

УДК 621.3, 004.052, 519.718

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ И СИСТЕМ

Конесев С.Г.¹, Хазиева Р.Т.¹

¹ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия (450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

Рассмотрены проблемы анализа надежности сложных компонентов и систем. Проведены сравнительный анализ существующих методов, оценка их возможностей. Проанализированы достоинства и недостатки каждого метода в отдельности. Приведены примеры использования аналитических методов оценки надежности электротехнических и энергетических систем. Подчеркнута роль аналитических методов для исследования надежности сложных технических систем, поскольку для большого количества факторов, влияющих на надежность систем, высокая достоверность имитационного моделирования практически недостижима. Показано, что для оценки надежности и эффективности функционирования каждой сложной технической системы с большим числом состояний необходимо, основываясь на традиционных методах, разработать методику, учитывающую особенности функционирования и своеобразие конкретной технической системы, позволяющую оценить погрешности вычисления показателей надежности с требуемой точностью.

Ключевые слова: надежность, методы оценки, сложные компоненты.

METHODS FOR ESTIMATING THE RELIABILITY OF COMPLEX COMPONENTS AND SYSTEMS

Konesev S.G.¹, Khazieva R.T.¹

¹«Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russia (450062, Ufa, street Kosmonavtov, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

We have done the review problems of reliability analysis of complex components and systems. Comparative analysis of existing methods and rating of their capabilities were made. Advantages and disadvantages of each method individually were analyzed. Examples of the use of analytical methods for assessing the reliability of electrical and power systems are presented. The role of analytical methods for the study of the reliability of complex technical systems was allocated, because high accuracy of the imitation simulation is practically unattainable for large number of factors, which influence on the reliability systems. It is shown that it is necessary to develop a methodology which consider features the functioning and characteristics of specific technical systems and which allow to estimate the error of calculating reliability indices with the required accuracy. It is done for assess the reliability and efficiency of each complex technical systems with a large number of states by basing on traditional methods.

Keywords: reliability, evaluation methods, complex components.

Оценка надежности сложных систем выполняется с помощью методов, связанных с использованием данных об отказах и восстановлениях элементов, полученных в процессе эксплуатации систем.

Цель исследования

Сравнительный анализ существующих методов оценки показателей надежности сложных компонентов и систем.

Материал и методы исследования

Для расчета показателей надежности технических систем применяются аналитические методы. К ним относятся методы теории случайных процессов, теории экспертных оценок (эвристического прогнозирования), декомпозиции (эквивалентирования), логико-

вероятностные, асимптотические, аналитико-статистические методы. На практике используют методы имитационного и статистического моделирования (метод Монте-Карло) [4].

Теория случайных процессов служит основой аналитических методов расчета показателей надежности. Расчет надежности сложных технических систем часто базируется на предположении о том, что время безотказной работы и время восстановления элементов имеют экспоненциальные распределения вероятностей. Процессы, протекающие в системах с экспоненциальным распределением интервалов времени, являются марковскими, т.е. при которых вероятность перехода системы в новое состояние зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от того, когда и каким образом система перешла в это состояние. При экспоненциальном распределении случайного времени пребывания системы в каждом из возможных состояний марковский процесс является однородным (интенсивности переходов между состояниями не зависят от времени). Однородные марковские процессы с конечным числом состояний и непрерывным временем являются основным математическим аппаратом исследования надежности сложных систем с восстановлением. Это объясняется тем, что именно они позволяют получать аналитические выражения или конструктивные вычислительные схемы для расчета различных показателей надежности. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев исходными данными для элементов являются либо константные интенсивности отказов, либо средние наработки до отказа.

Построение марковских моделей надежности происходит следующим образом. На основе информации о структуре и принципах функционирования исследуемой системы определяется множество ее возможных состояний, которое разделяется на два подмножества: работоспособных состояний и состояний отказа. Строится граф переходов, вершинами которого являются состояния системы, а ребрами – возможные переходы между состояниями. Интенсивности переходов определяются характеристиками безотказности и ремонтпригодности элементов системы. По графу переходов составляется система уравнений, решение которой позволяет получить требуемые показатели надежности [8]. Оценка параметров надежности технических систем с использованием графов позволяет учитывать любые факторы, влияющие на систему. Недостатком описания системы графом состояний является сложность ввода данных и методов определения характеристик надежности для систем с большим количеством состояний.

Процессы, протекающие в системах с произвольными распределениями интервалов времени (Эрланга, нормальное), являются полумарковскими, т.е. при которых вероятность перехода системы из одного состояния в другое зависит от времени, проведенного в первом состоянии. Возможности применения методов, основанных на полумарковских процессах,

ограничены (позволяют определять лишь стационарные значения показателей надежности), поскольку в общем виде на их основе не удастся разработать математическую модель восстанавливаемой технической системы с учетом структурной избыточности и любой дисциплины ремонта.

Многомерные марковские процессы описывают функционирование технических систем при произвольных распределениях времен безотказной работы и восстановления элементов с учетом структурной и временной избыточности, с учетом контроля технических средств, с учетом нескольких видов отказов. Расчет показателей надежности методом многомерных марковских процессов осуществляется с помощью статистического моделирования, требующего огромных затрат времени и памяти ЭВМ [9].

Методы теории случайных процессов применяются для оценки надежности различных электротехнических систем и комплексов с непрерывными технологическими процессами, для исследования надежности систем электроснабжения промышленных предприятий, в том числе газовых комплексов. Надежность систем электроснабжения зависит от множества факторов, большинство из которых являются случайными. Модели, основанные на математическом аппарате случайных событий и марковских, полумарковских случайных процессов, позволяют учесть влияние на надежность электроснабжения структурного и временного резерва, ограничений и степени независимости источников питания, согласованности работы защит и автоматики, уровня контроля за состоянием основных элементов систем электроснабжения.

Для оценки надежности сложных технических систем с малым числом состояний могут использоваться асимптотические методы. Установлена асимптотическая независимость показателей надежности от исходных распределений. Распределение длительности безотказной работы резервированных систем в условиях «быстрого» восстановления асимптотически экспоненциально. Недостатком асимптотических методов, ограничивающим их применение, является локальность получаемых решений. Они позволяют найти решения задачи лишь в небольших пределах изменения параметров системы. На практике же часто нужно выйти за эти пределы [8]. Асимптотические приближенные способы расчета показателей надежности электрических систем применяются для решения проектных и эксплуатационных задач, для исследования моделей резервирования и массового обслуживания.

Для анализа надежности систем с неэкспоненциальными распределениями применяются следующие методы: логико-вероятностные, дифференциальный метод разложения на фазы, метод Кендалла, метод аппроксимации интенсивностей, графовые, экспертной оценки

(укрупнения состояний), эвристические, декомпозиции (эквивалентирования), аналитико-статистические, диффузионных процессов.

Логико-вероятностные методы анализа надежности сложных технических систем используют математический аппарат бинарной алгебры логики и теорию вероятности. Методы теории массового обслуживания, к которым относятся дифференциальный метод разложения на фазы, метод Кендалла, позволяют сводить немарковскую модель к марковской. Данные методы позволяют использовать лишь распределения Эрланга и приводят к значительному увеличению числа состояний, поэтому могут использоваться для расчета стационарных характеристик надежности и вероятности безотказной работы для систем кратковременного действия [6]. Логико-вероятностный метод расчета надежности электрической сети с использованием дерева отказов применяется, когда число различных отказов системы относительно невелико (например, для анализа надежности автоматизированной системы диспетчерского управления электроснабжением). Этот метод широко распространен при исследованиях надежности технологических систем АЭС, включая схемы надежного питания установок собственных нужд [8].

Методы ступенчатой аппроксимации интенсивностей отказов и восстановлений элементов применяются для оценки надежности систем, имеющих незначительное число состояний и медленно изменяющиеся интенсивности (например, телекоммуникационных систем и сетей [3]).

Для прогнозирования надежности объектов применяют методы эвристического прогнозирования (экспертной оценки). Методы эвристического прогнозирования основаны на статистической обработке независимых оценок значений ожидаемых показателей надежности разрабатываемого объекта (индивидуальных прогнозов), даваемых группой квалифицированных специалистов (экспертов) на основе предоставленной им информации об объекте, условиях его эксплуатации, планируемой технологии изготовления и других данных, имеющихся в момент проведения оценки. Опрос экспертов и статистическую обработку индивидуальных прогнозов показателей надежности проводят общепринятыми при экспертной оценке любых показателей качества методами (например, методом Дельфи).

Сущность эвристического метода оценки надежности восстанавливаемых систем заключается в объединении групп элементов этой системы в один эквивалентный элемент, который характеризуется альтернирующим процессом восстановления. Тем самым происходит уменьшение числа элементов в системе. Метод не позволяет установить погрешность вычислений и применяется исключительно для случая высоконадежных элементов и систем (например, для построения высоконадежных систем постоянного тока для объектов энергетики).

Метод декомпозиции (эквивалентирования) сложных технических систем основан на построении математических моделей, позволяющих получать достаточно точные верхнюю и нижнюю границы оцениваемого показателя надежности. Метод эквивалентирования последовательных и дублированных цепей получил широкое распространение для расчета надежности систем с большим числом элементов при параллельном и последовательном их соединении [2].

Метод статистического моделирования (или метод Монте-Карло) применяется для исследования поведения вероятностных систем в условиях, когда неизвестны в полной мере внутренние взаимодействия в этих системах. Этот метод заключается в воспроизведении исследуемого физического процесса при помощи вероятностной математической модели и вычислении характеристик этого процесса. Одно такое воспроизведение функционирования системы называют реализацией (или испытанием). После каждого испытания регистрируют совокупность параметров, характеризующих случайный исход реализации. Метод основан на многократных испытаниях построенной модели с последующей статистической обработкой полученных данных с целью определения числовых характеристик рассматриваемого процесса в виде статистических оценок его параметров. Процесс моделирования функционирования технической системы сводится к машинной имитации изучаемого процесса, который копируется на ЭВМ со всеми сопровождающими его случайностями [1]. Метод статистического моделирования является наиболее эффективным, а в ряде случаев — единственно возможным для оценки показателей надежности уникальных или малосерийных изделий, к которым относится оборудование атомных энергетических установок. Статическая оценка законов распределения отказов применяется для различного оборудования электрических сетей, в том числе для воздушных и кабельных линий.

Методы имитационного моделирования в целом являются универсальными и допускают рассмотрение систем с большим количеством элементов. Однако их использование в качестве метода исследования задач надежности целесообразно лишь тогда, когда трудно или невозможно получить аналитическое решение. Основными этапами такого исследования являются: построение формальной модели, разработка программ имитации траекторий модели, проведение имитационных экспериментов.

При анализе высоконадежных систем с помощью имитационной модели возникают проблемы, связанные с очень большими затратами машинного времени, необходимого для вычислений с требуемой точностью. С увеличением надежности элементов эффективность моделирования уменьшается, и оно становится практически нереализуемым. Методы статистического и имитационного моделирования не позволяют в полном объеме определять

надежность системы, если учесть большое количество сопутствующих факторов, влияющих на ее функционирование.

В теории надежности больших систем актуальной задачей является разработка математического аппарата для расчета, анализа и прогнозирования надежности функционирования, позволяющих анализировать технические системы, описываемые уравнениями больших размерностей. При разработке математической модели технической системы с большим числом состояний сталкиваются со следующими препятствиями, существенно затрудняющими анализ ее надежности: неоднозначность понятия отказа системы, взаимовлияние отказов элементов и частей системы, неопределенность исходных данных, многокритериальность, восстанавливаемость. Для оценки показателей надежности сложных технических систем с большим числом состояний используются методы имитационного моделирования, асимптотического анализа, случайных процессов и связанных с ними интегродифференциальных уравнений. В теории надежности предполагается, что технические системы и их компоненты могут пребывать в двух возможных состояниях: работоспособном и отказовом. При этом отказы элементов независимы, и система попадает в состояние отказа при отказе определенного числа элементов. Для сложных систем эти допущения часто бывают неприемлемыми. Между характеристиками отдельных частей системы имеется тесная взаимосвязь, и отказы отдельных частей системы являются зависимыми событиями.

Сложная техническая система является, как правило, многофункциональной. При этом количество выполняемых системой функций может достигать нескольких десятков. В реализации одной функции может участвовать большое число компонентов. Один и тот же компонент может быть задействован в выполнении нескольких функций. Поэтому компоненты, образующие систему, имеют различную длительность эксплуатации. При изучении надежности систем, выполняющих несколько функций, как правило, применяется функциональный подход, при котором описание надежности производится по каждой функции в отдельности, поэтому надежность системы характеризуется вектором показателей надежности всех ее функций. Таким образом, сравнительная оценка различных систем одного и того же назначения часто является затруднительной. Сложные технические системы должны длительное время работать безотказно. Это требование диктуется необходимостью обеспечения высокой их эффективности, безопасности, живучести, готовности и других показателей качества. Сложные системы состоят из десятков и сотен тысяч элементов, а время их работы исчисляется тысячами часов. Надежность элементов непрерывно увеличивается. Появление материалов высокой прочности, защищенных от коррозии, твердых схем, не требующих большой энергии для их питания, существенно уменьшило интенсивность отказов

элементов. Однако сложность технических систем и требования к показателям их надежности растут с такой же скоростью, как и надежность элементов. Поэтому надежность многих сложных технических систем практически не растет. В этом основная проблема надежности техники [5].

Методы анализа надежности сложных систем должны учитывать: наличие последствий отказов энергетических систем и систем с восстановлением, два характера отказа электротехнических элементов, изменение основного параметра электрической схемы при отказе элементов структурно-резервированной системы, структуру сложной системы, неодновременность работы элементов. Математические модели функционирования сложных систем с точки зрения надежности, полученные без учета перечисленных факторов, не могут быть адекватными реальным системам.

Сравнительный анализ существующих методов (оценка их возможностей) показывает, что для оценки надежности и эффективности функционирования каждой сложной технической системы с большим числом состояний необходимо, основываясь на традиционных методах, разработать методику, учитывающую особенности функционирования и своеобразие конкретной системы, позволяющую оценить погрешности вычисления показателей надежности с требуемой точностью.

Выводы

1. Аналитические методы являются важными для исследования надежности реальных технических систем, поскольку для большого количества факторов, влияющих на надежность систем, высокая достоверность имитационного моделирования практически недостижима. Однако существующие аналитические методы оценки надежности технических систем обладают следующими недостатками:

- методы сложны, не доведены до машинных алгоритмов и программ;
- позволяют анализировать системы только простой структуры;
- отсутствует единая математическая модель надежности функционирования систем;
- существуют трудности исследования нестационарных характеристик надежности;
- невозможно исследовать зависимые процессы, анализировать системы с переменной структурой.

Таким образом, оценка надежности и эффективности функционирования сложных систем с большим числом состояний требует разработки новых нестандартных подходов и методов анализа, позволяющих оценить погрешности вычисления показателей надежности с требуемой точностью.

2. При разработке математической модели функционирования сложной технической системы и методов ее анализа сталкиваются с необходимостью учета особенностей

функционирования. Экспоненциальный закон надежности к сложным системам неприменим: исходные данные в моделях неадекватны физическим процессам, протекающим в системах.

3. В настоящее время отсутствуют не только инженерные методы, но и теоретические разработки анализа надежности технических систем с переменной структурой, обусловленной ее многофункциональностью. Анализ надежности систем со статической и динамической реконфигурацией структуры представляет собой новое направление в теории надежности сложных технических систем.

Таким образом, при изучении каждой сложной технической системы необходимо, основываясь на традиционных методах, разработать методику, учитывающую особенности функционирования и своеобразие конкретной системы.

Список литературы

1. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.
2. Гук Ю.Б., М.М. Синенко, В.А. Тремясов. Расчет надежности схем электроснабжения. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990.– С. 66-70.
3. Кривулец В.Г., Полесский И.В. Об одном методе аппроксимации монотонных систем. – М.: Информационные процессы, 2002.– Т. 2.–№ 1.– С. 111–119.
4. Матвеевский В.Р. Надежность технических систем: учеб. пособие.– М.: МГИЭМ, 2002. – 113 с.
5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности.– 2-е изд., перераб. и доп.– СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – С. 73 – 97.
6. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем.– М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
7. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее и будущее. Пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR-2000), Бордо, Франция, 2000. – Reliability: Theory & Applications No.1, January 2006.
8. Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения: учеб. пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006.
9. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. – Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012. – 216 с.

Рецензенты:

Гизатуллин Ф.А., д.т.н., профессор кафедры электромеханики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа;

Сапельников В.М., д.т.н., профессор кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.