



## Введение

### 1 Современное состояние задачи повышения достоверности контроля

- § 1.1. Используемые определения и обозначения
  - § 1.2. Основные модели контроля
    - Оценка достоверности оценки "годен" по среднему арифметическому отклонению параметров от номинала
    - "Двухдопусковый" контроль
    - Связь точности измерения параметров с достоверностью оценки качества при допусковом контроле
  - § 1.3. допусковом контроле
    - Замена допуска на параметр "рабочим" допуском
    - Уменьшение дисперсии результата измерения
  - § 1.4. Пути дальнейшего совершенствования контроля изделий
- Выводы

### 2 Интегральная оценка качества изделий

- § 2.1. Выбор меры качества изделия и его контуров
    - Эффективность изделия
    - Надежность изделия
  - § 2.2. Уравнение надежности контура
    - Гарантийный избыток параметра контура
    - Параметр стандартной цели (СЦ)
    - Параметр контура Delta
    - Неконтролируемые звенья контура
    - Погрешность измерения параметров  $\Delta_{\kappa}$
    - Дрейф параметра после контроля  $\Delta_{\tau}$
    - Функция распределения отклонения параметра стандартной цели  $\Delta_{\zeta}$
    - Методы нахождения коэффициентов влияния звеньев контура
    - Обсуждение результатов вывода уравнения надежности
  - § 2.3. Достоверность оценки качества изделия
    - Допусковый контроль -- приближенный метод оценки надежности изделия
    - Сравнительная оценка оперативной характеристики допускового контроля
    - Достоверность оценки качества изделия при интегральном контроле
    - Факторы, влияющие на достоверность контроля
    - Достоверность методов интегрального и допускового контроля
- Выводы

### 3 Практические приложения метода интегральной оценки качества изделия

- § 3.1. Функции надежности контуров изделия
  - Функция надежности диспетчерского радиолокатора
  - Функция надежности электромеханического реле
  - Надежность баллона для сжатого газа
  - Определение коэффициентов влияния звеньев радиационно устойчивого лампового усилителя низкой частоты
- § 3.2. Потребная точность измерения параметров изделия
- § 3.3. Отбор наиболее информативных параметров для контроля
- § 3.4. Аппаратура контроля для интегральной оценки качества изделий
- § 3.5. Практическая единица меры надежности
- § 3.6. Место интегрального и допускового контроля в оценке качества изделия

## Литература

Развитие техники в целом увеличивает конструктивную сложность и стоимость изделий, что требует систематического совершенствования методов и средств технического обслуживания. Целью разработки современных систем обслуживания является получение минимальных затрат на эксплуатацию изделий при сохранении или повышении их качества.

Процесс развития систем обслуживания ярко прослеживается на примере развития технического обслуживания самолетов. На первом этапе (примерно до 1945 г.) различные агрегаты и системы самолета, включая двигатель, заблаговременно, до возникновения дефекта заменялись и преждевременно списывались с эксплуатации. При этом в эксплуатации не проводилось никакой оценки качества конкретного изделия. На втором этапе (примерно до 1960-х гг.) работа изделий ограничивалась гарантированным ресурсом. Такая система широко применялась в военной и гражданской авиации всего мира. Однако она требует проведения профилактики переборок и ремонтов двигателей в заводских условиях ("плановый капитальный ремонт"), что повышало затраты времени и средств для создания и поддержания значительного оборотного фонда двигателей. В этой системе оценка качества эксплуатируемого изделия уже проводилась, и производилась она в заводских условиях по принятой в промышленности технологии. На третьем этапе (с середины 1960-х гг.) совершен переход на установление ресурса по техническому состоянию. Понятие "плановый ремонт" потеряло практическое значение, так как двигатели и агрегаты кратковременно изымались из эксплуатации для восстановления работоспособности отдельных их элементов и тут же вводились в эксплуатацию. Для облегчения такого вида обслуживания созданы двигатели и агрегаты модульной конструкции. В них отдельные элементы заменяются без демонтажа всего изделия. Изделия стали находиться в эксплуатации до полной выработки ресурса. При эксплуатации по техническому состоянию оценка качества изделия производится непосредственно в процессе эксплуатации и в условиях эксплуатации. Продление наработки осуществляется индивидуально по каждому изделию в зависимости от состояния его элементов и узлов.

Одним из наиболее важных технических вопросов эксплуатации по техническому состоянию является контроль состояния изделия -- оценка его качества в любой момент текущего времени.

Контроль изделия может быть различной глубины, начиная с внешнего осмотра и кончая точным измерением параметров. В последнем случае необходимо использование специальной аппаратуры контроля.

Роль аппаратуры контроля ответственна. По результатам контроля приводятся или, наоборот, не приводятся в действие материальные средства, нередко связанные с сохранением здоровья и жизни людей. Неправильная оценка качества изделия -- это выпуск брака или браковка доброкачественной продукции, выпуск в полет неисправного пассажирского самолета или отключение исправной сети энергоснабжения, наконец, это нервозность и неуверенность людей в работе. Поэтому основным свойством контрольной аппаратуры является ее достоверность. С хорошей достоверностью сейчас контролируются простые изделия или отдельные компоненты: механические детали, приборы, микросхемы и т.д. При попытке оценить качество сложного изделия появляются трудности принципиального характера. Оказалось, что изделие со многими параметрами на краю допуска фактически имеет низкое качество, хотя все его параметры находятся в допуске и формально оно оценивается годным. С другой стороны, изделие с одним-двумя параметрами, незначительно вышедшими за допуск, вполне работоспособно, хотя оно оценивается негодным. Эти факты говорят о том, что между положением параметров и качеством изделия существует сложная связь, чувствительная к количеству параметров, или иначе, к сложности изделия. Стало очевидным, что существенное повышение достоверности контроля изделия невозможно без пересмотра самих основ оценки работоспособности изделий. Коротко рассмотрим истоки этих основ.

Возникновение товарного производства явилось крупной вехой в развитии человечества. Ремесленники уже не эпизодически делали одиночные изделия для своего потребления, а изо дня в день изготавливали их в значительном количестве на продажу. Однако каждое изделие еще изготавливалось индивидуально, подгоняя их детали друг к другу. Если деталь изделия при эксплуатации ломалась, ее изготавливали заново специально для этого изделия. Какая-либо взаимозаменяемость деталей изделий полностью отсутствовала. Это приводило к огромным затратам труда и средств как при эксплуатации изделий, так и при их изготовлении.

Назрела необходимость коренного улучшения товарного производства. И такое улучшение появилось. Оно оказалось поистине революционным, изменившим в короткий срок весь мир.

Новшеством явился **допуск** на параметры деталей. Первоначально это был допуск только на размеры деталей (многие люди и сейчас привычно связывают допуск только с размерами деталей), затем он быстро распространился на все параметры изделий: температуру, величину напряжения тока, скорость, вес, концентрацию и т.д. и т.п.

Идея допусков парадоксальна и кажется абсолютно неприемлемой. Действительно, детали, изготовленные без допусков ("точные") не соберутся в изделие и изделие вообще не будет работать, а детали, изготовленные с допусками (т.е. заведомо "неточные"), обязательно соберутся в изделие, а само изделие будет надежным и долговечным.

Допуски решили проблему взаимозаменяемости деталей в изделии. Стало возможным изготавливать детали самостоятельно и собирать из них изделия в любом месте и в любое время или накапливать их впрок.

Возможность простой сборки деталей без привлечения высококвалифицированных мастеров буквально открыла шлюзы для машинного изготовления деталей (опять-таки без привлечения высококвалифицированных мастеров). Затраты на изготовление изделий баснословно сократились, а сами изделия стали существенно эффективнее. Производительность труда резко подскочила, и общество в целом поднялось на новый уровень.

С другой стороны, изделия стали ремонтироваться путем быстрой и простой замены сломавшихся деталей, стали доступными широкому кругу людей, поэтому колоссально расширился рынок сбыта. Наступила пора расцвета индустриального товарного производства, продолжающаяся по сей день.

Изготовление деталей с допусками на их параметры потребовало создания соответствующего оборудования контроля параметров деталей. Нахождение параметра детали в допуске означает, что деталь отвечает своему функциональному назначению (деталь "взаимозаменяема", "пригодна", "работоспособна", "точна" и т.д.). Фактическая величина параметра здесь не нужна, достаточно знать нахождение параметра в определенном допуске. Поэтому средства контроля приобрели специфический "допусковый" образ в виде простых калибров на линейные размеры, электроток, температуру, мощность и т.д.

Допусковый контроль, родившийся на производстве и для производства, постепенно обосновался и в области эксплуатации изделий. Суть его здесь осталась прежней, но появился и чисто эксплуатационный аспект. После допускового контроля всех параметров деталей изделия необходимо дать оценку работоспособности всему изделию на основе результатов контроля его деталей. "Естественным" правилом стали считать, что если параметры всех деталей изделия находятся в допуске, то и изделие в целом тоже отвечает своему функциональному назначению (оно "исправно", "точно", "безопасно" и т.д.).

Это правило оценки изделия в целом работало удовлетворительно многие десятилетия, пока в 1950-х гг. не появились сложные радиоэлектронные системы. Как говорилось выше, при попытке оценить качество сложного изделия появляются трудности принципиального характера. Оказалось, что изделие со многими параметрами на краю допуска фактически имеет низкое качество, хотя все его параметры находятся в допуске и формально оно оценивается годным, с другой стороны, изделие с одним-двумя параметрами, незначительно вышедшими за допуск, вполне работоспособно, хотя формально оно оценивается негодным.

Причиной этого является грубая аппроксимация реальной зависимости работоспособности детали от величины ее параметра. Согласно идее допускового контроля принято, что пока параметр находится в допуске, работоспособность детали сохраняется полностью. При выходе параметра за допуск работоспособность детали скачком падает до нуля. Реальная зависимость, естественно, не имеет такого резкого скачка. В результате в допусковом контроле не учитываются как опасное ухудшение работоспособности при подходе параметра к границе допуска, так и немалая остаточная работоспособность непосредственно за допуском (рис.1). При небольшом количестве контролируемых параметров грубая аппроксимация зависимости работоспособности от величины отклонения параметра не дает о себе знать. При большом же количестве параметров (сложное изделие) грубая аппроксимация дает совершенно ложную оценку изделию.

Поэтому сложным изделиям стремятся устанавливать более жесткие (узкие) допуски, что не всегда возможно технически и невыгодно экономически. Причины кризисного состояния достоверности

контроля изделий коренятся, таким образом, в самих основах допускового контроля. Необходимо признать, что идея допусков, изначально возникшая для решения задачи взаимозаменяемости при сборке точных механизмов, вовсе не является адекватной основой для решения другой (похожей) задачи -- задачи оценки работоспособности точных изделий.

Решением возникшей проблемы является оценка работоспособности изделия по реальным, а не аппроксимированным зависимостям работоспособности от положения параметра (рис.1). По фактическим значениям параметров находят фактические значения работоспособности деталей, они определенным образом складываются, получаемая сумма и является оценкой работоспособности изделия в целом. Из очевидных соображений этот вид контроля нами назван "интегральным контролем" (ИК).

Важным моментом здесь является нахождение подходящей меры работоспособности, связанной с положением параметра. Эта мера должна, естественно, позволять складывать "работоспособности" составных частей изделия, чтобы получить интегральную оценку изделия, несмотря на самую различную физическую сущность "работоспособностей". У нее должно быть ясное физическое содержание. Наконец, зависимости меры работоспособности от величины параметра всех составных частей изделия должны быть, безусловно, доступны разработчику изделия. Иначе ИК свелся бы просто к благому пожеланию. В качестве такой универсальной меры работоспособности нами выбрана **надежность**. Это позволяет довести разработку всех аспектов ИК до конкретных инженерных расчетов и сделать ИК реальным без каких-либо дополнительных условий.

Таким образом, при интегральном контроле сложного изделия сначала измеряются текущие значения параметров отдельных устройств этого изделия, не связывая их с какими-либо допусками. По таблицам зависимостей работоспособностей устройств от положения их параметров, записанных в памяти ЭВМ, находят величины надежностей устройств. Перемножают величины надежностей и находят величину располагаемой надежности всего изделия -- искомое **техническое состояние изделия**.

Величина надежности, близкая к единице, невыразительна и плохо воспринимается (например,  $P_1 = 0,998$  и  $P_2 = 0,999$ ). Поэтому целесообразно использовать "обратную" величину надежности -- количество условных успешных применений изделия на один отказ. Те же величины надежности будут выглядеть уже так:

$$N_1 = 1/(1-P_1) = 1/(1-0,998) = 500;$$

$$N_2 = 1/(1-P_2) = 1/(1-0,999) = 1000.$$

Идеология интегрального контроля позволяет повысить научно-технический уровень при отборе контролируемых параметров, назначении допусков для допускового контроля (ДК), назначении поля допусков для ИК, назначении точности измерений параметров, что в конечном счете существенно увеличит достоверность контроля. Таким образом, радикально может быть улучшена сама система технического обслуживания изделий.

Наконец, положения метода интегральной оценки качества изделий по своей сути являются естественной идейной основой системы обслуживания по состоянию. В системе обслуживания по гарантированному ресурсу приближение параметра изделия к краю допуска попросту не допускалось, изделия изымались из эксплуатации еще вполне работоспособными (в частности, снятые с самолета "нехорошие" газотурбинные двигатели длительно использовались на земле для перекачки газа). Поэтому приграничной областью допуска особенно и не интересовались. Главным считалась безопасность полетов, а не экономичность эксплуатации. Фактически получалось, что от необходимости знать поведение изделия на краю допуска, знать его фактическую надежность на краю допуска "откупались" ценой списываемых доброкачественных изделий. Это приводило к колоссальному растраниванию материальных ресурсов, учитывая высокую стоимость авиационной техники.

В противоположность этому система обслуживания по состоянию нацелена прежде всего на максимальную экономичность эксплуатации. Этого можно достичь только путем **полной**

**выработки ресурса** изделия "до дна". Это означает необходимость продолжать эксплуатацию изделия и "у самого дна" -- вплоть до границы допуска и даже непосредственно за границей допуска. При этом требования безотказности изделия, естественно, по-прежнему должны выполняться в полной мере. Нахождение параметра на краю допуска, и тем более за допуском, ни в коей мере не должно уменьшать надежность изделия. Эту непростую и ответственную задачу возможно решить только путем глубокого исследования закономерностей поведения изделия при нахождении его параметров в области границы допуска. Именно эти исследования положены в основу интегрального контроля. Интегральный контроль, по самой своей сути, обеспечивает максимально возможное экономичное обслуживание изделий, одновременно обеспечивая и высокую надежность изделия в эксплуатации. Поэтому положения интегрального контроля являются естественной основой системы обслуживания по состоянию, в частности, в военной авиации.

В книге три главы. В первой главе сделан анализ современного состояния задачи повышения достоверности контроля. Эта глава, в сущности, является развернутым введением в книгу. Глава начинается с определения и пояснения величин, используемых в книге, далее рассмотрены основные модели контроля, поясняемые функциональными схемами, связь точности измерения параметров с достоверностью оценки качества при допусковом контроле и пути дальнейшего совершенствования контроля изделий. Показана большая потеря информации при допусковом контроле и как следствие этого -- пониженная достоверность контроля.

Во второй главе даны решения основных задач метода контроля с применением сообщенного параметра. Рассмотрены количественные соотношения качества изделия в целом. Приведены преимущества интегрального контроля перед допусковым, который является частным случаем интегрального, уступая ему в достоверности. Показано, что надежность -- не только мера, но и доверительная оценка качества. Предложена математическая модель работоспособности изделия, из которой найдена аналитическая связь между параметром и качеством составной части изделия в виде уравнения надежности.

Третья глава посвящена практическим приложениям метода, где даны примеры решения типовых задач контроля. Приведена структура автоматической контрольной аппаратуры для интегральной оценки качества изделий различного назначения. Глава заканчивается определением места интегрального и допускового контроля на различных этапах существования изделия, от сборки его на заводе и до конца эксплуатации.

Метод интегральной оценки качества изделия разработан исходя из достаточно общих посылок. Поэтому он может быть использован для контроля изделий самого различного назначения и различной сложности.

Автор считает приятным долгом выразить благодарность профессору, д.т.н. Ю.М.Шамаеву и доценту, к.т.н. Ю.В.Сычеву, внимательно прочитавшим рукопись и давшим ценные замечания.

## Об авторе



**ЗВЕРЕВ Георгий Яковлевич**

Кандидат технических наук. В 1953 г. окончил Рижское высшее инженерно-авиационное училище. Был главным конструктором ряда основных военно-технических изделий, входящих в состав зенитных ракетных комплексов ЗРК «Даль», ЗРК «Оса», ЗРК «С-300В», крылатой ракеты «П5-РГ» и др. В 1972 г. создал и возглавил КБ «Рубин» Министерства радиопромышленности СССР. С 1983 по 2007 г. — начальник научно-исследовательского отдела 13 ГНИИ МО, главный конструктор авиационной радиостанции с широкополосной несущей «Квант», в настоящее время — ведущий научный сотрудник.

