

ПРИМЕНЕНИЕ ОНТОЛОГИЙ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ НАПРАВЛЕНИЮ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ¹

Назаров Дмитрий Анатольевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (ИАПУ ДВО РАН)
nazardim@iacp.dvo.ru

APPLICATION OF ONTOLOGIES OF DEGRADATION PROCESSES OF ELEMENTS OF ELECTRICAL ENGINEERING SYSTEMS TO THE FUNCTIONAL-PARAMETRIC DIRECTION OF RELIABILITY THEORY²

D. Nazarov

Summary. The problem of ensuring the reliability and safety of technical systems based on a functional parametric approach is considered. Within the framework of this problem, the problem of using formalized expert knowledge about parametric perturbations necessary for assessing the reserve of operational safety, predicting the moment of failure and other methods for assessing the reliability and safety of technical systems is considered. The paper proposes an approach to accounting for parametric drift based on an ontological description of its model for the task of estimating the reserve of the operational state of the system based on its operability domain in the space of internal parameters.

Keywords: reliability, technical system, parametric reliability, field of operability, ontology.

Аннотация. Рассматривается проблема обеспечения надежности и безопасности технических систем на основе функционально-параметрического подхода. В рамках данной проблемы рассматривается задача использования формализованных экспертных знаний о параметрических возмущениях, необходимых для оценки запаса работоспособности, прогнозирования момента отказа и иных методов оценки надежности и безопасности технических систем. В работе предложен подход к учету параметрического дрейфа на основе онтологического описания его модели для задачи оценки запаса работоспособного состояния системы на основе ее области работоспособности в пространстве внутренних параметров.

Ключевые слова: надежность, техническая система, параметрическая надежность, область работоспособности, онтология.

Проблема обеспечения надежности и безопасности технических систем многогранна и состоит из комплекса мероприятий на различных этапах жизненного цикла и в ряде сфер деятельности: от начальных стадий проектирования до обучения персонала эксплуатации и техническому обслуживанию.

Одним из ключевых аспектов безопасности технических систем является их надежность. Понятие надежности в соответствии с ГОСТ 27.002-89 основывается на свойстве объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1, с. 37]. При этом, понятие надежности также является комплексным и имеет различные метрики.

В методологии теории надежности ключевое место занимает вероятностно-статистическое направление,

опирающееся на статистически устойчивые показатели частоты отказов. Однако этот подход не дает положительных результатов при обеспечении надежности уникальных объектов и систем, производимых в ограниченных количествах, для которых отказы не носят массового и статистически устойчивого характера. В таких случаях перспективным становится подход к исследованию надежности технических систем с точки зрения теории блуждания точки в фазовом пространстве, предложенный Б.В. Гнеденко в работе [2]. Предложенная модель надежности этого типа позволила выявить глубокую связь теории надежности с общей теорией случайных функций и заложила основу для методологии, называемой функционально-параметрическим подходом (ФП-подходом) [3, с. 72].

В соответствии с ФП-подходом, система описывается функциональной моделью, устанавливающей связь между выходными характеристиками системы и параметра-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FW-2021-0003)

² The work was performed within the framework of the state assignment of the IAPA FEB RAS (topic no. FW-2021-0003)

ми ее элементов (внутренних параметров). В этом случае надежность системы естественным образом согласуется с ГОСТ 27.002-89 как соответствие выходных характеристик своим спецификациям. ФП-подход позволяет анализировать влияние параметрических возмущений на функционирование системы, в том числе, прогнозировать возникновение отказов. Анализировать совокупное влияние параметрических возмущений на работоспособность системы удобно в пространстве внутренних параметров, ограниченном так называемой областью работоспособности (ОР), представляющей собой ограниченное множество точек этого пространства, в которых система сохраняет работоспособное состояние.

Для анализа влияния параметрических возмущений требуется информация о закономерностях этих возмущений, в которых может учитываться воздействие внешних факторов, влияние соседних элементов, а также внутренние физико-химические процессы, лежащие в основе постепенных деградационных явлений. Исследованиям этих процессов для различных объектов посвящено большое количество работ, в которых предложены различные виды закономерностей изменения параметров во времени. Для использования этих моделей в разнообразных системах автоматизированного проектирования, учитывающих дрейф параметров целесообразно задать обобщенное описание математического выражения, в формате, понятном эксперту и пригодном для последующего использования в различных задачах, в том числе и автоматизированной программной обработке.

В данной работе представлен подход к описанию модели дрейфа с использованием онтологических моделей структуры технического объекта и деградационных процессов для решения задачи оптимального параметрического синтеза на основе информации о конфигурации ОР.

В основе идеи функционально-параметрического направления теории надежности лежит описание системы в виде связи выходных характеристик, представляющих интерес для потребителя в форме вектора выходных параметров:

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$$

с параметрами элементов системы (внутренними параметрами):

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

в виде функциональных зависимостей:

$$y_i = y_i(x), i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Выходные параметры, представляя характеристики системы, должны удовлетворять требованиям, указан-

ным в техническом задании, обычно выражающимся в форме ограничений:

$$y_{imin} \leq y_i(x) \leq y_{imax}, \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Выражения (2) определяют работоспособное состояние системы и поэтому называются условиями работоспособности (УР); их нарушение рассматривается как отказ системы. Нарушение УР может быть вызвано неудачным проектным решением или дрейфом параметров элементов под воздействием внешних факторов, а также внутренних процессов износа и старения. Изменения внутренних параметров, как правило, анализируются в пределах заданных допусков, обеспечивающих их физическую реализуемость:

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Один из подходов к исследованию влияния отклонений внутренних параметров на работоспособность системы заключается в определении характеристик области в пространстве этих параметров, ограниченной допусками (3), в границах которой выполняются условия работоспособности (УР) (2):

$$D_x = \{x \in R^n : y_{imin} \leq y_i(x) \leq y_{imax}, \forall i = 1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

Область, определяемая выражением (4), называется областью работоспособности в пространстве параметров элементов системы, заданной моделью (1) для заданных УР (2).

Области работоспособности (ОР) можно использовать для анализа безопасности, чтобы оценить работоспособность технической системы в разных условиях и предсказать ее поведение при возможных отклонениях от нормального режима работы. Они позволяют определить вероятность отказов различных компонентов системы, учитывая вероятностные характеристики изменения параметров во времени. Анализ конфигурации и границ ОР помогает оценить вероятность пребывания системы в критических или нежелательных состояниях, что дает возможность прогнозировать вероятность отказов и их последствия. С помощью ОР можно также предсказать поведение системы в различных ситуациях, определяя возможные траектории её состояний и оценивая связанные с ними риски [4, с. 60].

Анализ ОР может являться основой для принятия решений по обеспечению безопасности системы путем оценки вероятности и последствий отказов. Такой анализ позволяет определить необходимость мер по снижению рисков, таких как резервирование, модернизация, изменение режимов работы и другие технические или организационные меры. Изучение конфигурации многомерной ОР помогает выявить наиболее критичные зоны работоспособности системы, что позволяет

разработать и реализовать эффективные стратегии для повышения её безопасности.

Для программных средств, реализующих ФП-подход к анализу надежности и использующих информацию о конфигурации ОР, учет влияния параметрических возмущений требует указания моделей дрейфа параметров во времени. На рисунке 1 схематично проиллюстрирован параметрический дрейф параметров $\mathbf{x}_{\text{номинал}} = (x_1(0), x_2(0))$ в пространстве параметров элементов, их приближении к границе ОР в момент времени t_2 и состоянии отказа в момент времени t_3 .

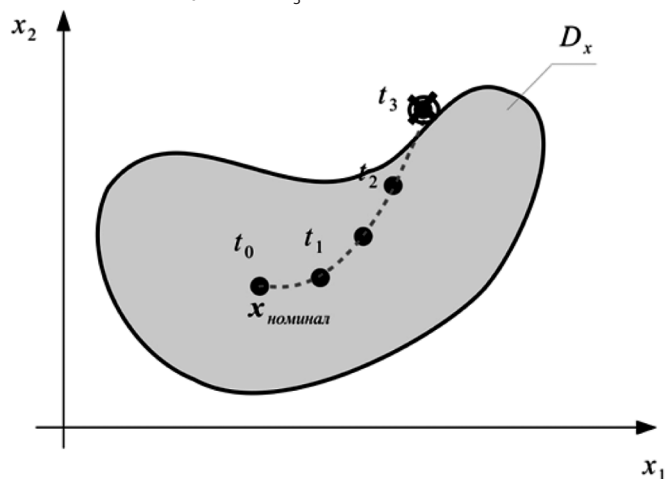


Рис. 1. Выход параметра за границу ОР вследствие дрейфа

Формат описания этих моделей должен быть понятным как описывающим их экспертам в области физики отказов, так и использующим их программным средствам. Эти модели могут иметь обобщенный вид в форме некоторого тренда (например, линейного или экспоненциального), а также более сложный, учитывающий ряд различных факторов, влияющих на элементы системы.

Модель параметрического дрейфа может быть задана и в символьном виде, а затем программно преобразована во внутреннее вычислимое представление, однако при этом утрачивается значимая доля информации о связях между компонентами и различными влияющими факторами, а также возрастает риск некорректного использования этой модели.

Для описания процесса параметрического дрейфа, вызванного обычно как условиями внешней среды, так и внутренними процессами износа и старения, требуются характеристики этих факторов, а также модели изменения параметров во времени. Один из подходов, позволяющих описать разнообразие как влияющих, так и зависимых физических характеристик, а также различные параметры внешней среды и условий эксплуатации, состоит в использовании моделей предметных онтологий [5, с. 749; 6, с. 4]. Онтологии позволяют с любой сте-

пенью детализации описать структуру системы, включая все известные виды взаимосвязей между ее элементами и факторами внешних условий. Такой подход к представлению структуры технического объекта с учетом взаимосвязей его компонентов и факторов, способствующих отказам, активно используется в программных системах для прогнозирования и управления состоянием (PHM — Prognostic Health Management). В таких системах подробно описывается иерархия элементов и возможные причины их отказов с указанием количественных характеристик, таких как допустимые интервалы и текущие значения, а также вероятностные свойства, например, плотность распределения отказов или средняя наработка до отказа [6, с. 2]. На основе такого описания можно построить дерево отказов, выявляя причины их возникновения, а также формировать рассуждения о состоянии системы в виде продукций, основанных на логике предикатов, отражающих состояние отдельных узлов в иерархии элементов, например, в модели OntoProg [5, с. 750].

Онтологический подход также может быть использован для создания деградационной модели сложной системы. При описании ее структуры эксперт указывает факторы, влияющие на рабочие характеристики и износ каждого элемента. Структура системы формируется с помощью теоретико-множественных отношений «a-part-of», которые описывают иерархию компонентов, а их взаимное влияние — через отношения, основанные на изменении физических параметров деградационной модели элемента. Например, в электронной схеме процессор, работающий при повышенной температуре из-за недостаточного охлаждения, может начать снижать свою производительность. Это изменение может быть учтено в модели деградации, описывающей поведение схемы, где повышенная температура также может ускорить износ конденсаторов, что приведет к снижению их емкости. В результате, ухудшение характеристик конденсаторов может негативно сказаться на стабильности питания процессора, что может быть отражено в модели отказа всей электронной платы [7, с. 62].

Использование онтологий для описания деградационных процессов — это подход, который позволяет формализовать знания о поведении технических систем и их компонентов. Онтологии обеспечивают структурированное представление предметной области, описывая взаимосвязи между понятиями, характеристиками и процессами, что делает систему гибкой и расширяемой. Такой подход особенно полезен для сложных технических систем, где нужно интегрировать данные из разных источников и разрабатывать прогнозные модели, он позволяет связать параметры компонентов, процессы деградации и внешние условия в единую систему. Такой подход повышает точность прогнозов, упрощает интеграцию данных и обеспечивает автоматизацию анализа.

Указанные в онтологии модели деградационных изменений параметров позволяют построить тренд и оценить запас допустимого дрейфа до предельного состояния или отказа на основе этого тренда, срока эксплуатации и информации о границе ОР.

Для задач обеспечения надежности и безопасности в рамках ФП-подхода онтологии позволяют формировать описания моделей как функциональных зависимостей выходных характеристик системы от параметров ее элементов, так и закономерности дрейфа параметров под влиянием различных факторов. Эти модели могут быть различной степени выразительности и точности — в зависимости от конкретных практических потребностей. Разнообразие деградационных моделей объясняется как природой самих элементов, видов материалов, из которых они изготовлены, внешними факторами, так и подходами, на основе которых эти выражения были получены: моделирование физико-химических процессов или использование моделей и методов анализа данных [8, с. 669; 9, с. 100]. Например, в работе [10, с. 29] приведены результаты исследования и деградации электролитических конденсаторов.

Использование ОР для получения оценок надежности и безопасности систем таких как, например, запас работоспособности требует функциональной модели параметрического дрейфа. Такие модели могут быть описаны в символьном виде и преобразованы во вну-

треннее представление моделирующего программного средства [11, с. 165]. Примером такого вспомогательного средства реализации механизма описания символьных выражений является свободно распространяемая библиотека muParser [12].

Использование сложных предметных онтологий технических систем, включающих не только иерархические, но и функциональные связи между элементами и внешней средой, позволяют включать в себя модели параметрического дрейфа. Такой подход позволяет привлекать к разработке экспертов в области физики отказов, хранить в унифицированном формате знания о деградации конкретных материалов и элементов, а также повторно использовать эти знания.

На рисунке 2 приведен пример онтологии, описывающей деградационный процесс для конденсатора в электрической цепи. Данное описание включает в себя обобщенные отношения между классами объектов и их свойства, а также индивиды — конкретные экземпляры классов с уникальными свойствами и связями. Классы деградационных процессов описывают семейства трендовых линий, возможные функциональные связи с параметрами внешней среды, такими как температура и влажность. Отдельные экземпляры этих классов обладают конкретными свойствами, выраженными в виде констант.

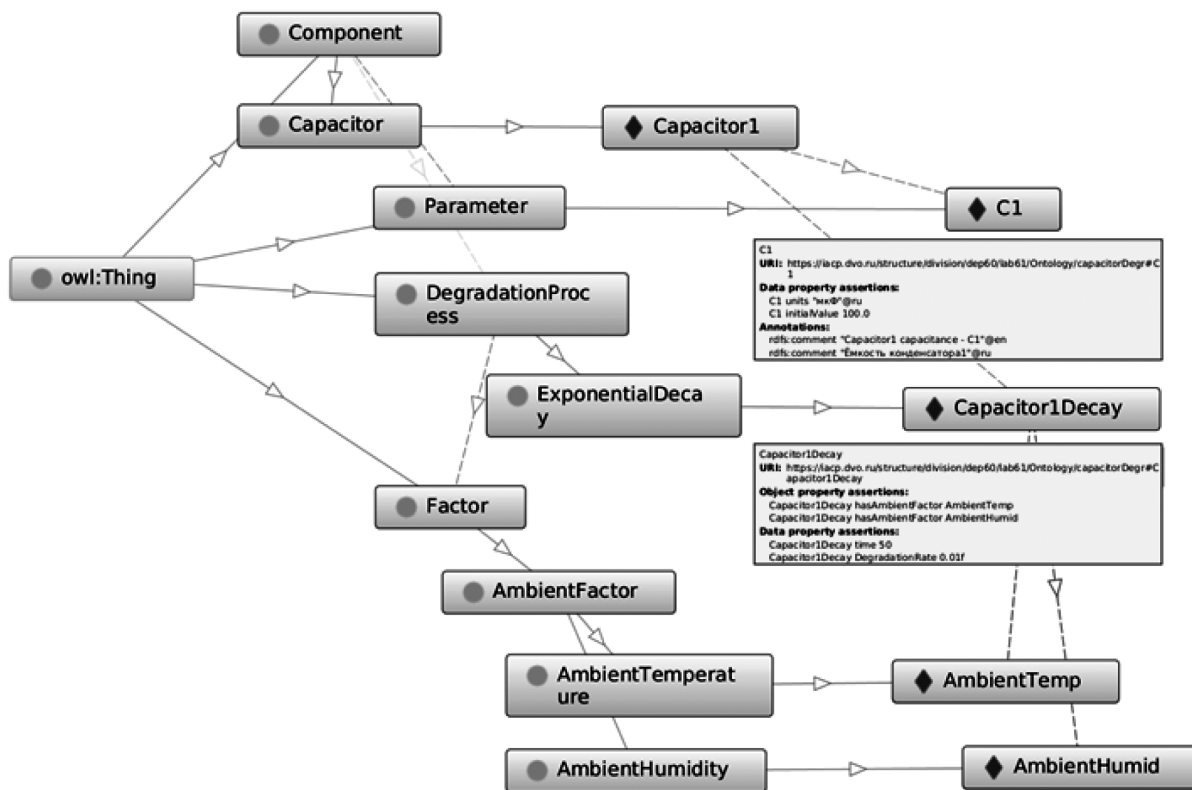


Рис. 2. Пример онтологии экспоненциального процесса деградации электрического конденсатора

Представлен фрагмент онтологии (реализованной с помощью средства Protégé [11, с. 166]) с описанием экспоненциальной модели деградации емкости электрического конденсатора в виде:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-\alpha t}, \quad (5)$$

где $C(t)$ — текущее значение емкости в момент t , C_0 — начальное значение емкости, α — коэффициент деградации, t — время эксплуатации. Модель онтологии содержит описания как самих классов объектов и понятий предметной области, так и конкретных экземпляров (индивидов).

Важно отметить, что указание классов семейств трендовых линий и их индивидов с конкретными параметрами этих трендов упрощает описание этих моделей, их поддержку и эксплуатацию, при этом ограничивая свободу формулирования произвольных математических выражений. Построение онтологий произвольных математических выражений представляет собой отдельную область исследований, и в контексте рассматриваемой задачи является более сложной в использовании процедурой, однако имеющей при этом большие перспективы [14, с. 68].

Для автоматизированной обработки данных онтологического описания необходим определенный формат записи модели. Одним из распространенных форматов является модель Resource Description Framework (RDF) и язык Ontology Web Language (OWL) [15]. Стандарт языка и структура файла позволяет считывать интересую-

щие сущности, их свойства и связи. Помимо возможности непосредственного чтения файла, во многих языках программирования реализованы функции для работы с такими файлами и содержащимися в них данными. На рисунке 3 приведена экранная копия фрагмента листинга кода онтологии, записанной на языке OWL в формате RDF [12].

Приведенный фрагмент иллюстрирует описание индивидов «Конденсатор 1», его исходный параметр емкости номиналом в 100 мкФ с обозначением «C1» на схеме, а также связанный с элементом деградационный процесс «Capacitor1Decay», относящийся к классу экспоненциального тренда «ExponentialDecay», с параметром затухания $\alpha = 0,01$. Синтаксический разбор этих данных определяет семейство трендовых функций в виде (5) с заданными параметрами. Начальное значение емкости конденсатора задается свойством конденсатора «C1», а параметры деградационного процесса — свойствами индивида «Capacitor1Decay».

Безопасность технических систем обеспечивается спектром процедур из различных сфер деятельности, однако одним из ключевых факторов является техническая надежность. В работе рассмотрен функционально-параметрический подход в теории надежности, заключающийся в описании технической системы в форме функциональных моделей, связывающих выходные характеристики с параметрами элементов. Такое функциональное описание системы позволяет определить область допустимых значений параметров ее элементов, которое можно использовать для ряда задач, свя-

```

<owl:NamedIndividual rdf:about="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#C1">
  <rdf:type rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Parameter"/>
  <capacitorDegr1:initialValue rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#decimal">100.0</capacitorDegr1:initialValue>
  <capacitorDegr1:units xml:lang="ru">мкФ</capacitorDegr1:units>
  <rdfs:comment xml:lang="en">Capacitor1 capacitance - C1</rdfs:comment>
  <rdfs:comment xml:lang="ru">Ёмкость конденсатора 1</rdfs:comment>
</owl:NamedIndividual>

<!-- https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor1 -->

<owl:NamedIndividual rdf:about="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor1">
  <rdf:type rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor"/>
  <capacitorDegr1:hasDegradationProcess rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor1Decay"/>
  <capacitorDegr1:hasParameter rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#C1"/>
  <rdfs:comment xml:lang="ru">Конденсатор 1</rdfs:comment>
</owl:NamedIndividual>

<!-- https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor1Decay -->

<owl:NamedIndividual rdf:about="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#Capacitor1Decay">
  <rdf:type rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#ExponentialDecay"/>
  <capacitorDegr1:hasAmbientFactor rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#AmbientFactor"/>
  <capacitorDegr1:hasAmbientFactor rdf:resource="https://iacp.dvo.ru/structure/division/dep60/lab61/Ontology/capacitorDegr#AmbientFactor"/>
  <capacitorDegr1:DegradationRate rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.01</capacitorDegr1:DegradationRate>
  <capacitorDegr1:time rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#decimal">50</capacitorDegr1:time>
</owl:NamedIndividual>
df:RDF>

```

Рис. 3. Описание параметров экспоненциальной модели в формате RDF

занных с параметрической надежностью, возникающих как на этапе проектирования, так и технического обслуживания. Решение задач, связанных с обеспечением надежности и безопасности технических объектов требует знаний закономерностей параметрических возмущений. Большинство отказов и сбоев возникает по причине разного рода деградации элементов — постепенных изменений параметров из-за меняющихся с течением времени их свойств. Знания о закономерностях деградационных изменений параметров часто основываются на глубоких исследованиях в области физики материалов или анализе большого числа наблюдений, что в конечном итоге представляет собой систему экспертных знаний. С целью их описания и корректного применения с учетом контекста рассмотрен подход на основе онтологического представления этих знаний. Формат пред-

метных онтологий позволяет привлекать к описанию моделей деградационных процессов экспертов в соответствующих областях, а построенные ими модели могут использоваться в различных САПР и их подсистемах. В рамках ФП-подхода деградационные модели используются для анализа трендов дрейфа параметров с целью определения остаточного ресурса до отказа и времени полезного срока службы системы. В работе предложен способ описания деградационных трендов на основе онтологической модели путем указания классов трендовых линий и их конкретных экземпляров с определенными константами в форме типизированных свойств. В качестве развития данного подхода предлагается использование онтологий для представления произвольных математических выражений.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». М.: Издательство стандартов, 1990. — 37 с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
3. Абрамов О.В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4(42). С. 64–77.
4. Назаров Д.А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. 2011. № 2(28). С. 59–69.
5. Nunez D.L., Borsato M. OntoProg: an ontology-based model for implementing prognostics health management in mechanical machines // Advanced Engineering Informatics. 2018. No. 38. P. 746–759. DOI: 10.1016/j.aei.2018.10.006.
6. Venceslau A., Lima R., Guedes L.A. and Silva I. Ontology for computer-aided fault tree synthesis // Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). 2014. P. 1–4.
7. Абрамов О.В., Назаров Д.А. Методы и средства интеллектуальной поддержки прогноза технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. — 2022. — № 4(74). — С. 54–63.
8. Козлова И.Н., Пиганов М.Н., Тюлевин С.В. Математические модели дрейфа функциональных параметров электронных изделий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4(3). С. 668–673
9. Jones J.A. A toolkit for parametric drift modelling of electronic components // Reliability Engineering & System Safety. — 1999. — Vol. 63, Issue 1, Pp. 99–106.
10. Gupta, A, Yadav, OP, DeVoto, D, & Major, J. A Review of Degradation Behavior and Modeling of Capacitors // Proceedings of the ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. San Francisco, California, USA. August 27–30, 2018.
11. Назаров Д.А. Использование скриптовых языков для описания модели системы при построении ее областей работоспособности // Труды Междунар. симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 24–31 мая 2021. — Пенза: ПГУ, 2021. — Т.1. — С. 165–166.
12. muParser — a fast math parser library. — URL: <http://muparser.sourceforge.net/>.
13. Protégé. — URL: <https://protege.stanford.edu/>.
14. Муромский А.А., Тучкова Н.П. Представление математических понятий в онтологии научных знаний // Онтология проектирования. — 2019. — Т.9. — № 1(31). — С. 50–69.
15. OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition). URL: <https://www.w3.org/2012/pdf/REC-owl2-syntax-20121211.pdf>

© Назаров Дмитрий Анатольевич (nazardim@iacp.dvo.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»