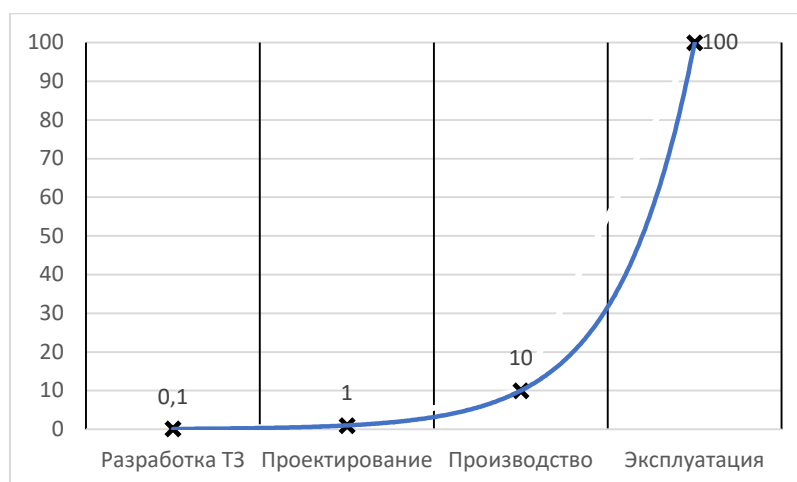


Рис. 2. График десятикратного увеличения затрат с учетом разработки ТЗ

На этом стоило бы остановиться, но реальная жизнь, как всегда, намного сложнее. Дело в том, что определить требования и спроектировать ТСС идеально недостаточно. Следует не менее идеально выполнить этап производства. По сути дефекты можно разделить на три группы: конструктивные, производственные и эксплуатационные. Если в рамках данной работы мы не говорим об эксплуатационных дефектах, так как речь идет все-таки о качестве производства, включая проектирование, то исключить возможные отклонения на этапе производства в реальной жизни мы не можем.

Таким образом график на рис. 2 после дополнения его производственными и эксплуатационными дефектами можно представить следующим образом (рис. 3). Графики десятикратного увеличения затрат на рис. 3 представлены в усеченном виде, и на рисунке можно увидеть только то, что производственные дефекты, произошедшие по причинам нарушения требований конструкторской документации и технологии производства, могут обойтись в два раза дороже, так как их устранение потребует повторного производства как отдельных узлов и компонентов, так и ТСС в целом. Тут же показаны возможные затраты эксплуатационных дефектов, которые, в свою очередь, также могут привести к тому, что ТСС придется произвести повторно, но это, конечно же, крайний случай, хотя отдельные виды ремонта могут оказаться дороже, чем производство продукции заново.

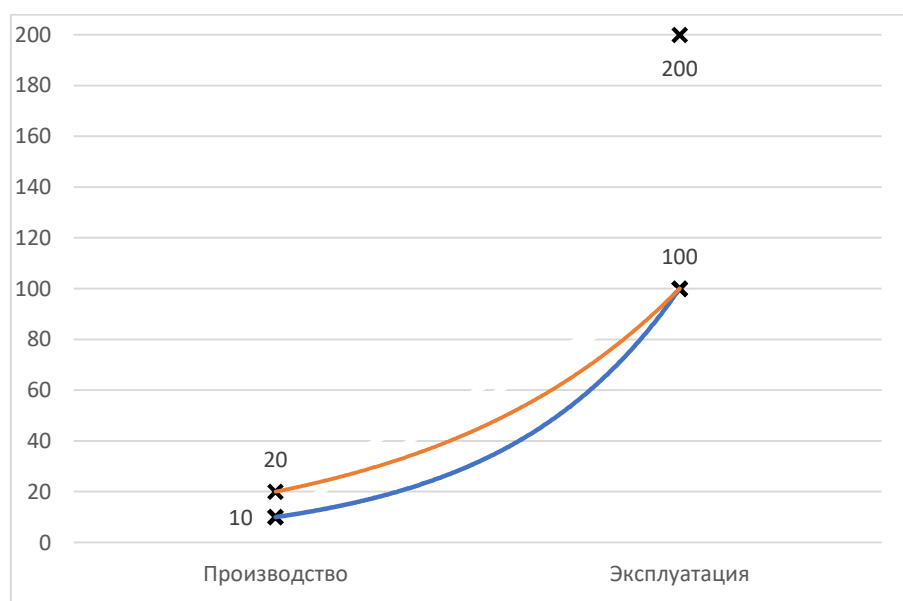


Рис. 3. Усеченные графики увеличения затрат для конструктивных (синим), производственных (оранжевым) и эксплуатационных (отдельная точка сверху справа) дефектов

Повышение качества проектирования, включая разработку ТЗ, с применением методов системно-статистического мышления

Практическое следствие из рассмотренных выше аспектов – при росте сложности технической системы резко увеличивается число потенциальных точек отказа и неопределенностей, что делает целесообразным и эффективным более тщательную проработку ТЗ и проектирования.

На сегодняшний день с системно-статистической точки зрения самым мощным инструментом перевода пожеланий заказчика в технические и технологические требования, включая методы контроля и подтверждения выполнения этих требований, следует считать структурирование качества по функциям (QFD).

Методология структурирования качества по функциям (QFD – Quality Function Deployment) применяется на ранних этапах жизненного цикла ТСС для преобразования потребностей заказчика в конкретные инженерные параметры изделия [8]. На стадии формирования исходных технических требований QFD обеспечивает системный перевод «голоса клиента» (Voice of Customer) в функциональные характеристики конечного продукта на техническом языке, а также разработку, возможную к реализации технологии производства с учетом имеющихся ограничений, в том числе временных и финансовых.

В качестве инструмента реализации методологии QFD используется так называемый «дом качества» (House of Quality), где осуществляется матричное сопоставление требований потребителя, функций системы и проектных решений. Это позволяет выявить приоритеты, определить критические характеристики и сбалансировать технические и экономические параметры будущей ТСС. Применение QFD при разработке ТЗ снижает риск искажения требований и обеспечивает согласованность между проектировщиками, технологами и конечным заказчиком.

Что касается самого этапа проектирования, то здесь целесообразно применять метод анализа видов и последствий потенциальных отказов. Метод FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) на этапе проектирования служит инструментом раннего предупреждения потенциальных дефектов и снижения риска непредвиденных ошибок в ТСС [9]. Анализ начинается с идентификации функций системы и возможных способов их отказа, после чего оцениваются значимость последствий (S – Severity), вероятность возникновения (O – Occurrence) и вероятность (возможность) обнаружения (D – Detection) каждого потенциального отказа. Как правило, каждый потенциальный отказ оценивается группой экспертов по десятибалльной шкале, а потом полученные значения перемножаются. Итоговый показатель называется приоритетным числом риска (ПЧР или RPN – Risk Priority Number), на основании которого разрабатываются корректирующие меры: изменение конструкции, выбор материалов, добавление резервирования или дополнительных контрольных процедур и испытания. Применение FMEA позволяет выявлять критические узлы еще до прототипирования, снижает вероятность дорогостоящих исправлений на последующих стадиях и повышает надежность ТСС в эксплуатации. Таким образом, FMEA обеспечивает системный подход к управлению рисками еще на стадии проектирования, минимизируя влияние человеческого фактора и неопределенностей среды.

Обеспечение качества (QA) при производстве ТСС с применением методов SPC

На сегодняшний день основным методом обеспечения качества (QA – Quality Assurance) при производстве ТСС считается инспекционный контроль (Inspection Control) в соответствии с планами качества (Control Plan). Данный подход зарекомендовал себя в атомной, авиационной и автомобильной промышленности. Также он довольно эффективно применяется в аэрокосмической и судостроительной промышленности. План качества включает в себя контрольные точки с разными статусами участия. Например, согласно ГОСТ Р 50.06.01 [10] контрольные точки бывают трех статусов:

1) «Hold Point» – «точка задержки, НР»: Контроль осуществляется путем непосредственного участия в контрольных операциях (испытаниях) с условием, что на время

проведения данных операций производственный процесс должен быть остановлен и его продолжение возможно только после получения удовлетворительного результата их выполнения.

2) «Witness Point» – «точка освидетельствования, WP»: Контроль осуществляется путем наблюдения за ходом технологических и/или контрольных операций (испытаний) без останова производственного процесса.

3) «Witness Point (Report)» – «точка освидетельствования по документам, WP (R)»: Контроль осуществляется по документам путем проверки отчетной документации по результатам проведения соответствующих операций.

При проведении инспекционного контроля применяется множество средств измерений и контроля. Конечно, соблюдение требований обеспечения единства измерений обязательно, но с точки зрения системно-статистического мышления недостаточно. Согласно ряду отраслевых требований к СМК, например, в автомобильной промышленности до начала измерений и сбора данных следует провести анализ систем измерений (MSA). Однако на сегодняшний день существует более проработанная методика EMP III (Evaluating the Measurement Process) [11], которая с некоторыми доработками [12] позволяет принять решение о применении той или иной системы измерений с большей уверенностью.

Также сам план качества или приложения к нему содержат методики контроля и/или испытаний. Данные методики, в свою очередь, для повышения достоверности результатов испытаний и снижения затрат на их проведение можно разрабатывать с применением методологии планирования и организации экспериментов (DOE – Design of Experiments). DOE играет ключевую роль в разработке методик контроля и испытаний технически сложных систем, обеспечивая научно обоснованный подход к выявлению факторов, влияющих на качество и надежность [13]. В отличие от эмпирического подбора параметров DOE позволяет оптимально подобрать параметры контроля и испытаний, определить минимально необходимое количество самих контрольных операций и/или испытаний, а также снизить вероятность ошибок при принятии решений на основе субъективного мнения.

На стадии разработки методик контроля и испытаний DOE используется для определения чувствительности измерительных систем, оценки влияния технологических параметров на результат и установления оптимальных режимов испытаний. Применение факторных, фракционных и ортогональных планов эксперимента обеспечивает статистическую значимость полученных данных и позволяет выявлять скрытые взаимодействия между переменными.

Для сложных систем, где количество факторов велико, DOE интегрируется с методами анализа вариабельности (ANOVA) и SPC, формируя основу для последующей настройки оборудования и разработки стандартных операционных процедур. Такой подход обеспечивает воспроизводимость результатов испытаний и позволяет объективно подтвердить соответствие изделия требованиям исходного ТЗ и конструкторской документации.

Для анализа результатов контроля и испытаний следует использовать методы статистического управления процессами (SPC – Statistical Process Control). Джентльменский набор данных инструментов и их краткий обзор для первого знакомства приведены в книге [14], а более подробно с ними можно ознакомиться в [15].

Ключевым и самым мощным инструментом SPC по праву считаются контрольные карты Шухарта (ККШ). ККШ позволяют оценить стабильность производственных процессов и выявить возможные вмешательства в процесс, что может приводить к тяжелым и дорогостоящим последствиям. При этом существует распространенное заблуждение о том, что ККШ применимы только в условиях массового или серийного производства. К счастью, это не так. Дело в том, что даже самые уникальные ТСС состоят из множества одинаковых или схожих элементов, например резбовых, сварных или клепочных соединений, от качества которых в значительной мере зависит надежность всей системы в целом при эксплуатации. Также ККШ следует использовать при расчете индексов воспроизводимости процессов (PCI – Process Capability Indexes), которые характеризуют относительное значение фактического

уровня вариабельности в сравнении с требуемым, а также позволяют оценить точность настройки производственного процесса на целевое значение. Более подробно о PCI см. [16].

Выводы и рекомендации

Рассмотренные в работе подходы показывают, что обеспечение качества ТСС возможно только при интеграции методов системно-статистического мышления, инженерных инструментов предупреждения дефектов (FMEA) и методов SPC (ККШ, PCI). Современные тенденции подтверждают необходимость смещения акцента от контроля результата к управлению процессами проектирования, производства и испытаний, что требует развития системы менеджмента качества на уровне всего предприятия.

Во-первых, сложность как фундаментальное свойство ТСС обуславливает необходимость использования не только традиционных процедур контроля, но и формализованных методик анализа рисков и вариабельности. Применение принципа Деминга-Шухарта о том, что качество должно закладываться в процесс, а не проверяться постфактум, обеспечивает основу для повышения надежности и воспроизводимости продукции. Методы QFD, FMEA и DOE в совокупности создают замкнутый цикл управления качеством на стадиях формирования требований, проектирования и подтверждения соответствия.

Во-вторых, эффективность СМК производственного предприятия напрямую зависит от способности интегрировать указанные инструменты в единый контур управления данными и принятия решений. Применение комплекса описанных в данной работе инструментов на практике позволяет обеспечить сквозное преобразование требований заказчика в результаты положительных испытаний конечной продукции и надежного функционирования ТСС при эксплуатации. Создание единого информационного пространства данных позволяет в режиме реального времени выявлять тенденции возможных разладов процессов и инициировать корректирующие действия до возникновения дефектов и наступления негативных последствий.

В-третьих, важным направлением совершенствования СМК становится переход от реактивной модели управления к проактивной, основанной на анализе предиктивных индикаторов. Для этого рекомендуется использовать индексы воспроизводимости процессов (PCI), результаты анализа систем измерений (MSA/EMP III), а также показатели надежности оборудования, включая испытательные стенды, как ключевые метрики эффективности. Их регулярный мониторинг должен входить в состав стандартных операционных процедур и отчетности по качеству.

В-четвертых, особое внимание следует уделять развитию компетенций персонала. Применение рассмотренных методологий требует системной подготовки специалистов – инженеров по качеству, конструкторов и технологов – в области статистических методов, системного анализа и моделирования. Рекомендуется реализовать корпоративные программы обучения системно-статистическому мышлению и методам SPC, DOE, QFD и FMEA, а также использовать накопленный опыт в виде внутренних стандартов и методических руководств.

В заключение следует подчеркнуть, что повышение эффективности СМК производственного предприятия невозможно без перехода к процессной и риск-ориентированной модели управления. Интеграция QFD для перевода требований, FMEA для предупреждения дефектов, DOE для оптимизации испытаний и SPC для поддержания стабильности процессов формируют устойчивую основу для непрерывного совершенствования. Реализация данного подхода позволит существенно снизить издержки, повысить надежность изделий и обеспечить соответствие требованиям заказчиков, повышая их удовлетворенность.

Список литературы

1. Холл А.Д. Опыт методологии для системотехники / Пер. с англ. М.: Советское радио, 1975. – 448 с.
2. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Пер. с англ. 2-е изд. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 419 с.

3. Эшби У.Р. Введение в кибернетику: Пер. с англ. под ред. В.А. Успенского; предисл. А.Н. Колмогорова. Изд. 4-е. – М.: ЛИБРИКОМ, 2009. – 432 с.
4. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. / Пер. с англ. И.В. Соловьева и Г.Н. Поварова под ред. Г.Н. Поварова. 2-е изд. – М.: Наука, 1983. – 340 с.
5. Акофф Р. Планирование будущего корпорации / Пер. с англ. под общ. ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: Прогресс, 1985. – 328 с.
6. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в планирование больших систем / Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1962. – 383 с.
7. Адлер Ю.П., Смелов В.Ю. Системное статистическое мышление: сложные системы и статистическое мышление: учебное пособие. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСИС», 2017. – 88 с.
8. Адлер Ю.П. Сколько ни развертывай, а структурировать все равно придется // Методы менеджмента качества – 2002 – № 3. – С. 16–19.
9. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA. Ссылочное руководство. Пер. с англ. – Н. Новгород: СМЦ «Приоритет», 2012. – 283 с.
10. ГОСТ Р 50.06.01–2017 Национальный стандарт Российской Федерации. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в области использования атомной энергии. – М.: Стандартинформ, 2018. – 48 с.
11. Wheeler, D. (2006). EMP III (Evaluating the Measurement Process): Using Imperfect Data. – SPC Press, Knoxville, Tennessee. – 316 P.
12. Смелов В. Ю., Шпер В.Л. Оценивание вариабельности систем измерений: учебное пособие – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – 122 с.
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Издание второе, переработанное и дополненное. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
14. Статистические методы повышения качества. Под редакцией Хитоси Кумэ. – Перевод с английского и дополнение Ю.П. Адлера, Л.А. Конорева. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
15. Адлер Ю.П., Шпер В.Л. Практическое руководство по статистическому управлению процессами. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 234 с.
16. Смелов В.Ю., Шпер В.Л. Индексы воспроизводимости процессов: учебное пособие – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – 97 с.

References

1. Hall, A.D. A Methodology for Systems Engineering. – Princeton, NJ: D. Van Nostrand, 1962. – 448 p.
2. Deming, W.E. Out of the Crisis. – Cambridge, MA: MIT Press, 1986. – 507 p.
3. Ashby, W.R. An Introduction to Cybernetics. – London: Chapman & Hall, 1956. – 295 p.
4. Wiener, N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. – Cambridge, MA: MIT Press, 1948. – 212 p.
5. Ackoff, R.L. A Concept of Corporate Planning. – New York: John Wiley & Sons, 1970. – 256 p.
6. Goode, H.H., Machol, R.E. System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems. – New York: McGraw-Hill, 1957. – 418 p.
7. Adler, Y.P., Smelov, V.Yu. Sistemnoe statisticheskoe myshlenie: slozhnye sistemy i statisticheskoe myshlenie [Systemic Statistical Thinking: Complex Systems and Statistical Thinking]. – Moscow: NUST “MISiS” Publishing House, 2017. – 88 p.
8. Adler, Y.P. Skol’ko ni razvertyvay, a strukturirovat’ vse ravno pridetsya [However You Unfold It, Structuring Is Still Necessary] // Metody menedzhmenta kachestva [Quality Management Methods]. – 2002. – # 3. – P. 16–19.
9. AIAG & VDA. FMEA Handbook: Failure Mode and Effects Analysis. – Southfield, MI: Automotive Industry Action Group, 2019. – 283 p.
10. GOST R 50.06.01–2017. System of Conformity Assessment in the Field of Nuclear Energy Use. – Moscow: Standartinform, 2018. – 48 p.
11. Wheeler, D.J. EMP III: Evaluating the Measurement Process – Using Imperfect Data. – Knoxville, TN: SPC Press, 2006. – 316 p.
12. Smelov, V.Yu., Shper, V.L. Otsenivanie variabel’nosti system izmerenii [Evaluation of Measurement System Variability]. – Tula: Tula State University Press, 2025. – 122 p.
13. Adler, Y.P., Markova, E.V., Granovsky, Y.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal’nykh uslovii [Design of Experiments for Finding Optimal Conditions]. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Nauka, 1976. – 280 p.
14. Kume, H. Statistical Methods for Quality Improvement. – Tokyo: Japanese Standards Association (JSA), 1985. – 315 p.
15. Adler, Y.P., Shper, V.L. Prakticheskoe rukovodstvo po statisticheskomu upravleniyu protsessami [Practical Guide to Statistical Process Control]. – Moscow: Alpina Publisher, 2019. – 234 p.
16. Smelov, V.Yu., Shper, V.L. Indeksy vosproizvodimosti protsessov [Process Capability Indexes]. – Tula: Tula State University Press, 2025. – 97 p.