

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

SOME ASPECTS OF THE ANALYSIS OF THE CONDITION AND RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

**D. Bayyr
A. Dulesov
E. Tugar-ool
Ch. Oorzhak
Z. Hoylaarak**

Summary. An information-entropy approach for analyzing the reliability of complex systems in the context of Industry 4.0 is considered. The key idea is the use of a measure of uncertainty (entropy) to assess the state of systems and select optimal structures. Solving this task requires the construction of a probabilistic-informational model that describes the interactions of factors within a complex infrastructure. The research outlines a series of tasks, including building a mathematical model of the object and formalizing reliability assessment criteria. The development of methods for failure prediction and multicriteria optimization of the information infrastructure is also anticipated.

Keywords: measure of information, entropy, model building, reliability, technical systems.

Байыр Долаан Борисович
Аспирант, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова
dolaan.bayyr@mail.ru

Дулеев Александр Сергеевич
доктор технических наук, доцент, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова
dulesov@khsu.ru

Тугар-оол Эрес Чкаловович
старший преподаватель,
Тувинский государственный университет
teresch1@rambler.ru

Ооржак Чойгана Камаевна
старший преподаватель,
Тувинский государственный университет
oorzhak-choygana@mail.ru

Annotation. Рассматривается информационно-энтропийный подход для анализа надежности сложных систем в условиях Индустрии 4.0. Ключевая идея — использование меры неопределенности (энтропии) для оценки состояния систем и выбора оптимальных структур. Для решения задачи требуется построение вероятностно-информационной модели, описывающей взаимодействия факторов в сложной инфраструктуре. В рамках исследования выделен ряд задач, включая построение математической модели объекта и формализацию критерии оценки надежности. Также предполагается разработка методов прогнозирования отказов и многокритериальной оптимизации информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: мера информации, энтропия, построение моделей, надежность, технические системы.

Введение

Эпоха Четвертой промышленной революции, или Индустрии 4.0, характеризуется острой конкурентной борьбой в сфере искусственного интеллекта. Это создает серьезный вызов, связанный с необходимостью обеспечения высокой надежности сложных технических систем. Параллельно наблюдается постоянное усложнение самих объектов и ужесточение требований к автоматизации, которые должны учитывать широкий спектр негативных факторов — от природных до человеческих. Следствием такого комплексного воздействия становится нанесение значительного экономического и материального ущерба.

Современный тренд на интеллектуализацию систем управления для гарантирования заданных параметров надежности диктует необходимость в инновационных подходах. Речь идет о развитии системного анализа для мониторинга состояния объектов и создания механизмов оперативного устранения возникающих сбоев. Учитывая, что в основе оценки надежности лежат вероятностные и стохастические параметры элементов системы [1], закономерным представляется использование специализированных измерительных комплексов. Важное место среди них может занять метрика неопределенности информации, которая количественно выражается посредством информационной энтропии.

Страна отметить, что энтропийные модели и методы, в особенности классические их версии [2–4], уже доказали свою эффективность в решении задач сетевой передачи данных, что является краеугольным камнем теории информации. Несмотря на это, в области анализа надежности данная метрика не получила должного распространения, что наглядно демонстрирует анализ актуальных стандартов, таких как ГОСТ Р 27.102-2021 и ГОСТ Р 27.018-2021. Аналогичная картина наблюдается и в метрологии: действующие нормативные документы (ГОСТ Р 8.820-2013, ГОСТ Р 8.563-2009) не признают энтропию в качестве меры информации. В то же время в международной научной периодике намечается тенденция к использованию концепций энтропийной эволюции, генерации и флюктуаций для моделирования электрических и теплофизических процессов. Это указывает на то, что потенциальная роль информационной энтропии в метрологии остается открытым вопросом и требует дальнейшего изучения.

Методы системного анализа и моделирования оказываются наиболее востребованными в прикладных сферах при работе со слабоструктурированными и неопределенными проблемными ситуациями [5–7]. В подобных условиях любая дополнительная информация, позволяющая количественно оценить уровень неопределенности, приобретает критически важное значение для анализа надежности. Это особенно важно для решения таких задач, как:

- Сравнительный анализ и выбор наиболее устойчивых системных архитектур из ряда альтернатив.
- Идентификация слабых мест в структуре системы.
- Определение ключевых факторов, воздействующих на надежность объекта [8–10].

Решение обозначенного комплекса проблем требует проведения фундаментальных и прикладных исследований, сфокусированных на создании адекватных математических моделей, практических методик и специализированного программного обеспечения. Целью является получение достоверных данных на основе измерений. Результаты этой работы будут напрямую способствовать повышению качества и точности анализа надежности сложных технических систем.

Значимость и актуальность решения поставленной задачи

Обеспечение устойчивого развития столь критически важной отрасли, как российская электроэнергетика, напрямую зависит от решения задач по оценке надежности, обработке данных и принятию обоснованных управлеченческих решений. Эти аспекты составляют основу для эффективного управления всем жизненным циклом энергосистемы. Игнорирование данных вопросов неизбежно приводит к физическому и моральному старению инфраструктуры, а также к росту вероятности отказов

оборудования. Экономические последствия подобных сбоев оказываются значительными. В частности, несвоевременное прогнозирование потенциальных нарушений работы системы ведет к срывам заранее утвержденных графиков ремонтов и технического обслуживания. В связи с этим возникает насущная потребность в разработке и внедрении научно обоснованных мер, направленных на профилактику аварийных ситуаций и серьезных отказов. Следует признать, что данная проблема носит комплексный и многогранный характер. Ее границы часто размыты, а для полноценного решения требуется привлечение значительных ресурсов. Исследования, представленные в рамках данной работы, предлагают лишь часть из всего спектра необходимых мер и методик для противодействия указанным вызовам. Несмотря на это, интеграция в процесс анализа надежности тщательно проработанных решений позволит существенно повысить как научную ценность, так и практическую эффективность получаемых результатов. При этом, построение вероятностно-информационной модели, описывающей взаимодействия факторов и наличие причинно-следственных связей в сложной информационной инфраструктуре, позволит выявлять и прогнозировать аварийные ситуации и отказы. Актуальность решения данной задачи обусловлена необходимостью в применении полученных результатов в разнородных инженерных сетях, включающих в себя обширную информационную инфраструктуру.

Кроме этого, разрешение обозначенной проблемы, не исключая из рассмотрения работы [11–13], будет включать в себя решение задач системного анализа технических систем. Одновременно с этим, формализация математического описания объекта позволит эффективно решить задачу оптимизации структуры системы.

В рамках представленной проблематики исследований возможно решение следующих задач:

- 1) Формализация математического описания технической системы.
- 2) Построение вероятностно-информационной модели структурных взаимосвязей устройств/ элементов в системе, позволяющая осуществить оценку состояния и прогнозирование возможных аварийных ситуаций и отказов
- 3) Разработка методов и алгоритмов оценки состояния структур изолированных систем.
- 4) Разработка методов анализа надежности открытых систем.

Данные задачи (в практической плоскости) касаются интеграции системного анализа надежности в работу системы с единым центром управления и терминальным доступом. Одним из ключевых аспектов является мониторинг функционирования и состояния отдельных объектов системы.

В целом, реализация задач заключается в поиске научно-обоснованных возможностей и путей решения по применению результатов моделирования и анализа, что позволит обогатить теорию и практику выявления неблагоприятных факторов воздействия на функционирование сложных технических объектов. При этом, снятие неопределенности, как фактора реализации путей решения, связано с необходимостью (на наш взгляд) подключать к процессу моделирования и анализа ряд развивающихся теорий: теория информации (в которой определенную роль играет информационная энтропия, меры количественного разнообразия, неопределённости или случайности открытой системы на базе методов Ренни и Тсаллеса [14–16]); искусственный интеллект (одним из элементов которой признан Data Mining); Big Data (относившиеся к области цифровизации экономики); когнитивные модели (некие абстракции рассматриваемых процессов); классификация и кластеризация данных (с целью выделения взаимосвязанных факторов). Следует отметить, что их применение в совокупности позволит выявить закономерности динамики параметров в процессе обработки данных. В конечном итоге предлагаемые решения позволяют получить искомые результаты с меньшими ошибками (которые пока остаются не в полной мере разрешимыми), как факторы снятия существующей информационной неопределенности.

Возможные подходы и методы реализации задач

1. Построение математической модели рассматриваемого объекта, выявление структурных связей. Модель должна обеспечить выявление его возможностей, создание инструментов анализа и вычисление параметров применительно к изолированным системам. Для них проявление внешних и внутренних факторов характеризуется величиной информации и возможностями её обмена с окружающей внешней средой, но не веществом и энергией. Модель должна включать в себя описание структуры рассматриваемого объекта с наличием связей, факторов эндогенного и экзогенного характера, параметров, характеризующих работоспособное и неработоспособное состояния элементов системы.
2. Формирование критериев определения аварийных ситуаций и последствий отказов оборудования. В качестве критерия рассматривается энтропия, которая вычисляется из наличия статистики случайных величин (характеристики рассматриваемых объектов) и необходима для изменения неопределенности состояния объекта, являясь как частным, так и средним уровнем информации или неопределенности, присущей результатам переменных.

Для точного расчета энтропийных показателей система интерпретируется как сигнальная. В рамках такого

подхода в роли сигналов выступают физические параметры, изменяющиеся во времени. К ним относятся, в частности, наработка на отказ, интенсивность отказов, длительность восстановления и планового ремонта, а также другие характеристики, связанные с диагностикой состояния системы. Эти параметры описываются соответствующей функцией времени.

3. Анализ системных показателей, направленный на выявление в их динамике аддитивных, мультиплексивных или обобщенных тенденций роста и спада. Эти тенденции служат ключевыми индикаторами текущего состояния системы. Для решения данной задачи целесообразно задействовать аппарат когнитивного моделирования, а также модели Ренни и Тсаллеса. Основное достоинство этих подходов состоит в их способности к универсальному обобщению разнородных данных и корректному учету статистически зависимых событий. Результатом проведенного анализа станет формирование обоснованных рекомендаций по выбору методов оценки надежности, ряд из которых регламентирован действующими стандартами ГОСТ.
4. Совершенствование методов прогнозирования аварийных ситуаций в сетевых системах. Применяются современные методы систематизации данных: иерархический, фасетный и дескрипторный подходы. Процесс классификации сопровождается расчетом дифференциальной энтропии, позволяющей количественно оценить разделение элементов системы на работоспособные и неработоспособные состояния. На следующем этапе выполняется кластеризация параметров, направленная на формирование однородных групп показателей, соответствующих определенным классам надежности и пригодных для использования в инструментах прогнозирования.
5. Разработка информационно-теоретических основ оценки надежности. Методология формализации критериев надежности сложных систем базируется на аппарате теории информации. Центральное место занимает анализ статистических закономерностей распределения случайных величин и исследование функциональных зависимостей между динамикой частот и изменением диагностических признаков. При обработке данных методами Data Mining, включая построение гистограмм временных рядов, существенную роль играет точная оценка расхождений между распределениями. Для повышения достоверности результатов агрегации данных предлагается использовать метрики типа дивергенции Кульбака-Лейблера, обеспечивающие количественную оценку отклонения эмпирических распределений от эталонных моделей.
6. Методология энтропийного анализа надежности систем. Особое внимание уделяется предобра-

ботке исходных данных о надежности и исследованию энтропийных характеристик системной структуры (распределенной или замкнутой). Методика предусматривает анализ как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых элементов. Для оценки эффективности эксплуатационных затрат, направленных на достижение нормативной наработки на отказ, применяется расчет условной энтропии для каждого объекта. Дополнительно определяется энтропия структурных связей, а полученные значения коррелируются с эксплуатационными требованиями к бесперебойности функционирования систем, в частности, при транспортировке энергии в инженерных сетях.

7. Снятие информационной неопределенности в рамках созданной модели включает выполнение ряда работ: формализацию задачи через планирование мероприятий по своевременному включению ресурсов для поддержания надежности, а также разработку методов решения, ориентированных на расчёт величины энтропии и информации. Эти методы служат основой для много-критериальной оптимизации информационной инфраструктуры, которая предусматривает выбор структурных связей, не нарушающих целостность системы и характеризующихся параметрами надежности и энтропийными показателями.
8. Математический аппарат для данной модели требует обоснования и построения методов вы-

числения ключевых информационных мер: условной энтропии для оценки воздействия отказов элементов на систему в целом; совместной энтропии для измерения неопределенности состояний последовательно и параллельно соединенных элементов; взаимной информации для оценки совместных состояний элементов структуры; а также условно-взаимной информации, которая выступает мерой информации для всего спектра элементов, их состояний и структурных связей в системе.

Таким образом, предлагаемые подходы и методы, formalizованные в рамках теории информации, позволяют выйти на уровень научно обоснованной оценки состояния и проведения анализа сложных технических систем.

Заключение

Решение задачи о построении вышеупомянутых моделей и разработке методов не только предусматривает внедрение организационных мероприятий, но и реализацию решений, направленных на эффективный анализ надежности систем. Предлагаемые подходы и современные инструменты выработки адаптивных инструментов, способны обеспечить выход на новый уровень в достижении искомых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г., Паньшин А.Б., Каркарин А.П. Надежность технических систем. Учеб. пособие для вузов технических специальностей / Под общ. ред. Е.В. Сугака и Н.В. Василенко. — Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001. — 608 с.
2. Хартли Р. Передача информации// Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиз. 1959. — С. 5-35.
3. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. — 832 с.
4. Хинчин А.Я. Понятие энтропии в теории вероятностей, УМН, 8:3(55) (1953), 3–20.
5. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем // Перспективы науки и образования. — 2014. — № 1. — С 38–43.
6. Цветков В.Я. Сложные технические системы // Образовательные ресурсы и технологии — 2017. — №3(20). — С. 86–92.
7. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. О взаимосвязи статистической и информационной энтропии при описании состояний сложных систем // Научные ведомости. Серия Математика. Физика. — 2016. — № 20 (241). — Выпуск 44. — С. 105–116.
8. The logarithmic basis to measure the amount of information related to the assessment of reliability of elements of the technical system. Dulesov A.S., Karandeev D.J., Eremeeva O.S., Khrustalev V.I., Dulesova N.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering — MIP: Engineering — 2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 52003.
9. Approaches to information measurement of the structure state of technical systems. Dulesov A.S., Eremeeva O.S., Karandeev D.Yu., Dulesova N.V. В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. С. 8602799.
10. Quantification of information in the closed structure of a technical system. Dulesov A.S., Khrustalev V.I., Dulesova N.V. В сборнике: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 — Proceedings. 2016. С. 7911658
11. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропии. Перевод с французского, Изд-во Наука, Москва, 1967, 283 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/shambadal-p-razvitiie-i-prilozheniya-ponyatiya-entropii_bdf39e51986.html (Дата обращения: 01.11.2023).
12. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. — М.: Наука, 1986. — 193 с. (Проблемы науки и технического прогресса).
13. Энтропия в теории информации. Прохоров Юрий Васильевич. [Электронный ресурс]. Последнее обновление 5 мая 2023 г. URL: <https://bigenc.ru/entropiya-v-teorii-informatsii-8e42df> (дата обращения 22.02.2024).

14. Constantino Tsallis. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. *Journal of Statistical Physics*, Vol. 52, Nos. 1/2, 1988. [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01016429> (Дата обращения: 06.11.2023).
15. Колесниченко А.В. Конструирование энтропийной транспортной модели на основе статистики Тсаллиса // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 33. 23 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-33> (Дата обращения: 06.11.2023).
16. Alfrped Renyi. On Measures of Entropy and Information. *Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, 1961: 547–561 (1961). — URL: <https://projecteuclid.org/proceedings/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fourth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/Chapter/On-Measures-of-Entropy-and-Information/bsmsp/1200512181> — (Дата обращения: 17.06.2023)

© Байыр Долаан Борисович (dolaan.bayyr@mail.ru); Дулеев Александр Сергеевич (dulesov@khsu.ru);
Тугар-оол Эрес Чкаловович (teresch1@rambler.ru); Ооржак Чойгана Камаевна (oorzhak-choygana@mail.ru);
Хойлаарак Зоя Комбуй-ооловна (hzka@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»