

Коэффициент сохранения эффективности и его стандартизация

Виктор А. Нетес, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация
v.a.netes@mtuci.ru



Виктор А. Нетес

Резюме. Цель. Способствовать лучшему пониманию, более широкому и правильному применению коэффициента сохранения эффективности. Он является наиболее подходящим показателем для оценки надежности сложных технических систем, в которых возможны частичные отказы, переводящие систему в состояния, промежуточные между полной работоспособностью и полной неработоспособностью. **Методы.** В статье применяются методы теории вероятностей и сравнительный анализ текстов межгосударственных, российских и международных стандартов по надежности. **Результаты.** Указан определяющий вклад российских исследователей в создание и развитие методов применения показателей эффективности для оценки надежности сложных систем. Выявлены недостатки в базовых стандартах по надежности, касающиеся коэффициента сохранения эффективности и смежных понятий. Именно, в терминологическом ГОСТ 27.002–2015 указаны формулировки, требующие уточнения. Они касаются понятий частичный отказ, частично работоспособное состояние и частично неработоспособное состояние. Предложено более широкое и точное определение частичного отказа. Отмечена необходимость обсуждения и уточнения соотношения между частично работоспособным и частично неработоспособным состояниями. В ГОСТ 27.003–2016, устанавливающем состав и общие правила задания требований по надежности, указаны ошибки в формулировках при классификации объектов по числу возможных (учитываемых) состояний и в примерах возможных модификаций коэффициента сохранения эффективности в различных отраслях техники, являющихся вероятностями выполнения задачи, задания и т.п. В статье предложены исправления в соответствующие формулировки. Установлено, что хотя коэффициент сохранения эффективности и отсутствует в международном терминологическом стандарте по надежности (IEC 60050-192:2015), фактически он неявно возникает в двух стандартах МЭК (IEC 61703:2016 и IEC 62673:2013), в которых отнесен к показателям готовности. **Заключение.** Результаты статьи будут полезны специалистам, занимающимся оценкой надежности сложных технических систем и стандартизацией в области надежности. Их реализация позволит улучшить межгосударственные, российские и международные стандарты по надежности.

Ключевые слова: сложная система, надежность, частичный отказ, коэффициент сохранения эффективности, выходной эффект, межгосударственные, российские и международные стандарты.

Для цитирования: Нетес В.А. Коэффициент сохранения эффективности и его стандартизации // Надежность. 2021. №2. С. 3-8. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-3-8>

Поступила 12.02.2021 г. / После доработки 12.04.2021 г. / К печати 21.06.2021 г.

Введение

Традиционные показатели надежности, характеризующие безотказность и готовность, определяются в предположении, что технический объект может находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном. Однако для многих сложных систем характерны частичные отказы, которые переводят объект в промежуточное состояние с пониженной (частичной) работоспособностью. Основным показателем надежности для таких систем служит коэффициент сохранения эффективности (КСЭ), которому посвящен целый ряд публикаций, указанных ниже.

Цель данной статьи – способствовать лучшему пониманию КСЭ, его более широкому и правильному применению. Она адресована специалистам, занимающимся оценкой надежности сложных систем и стандартизацией надежности. В ней анализируется, в какой мере и насколько верно отражен КСЭ в принятых за последние годы межгосударственных, российских и международных стандартах. Рассмотрены также тесно связанные с КСЭ понятия частичный отказ и частично (не)работоспособное состояние. Проведенный анализ выявил недостатки, присущие этим стандартам, в статье даются предложения по их устранению.

История вопроса

Необходимость рассмотрения систем, имеющих более двух уровней работоспособности, стала ясна еще в 60-е годы прошлого века. Об этом упоминалось в классической монографии [1]. В частности, там указано, что «понятие отказа, связанное с полной или существенной потерей работоспособности [сложной] системы, выглядит весьма искусственным. <...> В таких случаях под надежностью системы следует понимать стабильность эффективности с учетом надежности частей, составляющих систему» [1, с. 84]. Однако дальше эта идея там развита не была, и в общей математической модели для определения показателей надежности в фазовом пространстве выделялось множество неработоспособных состояний.

Заслуга начала систематического изложения методов расчета эффективности принадлежит И.А. Ушакову [2]. Он также много сделал для популяризации этого направления. Соответствующие разделы были включены в известные справочники [3–6]. Однако в его публикациях речь шла об абсолютных значениях эффективности, определяемых с учетом надежности, при этом остальные факторы, влияющие на эффективность, практически не рассматривались. Уже позже И.А. Ушаков пришел к целесообразности рассмотрения безразмерного коэффициента, который показывает относительное снижение эффективности функционирования системы за счет отказов ее элементов [7, с. 131], т.е. фактически КСЭ.

Первой книгой, в которой обстоятельно рассматривался именно КСЭ, была [8]. Ее хорошо дополняет [9],

где описана оценка КСЭ расчетно-экспериментальным методом. Эти книги не потеряли актуальность и по сей день, их можно рекомендовать всем, интересующимся этой темой. Обзор дальнейших результатов, посвященных расчету и оценке КСЭ, был представлен в [10].

Определение и смысл КСЭ

КСЭ присутствует в отечественных терминологических стандартах по надежности, начиная с 1983 г. За это время его определение мало менялось, и в ныне действующем стандарте [11] оно формулируется так: отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают. В международных стандартах этого показателя в явном виде нет.

Если обозначить показатель эффективности использования объекта E , а его номинальное значение – E_0 , то соотношение, определяющее КСЭ, обозначаемый $K_{эф}$, выглядит так: $K_{эф} = E/E_0$. Стоит подчеркнуть, что данная формула дает именно определение КСЭ, а отнюдь не метод его расчета на практике [8].

Под эффективностью применения объекта по назначению понимают его свойство создавать некоторый полезный результат (выходной эффект) в течение периода эксплуатации в определенных условиях [12]. При этом выходной эффект определяется как полезный результат, получаемый при эксплуатации объекта. Он может определяться различным образом. В частности, выходной эффект может представлять собой доход, получаемый при работе объекта, и выражаться в денежных единицах. Однако чаще для него используют натуральные измерители. Ниже приведены примеры выходного эффекта для разных типов систем:

- производственные системы – количество выпущенной продукции (в штуках, тоннах, кубометрах, гектолитрах и т.п.);
- разнообразные системы обслуживания – число успешно обслуженных пользователей или заявок;
- транспортные системы – количество перевезенных грузов (в тоннах, кубометрах и т.п.) или число перевезенных пассажиров;
- системы передачи, сбора или обработки информации – количество переданной, собранной или обработанной информации.

Обычно в качестве показателя эффективности используется математическое ожидание (среднее значение) выходного эффекта. Смысл КСЭ достаточно прост: пусть, например, в качестве выходного эффекта берется доход, а $K_{эф} = 0,98$, это означает, что доход, приносимый объектом, снижается из-за отказов в среднем на 2 %.

Кроме того, в качестве показателя эффективности может быть взята вероятность выполнения объектом задачи (задания и т.п.). Это имеет смысл для объектов

многократного циклического применения и однократного применения [12]. Вероятность выполнения задачи также может быть представлена как математическое ожидание выходного эффекта. В самом деле, если принять выходной эффект равным 1 в случае решения задачи и 0 в противном случае, то математическое ожидание такой случайной величины равно вероятности того, что она принимает значение 1, т.е. вероятности выполнения задачи. В такой ситуации КСЭ приобретает непосредственный вероятностный смысл: он равен вероятности того, что выполнение задачи не будет сорвано из-за отказов [8].

КСЭ может применяться и для объектов, все состояния которых могут быть однозначно разделены на работоспособные и неработоспособные. При этом он обычно сводится к таким традиционным показателям надежности, как коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, коэффициент оперативной готовности [8]. Подход, основанный на применении КСЭ, в таких ситуациях облегчает правильный выбор нормируемых показателей.

Частичный отказ, частично работоспособное и частично неработоспособное состояния

Как уже отмечалось, КСЭ в первую очередь нужен для систем, в которых возможны частичные отказы. Это понятие вводится в [11] в примечании к термину «отказ», где сказано, что частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние. К сожалению, в [11] отсутствует объяснение, что это значит, однако есть понятие «частично работоспособное состояние» – состояние объекта, в котором он способен выполнять одни функции и одновременно не способен выполнять другие. Оно дано в примечании к терминам «работоспособное состояние» и «неработоспособное состояние». Таким образом, налицо некоторая нестыковка.

Вопрос о соотношении частично работоспособного и частично неработоспособного состояний можно решать по-разному. По мнению автора, это по сути одно и то же. Например, если в каком-то состоянии выходной эффект составляет 70 % от максимального значения, то это состояние будет на 70 % (частично) работоспособным и на 30 % (частично) неработоспособным. Это можно интерпретировать как фазификацию критерия отказа, т.е. разделение всего множества состояний объекта на два дополняющих друг друга нечетких подмножества работоспособных и неработоспособных состояний (впервые эта идея была высказана в [13]). Вместе с тем, некоторые авторы различают частично работоспособное и частично неработоспособное состояния, считая, что первое ближе к работоспособному, а второе – к неработоспособному [14, с. 53]. Поэтому этот вопрос требует обсуждения и уточнения.

Кроме того, определения частичного отказа и частично (не)работоспособного состояния в [11]

восходят к международному терминологическому стандарту [15] и применимы только к многофункциональным объектам. Однако эти понятия имеют смысл рассматривать и для объектов, выполняющих одну функцию. Например, технологическая система может работать с пониженной производительностью. Поэтому соответствующие формулировки стоит скорректировать. В частности, определить частично (не) работоспособное состояние как состояние объекта с пониженной способностью функционировать как требуется, характеризующееся потерей способности выполнять некоторые, но не все, требуемые функции или снижением выходного эффекта. Это будет близко к определению термина «деградированное состояние» (degraded state) в [15].

ГОСТ 27.003–2016

Состав и общие правила задания требований по надежности устанавливает стандарт [12]. Среди показателей надежности, используемых в нем, есть и КСЭ. Этот стандарт принят взамен [16] и во многом повторяет его основные положения. К сожалению, среди внесенных в [12] изменений есть не только позитивные, но и ошибочные.

Начнем с изменений в лучшую сторону. Если в [16] говорится об изделиях, то [12] используется уже более общий термин «объект» (хотя эта замена выполнена не везде, и в тексте еще встречается слово «изделие»). Соотношение между этими двумя понятиями было подробно проанализировано в [17], поэтому здесь этот вопрос не рассмотрен. В [12] добавлены полезные примечания, поясняющие, что понимается под эффективностью, и определение выходного эффекта (они были приведены выше).

С другой стороны, в одном из пунктов [12], важном для понимания области применения КСЭ, допущена досадная ошибка. Кратко она уже упоминалась в [18]. Дело в том, что среди основных признаков, по которым подразделяют объекты при задании требований по надежности, есть число возможных (учитываемых) состояний объекта по работоспособности в процессе эксплуатации. По этому признаку в [16] выделялись изделия вида I, которые в процессе эксплуатации могут находиться в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном, и вида II, которые, кроме указанных двух состояний, могут находиться в некотором числе частично неработоспособных состояний, в которые они переходят в результате частичного отказа. В [12] отказались от безликого разделения на виды, обозначаемые римскими цифрами, но в соответствующем пункте стандарта (п. 6.3.2) возникла бессмысленная формулировка о том, что объекты подразделяют на объекты, находящиеся в работоспособном состоянии, и объекты, находящиеся в неработоспособном состоянии.

Правильная формулировка этого пункта такова: по числу возможных (учитываемых) состояний (по рабо-

тоспособности) объекты подразделяют на: объекты, которые в процессе эксплуатации могут находиться в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном, и объекты, которые, кроме указанных двух состояний, могут находиться в некотором числе частично (не)работоспособных состояний, в которые они переходят в результате частичного отказа.

Дополнительные объяснения, касающиеся КСЭ, приведены в приложении А, которое сохранено таким же, как в [16]. В нем сказано, что КСЭ представляет собой обобщенное наименование группы показателей, применяемых в различных отраслях техники и имеющих собственные наименования, обозначения и определения. К сожалению, среди примеров ошибочно указаны несколько вероятностных показателей: «вероятность выпуска заданного количества продукции определенного качества за смену (месяц, квартал, год)» для технологических систем, «вероятность выполнения программы полета» космическим аппаратом, «вероятность выполнения типовой задачи (полетного задания) за заданное время» самолетом. Ошибка в том, что следует различать надежность и способность выполнять задачу (программу, задание и т.п.), этот вопрос был детально разобран в [19]. Действительно, способность объекта выполнять задачу может зависеть от факторов, не имеющих отношение к его надежности. Например, самолет при полной исправности может не выполнить задачу (полетное задание) из-за неблагоприятных погодных условий или неправильных действий наземных служб. Вместе с тем, как было указано выше, вероятность выполнения задачи (программы, задания и т.п.) может служить показателем эффективности, используемым при определении КСЭ.

ГОСТ Р 27.010–2019 (МЭК 61703:2016) и ИЕС 62673:2013

Стандарт [20] разработан на основе стандарта МЭК [21] и является его модифицированной версией. Он содержит п. 6.1.2.4, озаглавленный «Расширение понятия коэффициента готовности на объекты с несколькими состояниями». В нем рассматриваются системы, состояния которых, как сказано, «невозможно разделить только на работоспособное и неработоспособное, а необходима более точная классификация». Отмечается, что «это особенно часто имеет место для производства продукции, в том числе нефти, газа, электричества, воды и т.д.». Для таких систем определяется показатель, про который написано, что он «является обобщением среднего коэффициента готовности и математического ожидания производительности, его часто называют «производственной готовностью» системы. Более широко его также называют результативностью объекта». Приводится простой пример производственной системы, для которой делается расчет такого показателя и обычного коэффициента готовности.

При этом в стандарте дается ссылка на монографию [22]. В предисловии к этой книге авторы выражают признательность учителю и другу И.А. Ушакову, однако при изложении основных понятий, относящихся к системам со многими состояниями, из его работ использован только один пример, взятый из [6].

Фактически, рассматриваемый в указанном пункте [20, 21] показатель является КСЭ. К сожалению, в [20] этот факт даже не упоминается. Понятно, что [20] создан на основе стандарта МЭК. Однако он является модифицированным стандартом, изменения состоят в том, что ссылки на международные стандарты заменены ссылками на национальные стандарты. Указанный выше п. 6.1.2.4 также следовало бы изменить, указав, что речь идет о КСЭ. При этом ссылку на [22] стоило заменить ссылкой на отечественную публикацию по этой теме, лучше всего [8].

Вообще, в [20] надо было внести и другие изменения в список библиографии. Американское издание [1] на английском языке следовало заменить оригинальным русским изданием. Ряд книг из списка были переведены на русский язык (Р. Барлоу и Ф. Прошана, В. Феллера, Д.Р. Кокса), для них стоило указать русские издания, что было бы гораздо удобнее для отечественных пользователей стандарта.

Попутно хочется высказать еще одно замечание, относящееся ко многим стандартам, созданным на основе международных стандартов. Это расхождение с другими стандартами по надежности в терминологии и обозначениях. В частности, в [20] коэффициент готовности обозначен A (от английского availability), хотя в нашей стране его традиционно обозначают K_r , что закреплено стандартом [12]; для объектов непрерывного длительного применения и многократного циклического применения вместо русских аббревиатур (НПДП и МКЦП [12]) использованы английские (COI и IOI) и т.п. В подобных ситуациях вслед за авторами [23] хочется воскликнуть «Чему верить?». Понятно, что тут возникает противоречие между принципами преемственности и близости к международным стандартам [24], однако разработчики стандартов должны находить в этих ситуациях разумные компромиссы. Для обозначений показателей надежности и видов объектов можно было, например, указать и международное, и русское обозначения (как это сделано для физических величин в [25]).

Еще один стандарт МЭК, в котором неявно появляется КСЭ, это [26] (с ним можно ознакомиться в [27]). Он посвящен надежности сетей связи, целесообразность применения КСЭ для которых была показана в [28–31]. В [26] рекомендуются два показателя: сетевая готовность из конца в конец (end-to-end) и готовность всей сети (full-end), предназначенные для оценки надежности с точки зрения конечных пользователей и оператора сети или поставщика услуг соответственно. Первый из них представляет собой коэффициент готовности направления связи между парой узлов сети, второй же является

взвешенной суммой таких коэффициентов готовности для различных пар узлов и фактически оказывается КСЭ [27, 30, 31].

Заключение

Одним из достижений российской школы надежности, о котором не следует забывать, является определение и разработка методов расчета и оценки КСЭ. Нашим представителям в ТК 56 МЭК следует предпринять усилия для включения этого показателя в международные стандарты, тем более что в неявном виде он в них уже присутствует. Решение этой задачи соответствует одной из целей, поставленных в ст. 3 ФЗ-162 «О стандартизации»: содействовать интеграции Российской Федерации в международные системы стандартизации в качестве равноправного партнера.

К сожалению, в межгосударственных стандартах есть неточности, касающиеся КСЭ. Именно, в ГОСТ 27.002–2015 следует уточнить формулировки, относящиеся к терминам «частичный отказ» и «частично (не)работоспособное состояние»; в ГОСТ 27.003–2016 требуется внести исправления в формулировки при классификации объектов по числу возможных (учитываемых) состояний и при указании примеров возможных модификаций КСЭ в различных отраслях техники, являющихся вероятностями выполнения задачи, задания и т.п. В статье для них предложены корректировки.

Российский стандарт ГОСТ Р 27.010–2019, разработанный на основе стандарта МЭК, не в полной мере согласуется с указанными выше базовыми стандартами по надежности и игнорирует отечественные наработки в области КСЭ. Вообще, говоря о создании российских и межгосударственных стандартов на основе международных, хочется привести слова И.А. Ушакова, написанные им при обсуждении проекта одного из таких документов: «Основная идея отечественного стандарта – не следовать слепо букве рекомендаций МЭК, а найти наиболее полное соответствие духу этих рекомендаций, но с неперменным отражением огромного отечественного опыта в теории и практике надежности и более чем полувековых традиций отечественной технической документации и научно-технической литературы». Это напутствие хочется адресовать всем разработчикам стандартов.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
2. Ушаков И.А. Эффективность функционирования сложных систем. – В кн.: О надежности сложных технических систем. М.: Сов. радио, 1966. С. 26–56.
3. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1966. 432 с.

4. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
5. Надежность технических систем: справочник / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 606 с.
6. Handbook of Reliability Engineering / Ed. I.A. Ushakov. New York: John Wiley & Sons, 1994. 663 p.
7. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. М.: Дрофа, 2008. 239 с.
8. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. М.: Радио и связь, 1981. 176 с.
9. Резиновский А.Я. Испытания на надежность радиоэлектронных комплексов. М.: Радио и связь, 1985. 168 с.
10. Нетес В.А. Коэффициент сохранения эффективности – показатель надёжности сложных систем // Надежность. 2012. № 4. С. 14–23.
11. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.
12. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2018. IV, 18 с.
13. Нетес В.А. Метод оценки надежности сложных систем и его применение к информационным сетям древовидной структуры // Сборник научных трудов ЦНИИС. 1976. Вып. 2. С. 17–23.
14. Надежность и техническое обслуживание АМТС с программным управлением / Под. ред. В.Г. Дедоборща и Н.Б. Суторихина. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.
15. IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 192. Dependability.
16. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.
17. Нетес В.А. Объект в надежности: определение и содержание понятия // Надежность. 2019. Т. 19. № 4. С. 3–7.
18. Нетес В.А. Как вернуть доверие? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2019. № 2. С. 19–24.
19. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3–14.
20. ГОСТ Р 27.010–2019 (МЭК 61703:2016). Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтнопригодности. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 80 с.
21. IEC 61703:2016. Mathematical Expressions for Reliability, Availability, Maintainability and Maintenance Support Terms.
22. Lisnianski A., Frenkel I., Ding Y. Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers. London: Springer-Verlag, 2010. 393 p.
23. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. Чему верить? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2018. № 8. С. 27–31.

24. Нетес В.А. Принципы стандартизации терминологии по надежности // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 19–23.

25. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. М.: Стандартинформ, 2018. III, 27 с.

26. IEC 62673:2013. Methodology for Communication Network Dependability Assessment and Assurance.

27. Нетес В.А. Надежность сетей связи в стандартах МЭК // Вестник связи. 2014. № 2. С. 13–15.

28. Нетес В.А., Сметанин Л.Д. Применение коэффициента сохранения эффективности для анализа надежности средств связи // Электросвязь. 1988. № 12. С. 9–12.

29. Нетес В.А. Выбор показателей надежности сетей доступа // Первая миля. 2019. № 8. С. 52–55.

30. Netes V. Dependability measures for access networks and their evaluation // Proc. of the 26th Conf. of Open Innovations Association FRUCT, 2020. P. 352–358.

31. Netes V. Modern network technologies and dependability // Proc. of the 3d Intern. Science and Technology Conf. “Modern Network Technologies – 2020”. P. 104–113.

Сведения об авторе

Виктор Александрович Нетес – доктор технических наук, профессор кафедры «Сети связи и системы коммутации» Московского технического университета связи и информатики, Москва, Российская Федерация, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru

Вклад автора в статью

Автором **Нетесом В.А.** проведен анализ межгосударственных, российских и международных стандартов по надежности в части определений и других формулировок, относящихся к коэффициенту сохранения эффективности и смежным понятиям (частичный отказ, частично работоспособное и частично неработоспособное состояния), выявлены имеющиеся в них недостатки и даны предложения по их устранению.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.