

Подход к конструированию на основе прогнозирования надежности

© Ю.П. Похабов¹, В.А. Каверин², А.М. Васильев²,
В.А. Земсков², Д.А. Щукин²

¹АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро»,
Железногорск, 662972, Красноярский край, Российская Федерация

²АО «ВПК «НПО машиностроения»,
Реутов, 143960, Московская область, Российская Федерация

Статистические основы современной теории надежности не предназначены для ее прогнозирования при конструировании на основе выбора значений параметров конструкции и установления требований конструкторской документации. Необходим метод конструирования, позволяющий обосновывать способность конструкции обеспечивать надежность еще несуществующего изделия путем выбора материалов, размеров, допусков, взаимосвязей конструктивных элементов и тому подобных решений. Рассмотрен подход к конструированию на основе прогнозирования надежности, увязывающий параметры работоспособности с ее показателями при условии выполнения следующих формализованных процедур: обоснования и оценки параметров конструкции исходя из заданных режимов и условий эксплуатации, установления необходимых и достаточных требований конструкторской документации на основе выбранных и обоснованных параметров конструкции, выполнения условий бездефектного производства. Для реализации указанного подхода установлена связь между работоспособностью и надежностью с помощью конструктивных запасов, предложена терминология надежности, позволяющая конструктору верифицировать и оценивать свои решения для обоснования надежности, приведены алгоритм и процедуры верификации конструкторских решений с оценкой прогнозируемой надежности. Практическое значение такого подхода заключается в системности выявления потенциальных угроз, чтобы снизить риски возникновения отказов конструкторскими методами, вытекающими из логики работы конструктора.

Ключевые слова: конструирование на основе прогнозирования надежности, конструкторская документация, ошибки конструирования, верификация конструкторских решений, конструкторско-технологический анализ надежности

Введение. Из опыта общения с коллегами-конструкторами неоднократно наблюдалась их заметная отстраненность от конкретизации критериев надежности — никто не мог объяснить, какие именно требования должны быть установлены в чертежах, чтобы можно было обоснованно полагаться на выполнение заданных показателей надежности. Если взять любой из критериев работоспособности, то ситуация прямо противоположная, например на вопрос, как увеличить запас прочности с 0,9 до 1,0, все без запинки отвечали, что нужно выбрать конструкционный материал с требуемыми характеристиками и задать необходимые размеры сечений силовых элементов.

При этом вопрос, что должен сделать конструктор, чтобы поднять безотказность с 0,9 до 0,99, неизменно вызывал замешательство. В лучшем случае следовали рассуждения о проведении статистических испытаний и составлении конструкции из элементов с известными показателями надежности по принципу LEGO. На вопрос о том, как при конструировании обосновать безотказность 0,999, если не существует известных показателей надежности элементов конструкции и отсутствует возможность их наработать, никто не смог ответить.

Сложно представить, что надежность изделия может быть выше той, которую задумал, обосновал и реализовал конструктор в своей конструкторской документации (КД). Однако в научно-технических публикациях меньше всего внимания уделяется тому, как на этапе разработки чертежей конструктору следует понимать и обосновывать надежность, когда реального изделия еще не существует, а есть только замысел и графический образ [1–6]. Безусловно, работа конструкторов в любой отрасли техники имеет свою специфику и свое содержание, но все же есть и общие закономерности [7–14].

Цель статьи — предоставить конструктору инструмент для разработки высокоответственных изделий ракетно-космического назначения на ранних этапах жизненного цикла.

Роль конструктора в производственном процессе. Основная задача конструктора — от конструкторского замысла, предварительной прорисовки и оценочного расчета конструкции перейти к разработке КД для изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта, модернизации и утилизации (далее — для изготовления и эксплуатации) изделий. Основные конструкторские документы — чертежи, технические условия (ТУ) и спецификации определяют организацию производства и работы с изделием, а от их безошибочности зависит в конечном итоге эффективность изготовления и качество готовой продукции.

Конструктор — единственный человек на производстве, который, реализуя свой замысел, наглядно отображает в КД то, что предметно еще не существует и является лишь продуктом его умственной деятельности. Главная задача конструктора — установить в КД такие требования для изготовления изделия, чтобы при их выполнении были реализованы требуемые функции при его эксплуатации. Все остальные участники производственного процесса обязаны исполнять требования КД, установленные конструктором.

Далее под ошибками понимаются дефекты конструкции, возникающие в результате неверных действий конструктора, которые способны привести к отказам при выполнении требуемых функций. При этом не рассматриваются две крайности [15]: *ошибки незнания* — решения и действия неопытных и неквалифицированных конструкторов,

и *онтологические ошибки* — принципиально неверные представления конструкторов о создаваемых ими технических системах. Поскольку наличие или отсутствие ошибок в КД полностью относится к сфере деятельности, подконтрольной конструктору, дефекты конструкции могут быть своевременно выявлены и устранены на стадии разработки КД. Даже если КД не содержит ошибок, при изготовлении и эксплуатации всегда существуют риски нарушения требований конструктора по разного рода причинам антропогенного или техногенного характера, которые приводят к производственным дефектам. Однако если отклонения от требований КД при изготовлении и эксплуатации находятся под контролем конструкторов, то имеется возможность смягчить критические последствия производственных дефектов, чтобы не нарушался конструкторский замысел и сохранялась работоспособность изделия.

Здесь важно отметить, что если при изготовлении изделия используются покупные детали и сборочные единицы (по субконтракту или аутсорсингу), то в КД должны быть установлены требования к их выходным характеристикам, а также критерии по приемке и испытаниям на входном контроле, которые обязательно должны быть выполнены [16].

Любые собственные ошибки конструктор обязан устранить до принятия заказчиком КД по ГОСТ 2.103–2013. Ошибки по степени привлечения ресурсов к их исправлению и по тяжести последствий можно разделить на явные (технические — неточности, упущения, опечатки, грамматические или арифметические ошибки в КД) и скрытые (просчеты, недооцененные риски нарушений, заблуждения, действия конструктора, способные привести к конструктивным дефектам и т. п.).

Явные ошибки обусловлены тем, что конструктор не соблюдает принятые нормы и правила разработки по причинам разного рода, в частности, из-за дефицита времени, невнимательности, усталости, спешки, случайных факторов вроде отвлекли и забыл и пр. Такие ошибки могут быть эффективно выявлены третьими лицами и затем исправлены при проведении технического, нормализационного (нормоконтроля), технологического и метрологического контроля.

Скрытые ошибки являются следствием отклонений от естественных законов природы при разработке изделий из-за недостаточных знаний и опыта, непродуманных и необоснованных решений, неучтенных факторов, режимов и условий применения и т. д. Для выявления скрытых ошибок требуется погрузиться в конструкторский замысел, необходимо наличие действенных инструментов для анализа конструкторских решений, обширных знаний не только у конструкторов и работающих с ними рука об руку расчетчиков, технологов, испытателей, но и у критически настроенных проверяющих. Единственным способом

обнаружения скрытых ошибок конструкторов являются процедуры аналитической, расчетной и экспериментальной верификации исходя из норм и правил, принятых в системах менеджмента качества проектных организаций. В этом случае главенствует известный принцип — чем раньше будут обнаружены скрытые ошибки, тем дешевле обойдется исправление.

Отказы изделий возникают в результате совокупных дефектов: конструкторских (отклонений при разработке КД), производственных (отклонений при изготовлении от требований КД) и эксплуатационных (отклонений при эксплуатации от требований КД и эксплуатационной документации). На различных стадиях жизненного цикла изделия роль конструктора является ключевой, заключающейся в следующем:

- разработать КД, обеспечивающую наибольшую вероятность сохранения работоспособности изделия во времени в заданных режимах и условиях эксплуатации;
- установить в КД необходимые и достаточные требования для изготовления и эксплуатации изделия;
- определить необходимые контрольные проверки и испытания, обеспечив контрольпригодность требований конструкторской документации;
- проводить оценку критических отклонений от требований КД при изготовлении и эксплуатации для принятия решений по доработкам и использованию задела.

Конструирование с учетом надежности. Организация и осуществление производства и эксплуатации изделий с заданной надежностью подчиняются безусловному выполнению и контролю выполнения требований КД, в которой явные и скрытые конструкторские ошибки должны быть своевременно выявлены и устранены, а риски возникновения производственных и эксплуатационных дефектов — учтены и оценены с точки зрения их критичности.

Если «что-то нарисовать и как-то посчитать», то вряд ли такие действия позволят получить требуемый конечный результат — изделие с заданной надежностью. Необоснованность проведения инженерных расчетов и экспериментальной отработки способна привести к нарушению одного из основных принципов конструирования — равнопрочности изделия в заданных режимах и условиях применения, что может стать причиной отказов.

Для того чтобы изделием выполнялись требуемые функции, исходя из характера их проявления, конструктор обязан предусмотреть и обосновать возможность осуществления событий четырех видов:

- физических, которые подчинены естественным законам природы и имеют причинно-следственные связи с отказами;

- частотных, характеризуемых пределом относительной частоты наблюдаемых событий в серии однородных независимых испытаний;
- логико-вероятностных, основанных на сценарном моделировании и оценке реализации опасных состояний;
- спорадических, которые могут проявляться в единичных случаях как непредсказуемые явления, однако в итоге как имеющие физическую основу.

Для обоснования выполнения указанных событий конструктор должен провести верификацию и оценку своих решений, осуществив следующие действия:

- учесть необходимые расчетные случаи нагружения и воздействий;
- выбрать расчетные схемы, модели и объекты исследования, позволяющие с требуемой точностью подтвердить работоспособность изделия в условиях применения;
- установить критерии оценки результатов инженерных расчетов и натурных испытаний;
- выполнить инженерные расчеты и натурные испытания необходимых видов для подтверждения значений параметров работоспособности изделия.

Целевым понятием для конструктора является работоспособность — состояние изделия, при котором значения всех его параметров в любой момент времени находятся в допустимых пределах (в соответствии с КД), позволяющих выполнить требуемые функции в заданных условиях. Работоспособность по умолчанию определяет текущее состояние изделия, а способность изделия сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени при заданных режимах и условиях применения является не чем иным, как надежностью. Способность изделия находиться в работоспособном состоянии определяется избыточностью параметров конструкции по восприятию внешних воздействий сверх необходимых значений. При этом конструктор способен определить:

- значения параметров изделия исходя из физических законов природы и вероятности событий, заключающихся в том, что при установленных запасах работоспособности значения параметров изделия в процессе эксплуатации не выйдут за границы допустимых диапазонов;
- вероятности сохранения работоспособности изделий, которые либо работают в режиме «Да-Нет», либо работу которых нельзя охарактеризовать количественно. Здесь имеется в виду, что в КД установлены требования для обеспечения работоспособности в заданных режимах и условиях применения, а при изготовлении соблюдены условия бездефектного производства (изготовление и сдача продукции без дефектов с первого предъявления);

- частотные значения вероятностей изделия, если известны показатели вероятности безотказной работы отдельных элементов конструкции, определенных в условиях независимых и однородных испытаний.

Вероятности всех трех видов при описании состояний изделия могут использоваться для расчета вероятности сохранения его работоспособности во времени в заданных режимах и условиях применения методом структурной схемы надежности. Вероятность сохранения работоспособных состояний во времени является не чем иным, как условной надежностью, которая определяется одновременным соблюдением совокупности следующих факторов:

- нахождением значений параметров в допустимых границах при заданных режимах и условиях применения;
- выполнением требований КД при изготовлении и эксплуатации, обеспечивающих стабильность параметров или показателей изделия;
- использованием известных показателей надежности конструктивных элементов в заданных условиях.

Условная надежность может (и должна) быть обоснована конструктором с помощью алгоритмизированных процедур верификации и оценки конструкторских решений. При обоснованной условной надежности может быть обеспечено достижение реальной надежности выше заданной, если соблюдаются условия бездефектного производства и выполняются установленные требования эксплуатационной документации, что подтверждается выполнением процедур, проводимых в рамках принятой в организации системы менеджмента качества.

Проводимый конструктором анализ работоспособных состояний изделия позволяет снизить риски непредвиденных и недопустимых изменений его качества на стадии эксплуатации посредством согласования и увязки между собой установленных значений параметров работоспособности и требуемых показателей надежности изделия. При этом фокус внимания при обеспечении надежности может быть перенесен с заключительных приемочных процедур контроля готового изделия на ранние стадии его разработки и создания.

Связь работоспособности и надежности. При конструировании важно использовать работоспособность для оценки надежности по двум причинам. Во-первых, работоспособность можно количественно оценить как меру проявления физических свойств изделия: прочности (включая усталостную прочность, вибропрочность, контактную прочность, ударную прочность), жесткости, устойчивости, износостойкости, трибостойкости, коррозионной стойкости, радиационной стойкости, теплостойкости, вибростойкости, энергодостаточности, отказоустойчивости и т. д. Во-вторых, меру проявления физических свойств можно обусловить численными значениями параметров изделия с заданной

избыточностью относительно внешних воздействий среды, которая соответствует требуемому уровню надежности. Избыточность определяется конструктивными запасами при установлении требований, предъявляемых к критичным элементам конструкции:

- степени резервирования;
- запасов работоспособности (например, коэффициентов безопасности, запасов прочности и движущих моментов (сил) подвижных узлов в механизмах или иных критериев параметрической избыточности);
- процедур получения гарантированных результатов (например, с применением минимаксных критериев, использованием факторов инженерной психологии, введением в конструкцию силовых и температурных развязок).

Значения конструктивных запасов назначают исходя из следующих факторов:

- правил современной теории надежности (например, для коэффициентов безопасности и запасов прочности);
- подтвержденной практики длительного применения (например, для запасов движущих моментов (сил) подвижных узлов в механизмах);
- конструктивных приемов, направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путем использования силовых и температурных развязок);
- организационно-технических мероприятий, снижающих либо исключаяющих вероятность возникновения отказов (например, выполнения «наиболее сложных (ответственных) операций» по ГОСТ Р 56526–2015).

Требования КД устанавливаются с учетом избыточности критичных элементов, а конструктивные запасы обусловлены вероятностями обоснованно полагаться на выполнение задач конструирования с учетом существующих ограничений, например, массо-габаритных, экономических, технологических и т. д.

Терминология надежности для конструктора. Термины являются инструментом познания, которые в своем содержании несут базовую информацию о предмете исследования. Терминология надежности по ГОСТ Р 27.102–2021 в большей степени предназначена для исследования и обеспечения надежности готовых изделий, в которой не предусмотрено терминов для понимания надежности теми, кому необходимо принимать конкретные решения для ее обоснования, т. е. конструкторами [17–19]. В стандарте, например, используются, но не определяются такие термины, как свойство, способность, состояние, функция, требуемая функция, — все то, что дает возможность конструктору обосновывать способность конструкции обеспечивать

надежность еще несуществующего изделия путем выбора материалов, размеров, допусков, взаимосвязей конструктивных элементов и других подобных решений. В таблице приведены определения терминов, применение которых позволяет конструктору верифицировать и оценивать свои решения для обоснования надежности исходя из понятных ему принципов мыслительной деятельности.

Рекомендуемые определения терминов для обоснования конструктором заданной надежности

Термин	Определение
Изделие	Предмет, подлежащий изготовлению по КД
Событие	Всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти
Вероятность	Действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию
Отказ	Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта
Критичный элемент	Конструктивный элемент, отказ которого определен как критический
Состояние	Множество устойчивых значений переменных параметров объекта
Показатель	Величина, позволяющая судить о состоянии объекта
Параметр	Физическая величина, характеризующая какое-либо свойство объекта и принимающая различные значения
Свойство	Проявление различий или общности объектов, которые обнаруживаются в их отношениях
Способность	Мера соответствия потенциальных возможностей требуемым свойствам
Функция	Внешнее проявление свойств в заданной системе отношений
Требуемая функция	Функция, которая считается необходимой для обеспечения служебного назначения
Служебное назначение	Задача, для решения которой создается изделие, включающая помимо общих целей проектирования все дополнительные условия, ограничения и требования, количественно уточняющие и конкретизирующие эту задачу
Обоснование	Подтверждение истинности мышления или деятельности
Обеспечение	Предоставление необходимых возможностей
Верификация	Подтверждение требований
Валидация	Подтверждение назначения

Использование КД для оценки надежности. КД содержит все необходимые требования для изготовления и эксплуатации изделия, а иных требований, кроме заданных в КД, не может быть, поскольку их определение является прерогативой конструктора. В то же время конструктор при разработке КД способен ошибаться, он может не задать

какие-либо требования (пропустить либо по невнимательности, либо по незнанию), задать требования неточно (с возможностью произвольных действий при изготовлении) или по умолчанию (т. е. как получится). В результате изделие может быть изготовлено со свойствами, которые не были предусмотрены конструктором, а все из-за того, что рабочий, столкнувшись с неопределенностью либо отсутствием требований в чертеже, делает так, как ему удобно (при этом он ничего не нарушает — запрещений или ограничений на его действия в чертежах нет).

Если изделие изготовлено согласно требованиям КД, в которой нет ошибок, то оно способно выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. При этом совокупность параметров конструкции, соответствующих КД, является параметрической моделью реального изделия (в параметрической модели значения всех параметров находятся в допустимых диапазонах, что соответствует выполнению требуемых функций в реальном изделии). Одновременно КД, содержащая необходимые и достаточные требования для изготовления и эксплуатации, которые соответствуют параметрической модели, является информационной моделью, адекватной реальному изделию (информационная модель содержит все необходимые и достаточные требования для изготовления и эксплуатации, соответствующие установленным параметрам параметрической модели).

Таким образом, вплоть до принятия заказчиком КД конструктор при конструировании решает две задачи:

- устраняет ошибки с учетом анализов, расчетов и испытаний, приближая адекватность параметрической модели к реальному изделию;
- обеспечивает релевантность значений всех параметров конструкции требованиям КД, приближая адекватность информационной модели к параметрической модели и, соответственно, к реальному изделию.

Соблюдение адекватности параметрической и информационной моделей с реальным изделием дает возможность исходя из КД получить показатели надежности, которые будут реализованы при выполнении требований КД.

Конструкторская документация — это описание реальных или гипотетических (еще не изготовленных) состояний изделий, которые могут быть получены в результате реального или гипотетического изготовления при безусловном соблюдении всех требований в КД (в условиях бездефектного производства). Свойство КД таково, что допуски параметров конструкции определяются текущим состоянием документации и являются неизменными (стационарными), а значения этих параметров заменяются случайным (стохастическим) образом в пределах заданных допусков при каждом реальном или гипотетически возможном воплощении, следовательно, могут быть осуществлены и развернуты во времени. Таким образом, число реальных или гипотетических

воспроизведений однородных изделий τ (изготовленных по одной документации, на одном оборудовании, одними специалистами), при котором они способны обеспечить надежность, — случайная величина, и по смыслу она не может быть ничем иным, как временем безотказной работы изделия t , выраженным в числе реальных воспроизведений. Указанное свойство КД является основополагающим для оценки надежности в виде $R(t) = P(\tau > t)$.

Подход к верификации и оценке конструкторских решений для обоснования надежности. Профессия конструктора всегда конкретна, для нее нетерпимы поверхностность, поспешность и непродуманность решений. Поэтому при выпуске КД требуется проведение верификации конструкторских решений, процедуры которой осуществляются последовательно с учетом определений, приведенных в таблице:

- выявляют служебное назначение изделия с учетом требований технического задания на разработку, методов внешнего и внутреннего проектирования;
- проводят функциональный анализ для выявления требуемых функций, которые обеспечивают работоспособность изделия;
- устанавливают отказы в виде вербального описания гипотетических событий, препятствующих выполнению требуемых функций;
- придают критичным элементам свойства с помощью логической формулы: «Для того чтобы предотвратить причину отказа в виде (указать чего именно), необходимо, чтобы (такой-то) критичный элемент обладал свойством (указать каким именно)»;
- определяют найденные свойства критичных элементов с помощью параметров или показателей вероятности проявления свойств (данная процедура формирует чек-лист параметров (показателей) критичных элементов, требующих расчетно-экспериментального подтверждения);
- проводят инженерные расчеты, которые определяют значения параметров (показателей) критичных элементов при заданных внешних нагрузках и воздействиях;
- устанавливают границы допустимых значений параметров исходя из анализа худших комбинаций режимов и факторов условий эксплуатации изделия;
- устанавливают виды и значения конструктивных запасов и проводят расчет условной вероятности безотказной работы методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций с учетом структурной схемы надежности;
- проводят анализ релевантности параметров (показателей) критичных элементов требованиям конструкторской документации, на основании которого корректируют КД в части установления недостающих требований для изготовления и эксплуатации;
- проводят оценку рисков невыполнения условий бездефектного производства.

По результатам выполнения процедур верификации проводят оценку конструкторских решений для обоснования надежности с учетом влияния на надежность мероприятий по предупреждению отказов. Если условная вероятность с учетом оценки рисков условий бездефектного производства окажется ниже требуемого значения, то рассматривают конструкторско-технологические требования надежности с корректировкой диапазонов значений показателей или параметров, корректируют структурную модель надежности, изменяют принятые конструкторские и технологические решения, выполняют недостающие расчеты и т. п. После этого проводят итерационный анализ надежности с оценкой расчетного значения безотказности вплоть до выполнения заданного условия надежности.

Заключение. На основании изложенного подхода к верификации и оценке конструкторских решений для обоснования надежности разработаны процедуры конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН), которые были использованы для исследования разработок механизмов одноразового срабатывания в АО «РЕШЕТНЁВ», АО «ВПК «НПО машиностроения», АО «Научный центр прикладной электродинамики», АО «ОКБ Зенит» и ООО «НПЦ «МКА» [5, 20–22].

Практика показала, что последовательное выполнение конструктором процедур КТАН при разработке высокоответственных изделий позволяет выявить и своевременно исправить скрытые конструкторские ошибки, способные привести к отказам, которые не могут быть выявлены штатными расчетно-экспериментальными методами. Практическое значение изложенного подхода к конструированию на основе прогнозирования заключается в системности выявления потенциальных угроз с целью снижения рисков возникновения отказов конструкторскими методами, вытекающими из логики работы конструктора, — принятия обоснованных решений исходя из опыта выполнения проектно-конструкторских работ и практических наработок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Плахотникова Е.В., Сафонов А.С., Ушаков М.В. Проектирование изделий с учетом требований к показателям надежности. *Известия ТулГУ: Технические науки*, 2015, вып. 7, ч. 1, с. 134–139.
- [2] Ковалев В.В. Что такое «не везет» и как с ним бороться, или как обеспечить надежность РЭС при разработке. *Компоненты и технологии*, 2008, № 6, с. 100–107.
- [3] Ковалев В.В. Что такое «не везет» и как с ним бороться, или как обеспечить надежность РЭС при разработке (окончание). *Компоненты и технологии*, 2008, № 7, с. 132–138.
- [4] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [5] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2018, 338 с.

- [6] Веников Г.В. *Проектирование и надежность*. Москва, Знание, 1971, 96 с.
- [7] Краузе В., ред. *Конструирование приборов*. Москва, Машиностроение, 1987, кн. 1: 384 с.
- [8] Кулагин В.В. *Основы конструирования оптических приборов*. Ленинград, Машиностроение, 1982, 312 с.
- [9] Грейнер Л.К. *Основы методологии проектирования электрических аппаратов (Из опыта конструирования и расчета аппаратов высокого напряжения)*. Ленинград, Госэнергоиздат, 1963, 214 с.
- [10] Парфенов Е.М., Афанасенко В.Ф., Владимиров В.И. [и др.]. *Базовый принцип конструирования РЭА*. Москва, Радио и связь, 1981, 120 с.
- [11] Орлов П.И. *Основы конструирования: справочно-методическое пособие*. Москва, Машиностроение, 1977, кн. 1: 623 с.
- [12] Сиверцев И.Н. *Расчет и проектирование судовых конструкций (суда металлургические)*. Москва, Транспорт, 1968, 336 с.
- [13] Харинский А.Л. *Основы конструирования элементов радиоаппаратуры*. Ленинград, Энергия, 1971, 464 с.
- [14] Литвин Ф.Л. *Проектирование механизмов и деталей приборов*. Ленинград, Машиностроение, 1973, 696 с.
- [15] Никитин В.А., Переслегин С.Б., Парибок А.А. [и др.]. *Инженерная онтология: инженерия как странствие*. Екатеринбург, Форжект: Ажур, 2013, 280 с.
- [16] Соколов Ю.А., Кричевский А.И., Иванов С.А. *Производственная кооперация: субконтракция и аутсорсинг*. Новосибирск, Сибирский успех, 2009, 56 с.
- [17] Бобков Н.М. Систематизация терминологии в области конструирования радиоэлектронных систем. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*, 2014, № 3, с. 19–29.
- [18] Бобков Н.М. О конструкторской терминологии национальных стандартов. *Стандарты и качество*, 2012, № 9, с. 48–52.
- [19] Бобков Н.М. Категории науки о конструировании. *Системы и средства связи, телевидения и радиовещания*, 2010, № 1–2, с. 136–142.
- [20] Горн И.А., Иванцов Н.Ю., Скрябин В.В. и др. О результатах проведения анализа надежности механических устройств раскрытия панелей солнечных батарей МКА НТ-100. *Решетнёвские чтения (9–12 ноября 2016, Красноярск)*. Красноярск, 2016, ч. 1, с. 620–621.
- [21] Похабов Ю.П., Каверин В.А., Белов М.В. [и др.]. Результаты конструкторско-технологического анализа надежности головного обтекателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5.
DOI: 10.18698/2308-6033-2023-5-2273
- [22] Похабов Ю.П., Каверин В.А., Налиткин О.Н. [и др.]. Использование методов верификации проектно-конструкторских решений на примере корпуса головного антенного обтекателя. *Труды секции 22 имени академика В.Н. Челомея XLVIII Академических чтений по космонавтике. Вып. 12*. Реутов, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2024, с. 94–106.

Статья поступила в редакцию 18.12.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П., Каверин В.А., Васильев А.М., Земсков В.А., Щукин Д.А. Подход к конструированию на основе прогнозирования надежности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 4. EDN QMARYX

Похабов Юрий Павлович — канд. техн. наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ». e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Каверин Виктор Александрович — заместитель начальника отделения — начальник комплексного конструкторского отдела, АО «ВПК «НПО машиностроения»; заслуженный конструктор Российской Федерации. e-mail: vpk@vpk.promash.ru

Васильев Александр Михайлович — ведущий инженер-конструктор, АО «ВПК «НПО машиностроения»; заслуженный работник промышленности Московской области. e-mail: vpk@vpk.promash.ru

Земсков Вячеслав Александрович — главный специалист, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: vpk@vpk.promash.ru

Щукин Дмитрий Анатольевич — заместитель начальника комплексного конструкторского отдела, АО «ВПК «НПО машиностроения»; заслуженный конструктор Российской Федерации. e-mail: vpk@vpk.promash.ru

An approach to design based on reliability forecasting

© Yu.P. Pokhabov¹, V.A. Kaverin², A.M. Vasiliev²,
V.A. Zemskov², D.A. Shchukin²

¹JSC “NPO PM MKB”,
Zheleznogorsk, 662972, Krasnoyarsk Territory, Russian Federation

²JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”,
Reutov, 143960, Moscow Region, Russian Federation

The statistical foundations of the modern reliability theory are not intended to forecast reliability in design based on selecting the design parameter values and establishing the design documentation requirements. A design method is required that allows justifying the design ability to ensure reliability of a product that does not yet exist by selecting materials, dimensions, tolerances, interrelations of structural elements, and other solutions. The paper considers an approach to design based on reliability forecast that links the performance parameters with the reliability indicators, provided that the formalized procedures are followed. They include design parameters justification and evaluation based on the specified operating modes and conditions, establishment of necessary and sufficient design documentation requirements based on selected and justified design parameters; and meeting the conditions of defect-free production. To implement this approach, the paper establishes a relationship between performance and reliability using the design reserves, and proposes a reliability terminology that allows the designer to verify and evaluate their solutions for reliability justification. It provides an algorithm and procedures of verification of design solutions with assessment of predicted reliability. Practical significance of the approach lies in systematic identification of potential threats to reduce the risks of failures using design methods arising from the logic of the designer's work.

Keywords: reliability-forecast-based prediction, design documentation, design errors, verification of design solutions, design and technological reliability analysis

REFERENCES

- [1] Plahotnikova E.V., Safonov A.S., Ushakov M.V. *Proyektirovaniye izdeliy s uchetom trebovaniy k pokazatelyam nadozhnosti* [The design of products taking with requirements of reliability parameters]. *Izvestiya TulGU: Tekhnicheskije nauki — Proceedings of the TSU: Technical sciences*, 2015, issue 7, part 1, pp. 134–139.
- [2] Kovalev V.V. *Chto takoe “ne vezet” i kak s nim borotsya, ili kak obespechit nadezhnost RES pri razrabotke* [What is “bad luck” and how to deal with it, or how to ensure the RES reliability during development]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2008, no. 6, pp. 100–107.
- [3] Kovalev V.V. *Chto takoe “ne vezet” i kak s nim borotsya, ili kak obespechit nadezhnost RES pri razrabotke (okonchanie)* [What is “bad luck” and how to deal with it, or how to ensure the RES reliability during development (final part)]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2008, no. 7, pp. 132–138.
- [4] Conley P.L., ed. *Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design*. NJ, John Wiley & Sons, 1998, 794 p.
- [5] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadozhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srabatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the

- need for mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018, 338 p.
- [6] Venikov G.V. *Proyektirovaniye i nadozhnost'* [Design and reliability]. Moscow, Znaniye Publ., 1971. 96 p.
- [7] Krause V., ed. *Konstruirovaniye priborov* [Design of devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, book 1, 384 p.
- [8] Kulagin V.V. *Osnovy konstruirovaniya opticheskikh priborov* [Fundamentals of designing optical devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 312 p.
- [9] Greiner L.K. *Osnovy metodologii proyektirovaniya elektricheskikh apparatov: (Iz opyta konstruirovaniya i rascheta apparatov vysokogo napryazheniya)* [Fundamentals of the methodology of designing electrical apparatus: (From the experience of designing and calculating high-voltage apparatus)]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963, 214 p.
- [10] Parfenov E.M., Afanassenko V.F., Vladimirov V.I. et al. *Bazovyy printsip konstruirovaniya REA* [Basic principle of designing electronic equipment]. Moscow, Radio and Svyaz Publ., 1981, 120 p.
- [11] Orlov P.I. *Osnovy konstruirovaniya: spravochno-metodicheskoe posobie* [Fundamentals of design: reference and methodological manual]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, book 1, 623 p.
- [12] Sivertsev I.N. *Raschet i proyektirovaniye sudovykh konstruksiy (suda metallicheskiye)* [Calculation and design of ship structures (metal ships)]. Moscow, Transport Publ., 1968, 336 p.
- [13] Kharinsky A.L. *Osnovy konstruirovaniya elementov radioapparatury* [Fundamentals of designing radio equipment elements]. Leningrad, Energia Publ., 1971, 464 p.
- [14] Litvin F.L. *Proektirovaniye mekhanizmov i detaley priborov* [Design of mechanisms and instrument parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973, 696 p.
- [15] Nikitin V.A., Pereslegin S.B., Paribok A.A. et al. *Inzhenernaya ontologiya: inzheneriya kak stranstviye* [Engineering ontology: engineering as a journey]. Ekaterinburg, Forzhekt: Azhur Publ., 2013, 280 p.
- [16] Sokolov Yu.A., Krichevsky A.I., Ivanov S.A. *Proizvodstvennaya kooperatsiya: subkontraktatsiya i outsorsing* [Industrial cooperation: subcontracting and outsourcing]. Novosibirsk, Siberian success Publ., 2009, 56 p.
- [17] Bobkov N.M. Sistemizatsiya terminologii v oblasti konstruirovaniya radioelektronnykh sistem [Design engineering of radioelectronic systems terminology systematization]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva — Transactions of Nizhny Novgorod state technical university named after R.E. Alekseev*, 2014, no. 3, pp. 19–29.
- [18] Bobkov N.M. O konstruktorskoy terminologii natsionalnykh standartov [On design terminology of the national standards]. *Standarty i kachestvo — Standards and Quality*, 2012, no. 9, pp. 48–52.
- [19] Bobkov N.M. Kategorii nauki o konstruirovanii [Categories of the design science. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya — Systems and Means of Communication, Television and Radio Broadcasting*, 2010, no. 1–2, pp. 136–142.
- [20] Gorn I.A., Ivantsov N.Yu., Skryabin V.V. et al. O rezultatakh provedeniya analiza nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv raskrytiya paneley solnechnykh batarey MKA NT-100 [On the results of the analysis of the reliability of mechanical devices for opening the MKA NT-100 solar panels]. *Reshetnevskie chteniya (9–12 noyabrya 2016, Krasnoyarsk)* [Reshetnev Readings (November 9–12, 2016, Krasnoyarsk)]. Part 1. Krasnoyarsk, 2016, pp. 620–621.

- [21] Pokhabov Yu.P., Kaverin V.A., Belov M.V. et al. Rezultaty konstruktorskoteekhnologicheskogo analiza nadezhnosti tolkatelya golovnogo obtekatelya [Results of reliability design and technological analysis of the nose fairing pusher]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2273>.
- [22] Pokhabov Yu.P., Kaverin V.A., Nalitkin O.N. et al. Ispolzovanie metodov verifikatsii proektno-konstruktorskikh resheniy na primere korpusa golovnogo antennogo obtekatelya [Using verification methods in design solutions on the example of a head antenna fairing body]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XLVIII Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of Section 22 named after Academician V.N. Chelomey of the XLVIII Academic Readings on Cosmonautics]. Issue 12. Reutov, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”, 2024, pp. 94–106.

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc., Chief Specialist, JSC “NPO PM MKB”.
e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Kaverin V.A., Deputy Head of Department, Head of the Integrated Design Department, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”; Honored Designer of the Russian Federation.
e-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Vasiliev A.M., Leading Design Engineer, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”; Honored Worker of Industry of the Moscow Region. e-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Zemskov V.A., Chief Specialist, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”.
e-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Shchukin D.A., Deputy Head of the Integrated Design Department, JSC MIC “NPO Mashinostroyeniya”; Honored Designer of the Russian Federation.
e-mail: vpk@vpk.npomash.ru