

Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий

// Reliability measures at the stages of design, production and operation of products //

Трефилова Т. А., Бирюкова Г. А.,
АО «Электропривод», Киров

В статье представлен материал о мерах по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий. Рассмотрена количественная оценка показателей надежности на этапе проектирования и этапе эксплуатации на примере электрической машины. Результаты расчета подтверждены статистическими данными и данными по результатам эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, проектирование, эксплуатация, отказы, оценка надежности, задачи надежности.

The article presents material on measures to ensure reliability at the stages of design, production and operation of products. A quantitative assessment of reliability indicators at the design stage and at the operation stage is considered on the example of an electric machine, the calculation results are confirmed by statistical data, and data on operating results.

Keywords: reliability, design, operation, failures, reliability assessment, reliability tasks.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Оценку соответствия изделий заданным требованиям к надежности осуществляют при проектировании, производстве и эксплуатации.

Проектирование является первым и основным этапом, на котором закладывается определенный уровень надежности изделия. Процесс проектирования и отработки надежности изделий состоит из нескольких этапов: подготовительного, расчетно-конструкторского, изготовления опытных образцов, экспериментальной проверки и устранения выявленных недостатков.

Для обеспечения надежности проектируемого изделия на подготовительном этапе разрабатываются количественные требования к надежности, определяются типы комплектующих изделий и узлов, виды используемых материалов и защитных покрытий, анализируются условия эксплуатации. При решении перечисленных задач весьма важную роль играют сокращение количества деталей, узлов и элементов; жесткий контроль за разработкой отдельных комплектующих изделий и элементов; облегчение режимов используемых комплектующих и узлов.

Меры по обеспечению надежности

Основные методы обеспечения надежности на этапе проектирования изделий

1. Количественные показатели надежности задаются в технических требованиях на проектирование изделия, исходя из

особенностей работы данного изделия в системе и его ответственности. Приступая к созданию любого изделия, конструктор должен знать, какие функции оно будет выполнять, в каких условиях работать, какие требования предъявляются к его надежности. Незнание конкретных условий эксплуатации нередко приводит к грубым просчетам и в конечном итоге к снижению надежности изделий. Проектируя любую машину, конструктор обязательно должен учитывать технологичность изделия, то есть его приспособленность к серийному производству, удобству изготовления.

2. Надежность и долговечность любого нового образца изделия в значительной степени зависит от материала. При выборе материалов конструктор должен учитывать, чтобы они обеспечивали необходимые механические и электрические характеристики изделия во всем диапазоне эксплуатационных условий. Используемые материалы должны иметь такую скорость старения, при которой будет обеспечен необходимый технический ресурс и необходимый срок хранения изделий.

3. Важнейшая задача каждого конструктора – обеспечить такие условия, чтобы все узлы и детали работали в строго определенных режимах. При этом нужно учитывать, что увеличение нагрузки выше номинальной резко сокращает срок службы деталей, а использование элементов, узлов и деталей в облегченном и «разгруженном» режиме ведет к значительному увеличению производительности его исправной работы.

4. Непосредственно на надежность влияют тип конструкции, тип монтажа, тепловой режим, меры защиты как от механических

воздействий (вибрация, удары), так и защите программным обеспечением и др. Косвенное влияние на надежность изделия оказывают удобство применения и технического обслуживания, ремонтпригодность, унификация узлов и деталей, автоматизация производства и др.

5. При выборе конструкции изделия конструктор должен также определить и обосновать оптимальные сроки службы уже использованных узлов и деталей и произвести разбивку их на группы с близкими или кратными сроками службы. При таком методе проектирования обеспечивается равнопрочность определенных групп деталей и узлов, позволяющая получить изделие с наибольшей надежностью и эффективностью, с большим сроком службы до его ремонта. Равнопрочность обеспечивает значительное сокращение расходов на ремонт и эксплуатацию.

6. Наряду с улучшением качества отдельных узлов и деталей большое значение приобретает создание надежных устройств из менее надежных элементов, принимая методы резервирования. В теории надежности рассматриваются два возможных вида соединения элементов или узлов: последовательное и параллельное. Последовательным называют такое соединение, при котором отказ в работе хотя бы одного элемента или узла приводит к отказу изделия в целом. Это наиболее характерный и распространенный вид соединения для большинства изделий. Параллельным, или резервным, соединением элементов (узлов, агрегатов) в теории надежности считается такое соединение, при котором отказ изделия наступает только в случае выхода из строя всех параллельно включенных элементов. Следовательно, резервирование – это способ повышения надежности изделия путем включения в схему или конструкцию ряда параллельных, резервных элементов или узлов. Нужно иметь в виду, что резервирование усложняет изделие, удорожает его обслуживание, содержание и ремонт, поэтому не всегда экономически выгодно. Использовать методы резервирования целесообразно лишь после того, как исчерпаны все остальные, более простые способы повышения надежности.

7. Важным эксплуатационным требованием к изделиям является удобство технического обслуживания и восстановления, поэтому конструкция изделия должна предусматривать легкий и свободный доступ к его элементам, исключающий повреждение

других элементов при замене отказавших или при регламентных работах, обеспечивать простоту операций при настройке и регулировке.

8. Автоматизированный контроль за работой отдельных узлов в процессе эксплуатации позволяет по изменениям параметров проверяемого узла прогнозировать отказ и заранее принять меры по его предупреждению.

9. Необходимо тщательно производить опытную отработку изделия и всесторонние испытания, в том числе на надежность узлов и всего изделия. Целью испытаний опытных образцов является выявление слабых узлов, недостаточная надежность которых обусловлена ошибками проектирования. Испытания опытных образцов, с одной стороны, являются средством проверки эффективности принятых мер при проектировании, а с другой стороны – средством отработки надежности изделия при воздействии различных факторов. Тщательность отработки новой конструкции во многом определяется объемом проведенных испытаний.

10. Предусматривать предварительную приработку элементов и узлов до поставки их в изделие. Во многих изделиях наибольшее число отказов приходится на начальный период их работы. В этом периоде выявляются наиболее слабые места, их недостатки. Применение приработки позволяет выявить недостатки изделия еще на заводе, а не у потребителя.

11. Производить опытную эксплуатацию изделия до передачи его в серийное производство. Проведение опытной эксплуатации позволяет выявить недостатки изделия и принять меры к их своевременному устранению. Процесс проектирования предопределяет величину надежности изделий, однако реализация этой величины в значительной степени связана с организацией производства. Процесс производства должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить использование предусмотренных конструктором материалов, деталей, допусков и, следовательно, предусмотренных конструктором значение надежности.

На АО «Электропривод» надежность вновь разрабатываемых изделий подтверждается аналитическим расчетом надежности, проводятся ориентировочный расчет – по изделиям-аналогам; предварительный – по аналогам и с учетом начальных данных при разработке; уточненный расчет надежности проводится с учетом условий и режимов работы изделия на основе разработанных конструкторских документов. Показатели надежности электрических машин рассчитываются в соответствии с [1] (данный документ был разработан при участии специалистов АО «Электропривод»), расчет надежности электрорадиоизделий осуществляется с помощью программ «Автоматизированная система расчета надежности ЭРИ». Количественный анализ безотказности при

проектировании систем должен проводиться в соответствии с [2] табличным методом или методом логических схем.

Испытания на надежность опытных образцов вновь разрабатываемой (или модернизируемой) аппаратуры проводятся как самостоятельный вид испытаний на специально выделенных образцах по программе в соответствии с [3], [4], [5].

Обеспечение надежности в процессе производства достигается путем строгого соблюдения и совершенствования технологии производства, применения предварительных тренировок (приработок) узлов и элементов до постановки их в изделие. Качество производства изделий и их надежность во многом зависят от уровня технологических процессов и степени их автоматизации. Любое отклонение техпроцесса от нормы вызывает отклонение каких-либо параметров или свойств изделий. Неточное соблюдение режимов обработки материалов и деталей, пропитки, сушки, монтажно-сборочных работ и других производственных операций сначала может не вызывать заметных отклонений выходных параметров от норм, но впоследствии неизбежно приведет к сокращению сроков службы изделий и снижению их надежности. Необходимо поддерживать и увеличивать уровень культуры производства, организовывать тщательный контроль соответствия стандартам и ТУ сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий. Необходима организация как тщательного контроля технологического процесса на всех стадиях, так и тщательный выходной контроль готовых изделий.

Значительное влияние на надежность изделий в процессе их эксплуатации оказывают факторы субъективного характера, связанные с деятельностью обслуживающего персонала.

Обеспечение надежности при эксплуатации достигается путем повышения квалификации обслуживающего персонала, организации квалифицированного технического обслуживания и технической эксплуатации изделий, проведения профилактик и ремонта изделий, обеспечения запасными частями. Влияние квалификации обслуживающего персонала сказывается главным образом на качестве подготовки изделий к работе, его монтажу и на процессе восстановления работоспособности после отказов. Решающее значение в подготовке обслуживающего персонала имеет доскональное знание изделий, с которыми они имеют дело. В связи с этим следует обращать серьезное внимание на качество технической документации, сопровождающей изделие (описания, инструкции).

Обеспечение надежности при эксплуатации также достигается организацией системы сбора и анализа статистических данных о надежности эксплуатируемой техники и разработки рекомендации по повышению надежности изделий, узлов и элементов. Сбор и анализ эксплуатационной информации имеет большое практическое

значение – это помогает совершенствовать конструкции и технологию производства изделий, систему их эксплуатации.

Статистический анализ отказов в АО «Электропривод» проводится в соответствии с [6], [7], [8]. Информация по неисправностям изделий из эксплуатации поступает в бюро надежности для анализа неисправностей и расчета показателей безотказности.

К основным источникам информации относятся:

- акты исследования о причинах дефекта изделий серийного завода;
- акты исследования изделий предприятия;
- сводные отчеты предприятия «Неисправности изделий в эксплуатации» за год;
- карточки учета неисправностей.

Информация о применяемости изделий, модернизации, ресурсах и сроках службы, результатах испытаний, доработках в эксплуатации по бюллетеням и решениям, сведениям по отказам изделий в эксплуатации, конструктивных или технологических рекомендациях по повышению надежности формируется и накапливается в Техническом паспорте изделия. Результаты анализов отказов используют при проведении работ по продлению ресурсов и сроков службы, при расчете показателей безотказности изделий, а также при выполнении анализа вида и последствий отказа (АВПО, FMEA (Failure mode and effects analysis), анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО, FMECA (Failure mode, effects and criticality analysis), анализа дерева неисправности (FTA, Fault tree analysis).

На предприятии разработаны бюллетени, в которых приведены обобщенные статистические данные об эксплуатационной надежности авиационных электромеханизмов, их узлов, деталей, элементов, полученные по результатам эксплуатации на объектах авиационной техники.

Бюро надежности выполняются работы по установлению и повышению технических ресурсов и сроков службы серийных изделий в соответствии с [9] на основе результатов лабораторных испытаний или результатов эксплуатации. За последние несколько лет изделиям нашей разработки, как электромеханизмам, так и аппаратуре, были продлены сроки службы до 35–40 лет с учетом проведения капитальных ремонтов, что подтверждает проверку теории надежности длительным сроком эксплуатации.

Все разработанные методы подтверждения надежности и сейчас используются при проектировании новых изделий и систем.

Спроектированное, тщательно изготовленное, детально испытанное и правильно эксплуатируемое изделие не должно отказывать в работе. Однако опыт показывает, что даже наилучшие конструкции изделий, современная технология их изготовления и правильная эксплуатация не исключают полностью возникновения отказов в работе.

Теория надежности различает три характерных типа отказов:

1. Приработочные отказы – это отказы, которые происходят в течение раннего периода эксплуатации машины вследствие несовершенной технологии производства. Приработочные отказы можно устранять путем предварительных испытаний машин перед вводом ее в эксплуатацию, о чем говорилось ранее.

2. Износосвые отказы – это отказы, вызываемые износом отдельных частей изделия, они являются признаком старения. Износосвые отказы могут быть ограничены путем своевременной замены изнашивающихся деталей во время регламентного обслуживания изделия или ремонта.

3. Внезапные отказы в период нормальной эксплуатации изделия, которые могут возникнуть случайно и не могут быть устранены ни наладкой, ни наилучшим обслуживанием. Эти случайные отказы подчиняются определенным общим закономерностям, и их интенсивность в течение достаточно большого периода эксплуатации машины примерно постоянна.

Каждый из этих отказов характеризуется особым статистическим распределением во времени: приработочные отказы – распределением Вейбулла, случайные (внезапные) – экспоненциальным распределением, износосвые – нормальным распределением Лапласа. При количественной оценке надежности изделия используются все перечисленные статистические методы и вероятностные расчеты.

Количественная оценка показателей надежности на примере электрической машины

Рассмотрим количественную оценку показателей надежности на этапах проектирования и эксплуатации на примере электрической машины.

Оценка надежности электрической машины на этапе проектирования

Надежность электрической машины, как сложного устройства, зависит от надежности ее составных частей: обмоток ротора и статора, шарикоподшипников, щеточно-коллекторного узла и др.

На этапе проектирования производится оценка конструкционной надежности, то есть оценка рациональности выбора данной конструкции, оценка надежности примененных в ней узлов и деталей, производится расчет количественных показателей безотказности проектируемого изделия.

Расчет вероятности безотказной работы электрической машины при условии независимости отказов производится согласно [1] по формуле:

$$P_{ЭМ}(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t), \quad (1)$$

где $P_{ЭМ}(t)$ – вероятность безотказной работы i -того узла;

t – время работы;

m – количество основных узлов. Как указывалось выше, при расчете электрической машины необходимо рассмотреть следующие узлы: шарикоподшипниковый, обмоточный, щеточно-коллекторный, встроенные вентильные коммутаторы, прочие узлы и детали.

Оценка надежности электрической машины на этапе эксплуатации

Расчет показателей безотказности по результатам эксплуатации на объектах авиационной техники производится по информации о неисправностях изделия и по наработкам объектов за рассматриваемый период времени. При расчете показателей безотказности учитываются неисправности изделий, отказавших в пределах технического ресурса до первого ремонта, а для ремонтных изделий – в пределах межремонтного ресурса. Не учитываются неисправности изделий, отказавших по вине эксплуатации. Нарботка на отказ, приводящая к досрочному съему изделия (MTBF, Mean (operating) time between failures), рассчитывается согласно [6] по формуле:

$$T_{ДС} = \frac{t_{\Sigma} \cdot m}{n}, \quad (2)$$

где t_{Σ} – суммарная наработка рассматриваемой совокупности объектов;

m – количество одноименных изделий, устанавливаемых на рассматриваемом объекте;

n – суммарное количество отказов рассматриваемых изделий. Проведем сравнение количественных показателей конструкционной и эксплуатационной надежности на примере генератора, разработанного на нашем предприятии, входящего в состав системы энергоснабжения противоблестенительной системы вертолетов.

В 1980-х годах появилась необходимость модернизировать один из ранее разработанных генераторов, техническое задание на разработку передали на наше предприятие. Модернизация была проведена с целью повышения надежности работы щеточно-коллекторного узла. В нем увеличено число щеток с 2 до 4 на фазу.

Вероятность безотказной работы генератора за 1 час работы, рассчитанная на этапе проектирования, получилась равной 0,99997823. Нарботка на отказ, приводящая к досрочному съему изделия, равна 45 934 ч. Нарботка на отказ, рассчитанная по результатам эксплуатации, получилась равной 306 700 ч.

По результатам эксплуатации наработка на отказ получилось примерно в семь раз выше, чем расчетная. Это объясняется тем, что при расчете конструкционной надежности учитываются предельные величины температур нагрева узлов и деталей, допуски на размеры, обороты и нагрузки, то есть рассчитываем наихудший вариант.

Величина ресурса до первого ремонта определяется по формуле:

$$\tau = \rho \cdot T_{ДС}', \quad (3)$$

где τ – ресурс до первого ремонта;

$0 < \rho < 1$;

$T_{ДС}'$ – наработка на отказ.

При заданной вероятности выявления раннего отказа изделия при экспоненциальном законе распределения величина ресурса до первого ремонта определяется по формуле:

$$\tau = -T_{ДС}' \ln(1 - q), \quad \text{то есть} \quad (4)$$

$$\rho = -\ln(1 - q), \quad (5)$$

где q – заданная вероятность выявления раннего отказа изделия, принимаем 0,01.

При экспоненциальном законе распределения величина ресурса до первого ремонта ориентировочно равна 3000 ч. Изначально для данного генератора был установлен ресурс 1500 ч. Учитывая расчетные данные и требования на объект, по результатам эксплуатации межремонтный ресурс был установлен 2000 ч.

Также в процессе эксплуатации генераторов предусмотрено проведение технического обслуживания, в том числе пополнение смазки в шарикоподшипниковых узлах и измерение высоты щеток. Предприятием-разработчиком проводились работы по проверке ремонта генераторов на ремонтных заводах, авторский надзор выполнения регламентных работ по щеткам и подпитке шарикоподшипников на вертолетах в эксплуатации.

В 2019 году для данных генераторов был установлен назначенный ресурс 20 000 ч. Результаты работ по исследованию генераторов с максимальными наработками были положительными. На этом основании был продлен назначенный ресурс, что подтверждает: на предыдущих этапах жизненного цикла данного изделия все меры по обеспечению надежности были проведены.

Постоянное обеспечение высокого технического уровня разработок, качества и надежности выпускаемых изделий – основные задачи, которые стояли и будут стоять перед коллективами предприятий, разрабатывающих и выпускающих продукцию.

Выводы

Внедренная в практику система анализа надежности изделий как по качественным, так и по количественным показателям позволяет:

- технически обоснованно разрабатывать конструктивные мероприятия по исключению повторяющихся дефектов в производстве и в ряде случаев – по доработкам непосредственно в эксплуатации;
- следить за динамикой изменения надежности изделий или отдельных его элементов;
- прогнозировать надежность при проектировании новых изделий.

В статье использовались данные из опыта работы бюро надежности АО «Электропривод» с 1962 года, года создания данного отдела на предприятии, по настоящее время.

Литература

1. ОСТ 100151–88 Машины электрические авиационные. Методы расчета количественных показателей безотказности.
2. ОСТ 100132–97 Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов.
3. ОСТ 101204–2012 Надежность изделий авиационной техники. Эквивалентно-циклические испытания на безотказность авиационного оборудования.
4. ГОСТ РВ 20.57.304–98 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям надежности.
5. МУ 2Н-924 Методические указания по ведению испытаний на надежность в технические условия бортовых электротехнических изделий.
6. ОСТ В100094–73 Надежность изделий авиационной техники. Методы анализа безотказности по данным эксплуатации.

7. ОСТ 100146–74 Надежность изделий авиационной техники. Система сбора и обработки информации. Порядок учета. Показатели. Виды обработки. Состав функциональных групп.
8. ОСТ 100156–75 Надежность изделий авиационной техники. Классификаторы признаков неисправностей.
9. ГОСТ РВ 15.702–94 Военная техника. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы, срока хранения.

Трефилова Татьяна Александровна

Родилась в 1990 году. В 2013 году окончила ВятГУ по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы в области надежности авиационных электроприводов – 6 лет. В настоящее время работает начальником Бюро надежности АО «Электропривод».

Бирюкова Галина Андреевна

Родилась в 1949 году. В 1972 году окончила Кировский политехнический институт по

специальности «Электрические машины и аппараты». Опыт работы в области надежности авиационных электроприводов – 48 лет. В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором АО «Электропривод».

Trefilova Tatyana

Was born in 1990. In 2013 she graduated from Vyatka State University with a degree in “Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes”. Work experience in the field of reliability of aviation electric drives is 6 years. At present she works as the head of the reliability bureau of JSC “Electroprivod”.

Biryukova Galina

Was born in 1949. In 1972 she graduated from the Kirov Polytechnic Institute with a degree in “Electrical Machines and Devices”. Work experience in the field of reliability of aviation electric drives is 48 years. At present she works as a leading design engineer of JSC “Electroprivod”.