

Прогнозирование потенциально возможных неисправностей технической системы на основе нечетких графов и нечетких когнитивных карт

Ю. А. Кораблёв[✉], Д. М. Лосева, М. Ю. Шестопапов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ juri.korablev@gmail.com

Аннотация. Рассматривается разработка иерархической поэтапной процедуры прогнозирования потенциально возможных неисправностей технической системы на основе нечетких графов и нечетких когнитивных карт. Математически это основывается на понятии нечеткого бинарного отношения предпочтения. Нечеткое бинарное отношение всегда строится на некотором множестве объектов. Так как между объектами существуют связи и рассмотрение ведется по сути дела на уровне нечеткого графа, то связи между объектами описываются степенью принадлежности и интерпретируются как «неисправность объекта o_i порождает неисправность объекта o_j ». Далее необходимо выделить на этом нечетком графе иерархию, которая позволит определить все возможные сценарии возникновения неисправностей и последовательность проведения диагностических мероприятий. Все задачи обнаружения и локализации неисправностей, обеспечения отказоустойчивости могут решаться на уровне нечеткого неориентированного графа, но получение ориентированного графа дополнительно дает принципиальную возможность причинно-следственного анализа возникновения и распространения неисправностей в технической системе, их ранжирования по степени важности, влияния управляющих воздействий на поведение системы.

Ключевые слова: неисправности, нечеткий граф, нечеткая когнитивная карта, диагностика состояния технической системы, прогнозирование возникновения неисправностей

Для цитирования: Кораблев Ю. А., Лосева Д. М., Шестопапов М. Ю. Прогнозирование потенциально возможных неисправностей технической системы на основе нечетких графов и нечетких когнитивных карт // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 3. С. 46–51. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-46-51.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Forecasting of Potential Faults of a Technical System Based on Fuzzy Graphs and Fuzzy Cognitive Maps

Yu. A. Korablev[✉], D. M. Loseva, M. Yu. Shestopalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ juri.korablev@gmail.com

Abstract. The development of a hierarchical step-by-step procedure for forecasting potential faults of a technical system based on fuzzy graphs and fuzzy cognitive maps is considered. Mathematically, this is based on the notion of a fuzzy binary preference relation. A fuzzy binary relation is always built on some set of objects. Since there are connections between objects and the consideration is conducted essentially at the level of a fuzzy graph, the connections between objects are described by the degree of affiliation and interpreted as «fault of object o_i generates fault of object o_j ». Next, it is necessary to allocate a hierarchy on this fuzzy graph, which will allow you to determine all possible scenarios for the occurrence of faults and the sequence of diagnostic measures. All problems of fault detection and localization, fault tolerance can be solved at the level of a fuzzy undirected graph, but obtaining an oriented graph additionally provides a fundamental opportunity for causal

analysis of the occurrence and spread of faults in a technical system, their ranking by degree of importance, the influence of control actions on the behavior of the system.

Keywords: faults, fuzzy graph, fuzzy cognitive map, diagnostics, technical system state, fault forecasting

For citation: Korablev Yu. A., Loseva D. M., Shestopalov M. Yu. Forecasting of potential faults of a technical system based on fuzzy graphs and fuzzy cognitive maps // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 46–51. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-46-51.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Теория технической диагностики излагается в работах известных отечественных и зарубежных ученых П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоняна, В. В. Карибского, А. В. Мозгалевского, Я. Я. Осиса, В. А. Гуляева, Д. Маеды, С. Рамомурти. Интересное направление этой теории обозначено в работах П. В. Глущенко, В. И. Сагунова, С. И. Беляевой, Л. С. Ломакиной [1], [2]. Здесь выдвигается идея использовать в качестве моделей объектов диагностирования графы причинно-следственных связей в задачах выбора точек контроля для снятия диагностической информации и реализация процедур диагностирования с помощью матриц проверок.

Нечеткий граф как диагностическая модель. В диагностике технических систем нередко возникают ситуации, когда трудно установить соответствие между диагностическими признаками и причинами неисправностей. Характер такой связи может быть неоднозначным, что может привести к нечеткости процесса диагностирования. Для решения таких задач диагностирования целесообразно привлекать нечеткие множества и нечеткую логику, в частности нечеткие графы. Такой подход может оказаться очень перспективным при диагностировании структурно-сложных объектов с целью выявления топологических дефектов. Нечеткий граф как модель объекта диагностирования по своему назначению описывает прежде всего топологию модели и хорошо приспособлен к обнаружению прежде всего топологических неисправностей. Топологическая модель в виде нечеткого графа позволяет на качественном и структурном уровне определять причины возникновения неисправностей и следствия их проявления.

Нечеткий ориентированный граф [3] – это граф $\tilde{G} = (X, \tilde{U})$, у которого $X = \{x_i\}$, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ – четкое множество вершин, представляющих собой в контексте задачи диагностики измеримые координаты диагностируемой технической системы, а $\tilde{U} = \{ \langle \mu_U(x_i, x_j) / (x_i, x_j) \rangle \}$ – нечеткое множество

ребер (связи между координатами), где $x_i, x_j \in X$, $\mu_U(x_i, x_j) \in [0, 1]$ – значение функции принадлежности μ_U для ребра (x_i, x_j) . Эти значения для ребер нечеткого графа дают оценку силы связи между координатами и позволяют обнаружить и локализовать по результатам сравнения с соответствующими значениями функций принадлежности в номинальном режиме топологические дефекты типа обрыва связей, возникновения новых, паразитных связей или резкого ослабления (усиления) силы связи. Нечеткий граф можно рассматривать и как бинарное нечеткое отношение:

$$G(x_i, x_j) = \{ (x_i, x_j), \mu_G(x_i, x_j) > 0, (x_i, x_j) \in E \},$$

где E – нечеткое множество узлов; индекс μ указывает на принадлежность множеству, в котором он определен.

Понятия отношения и графа (будь оба четкие или нечеткие) имеют сходство и различия. Сходство – это наличие множества элементов и множества связей между ними. Различие – для отношения не играет роли направление связи между элементами, тогда как для графа это очень важно.

Учитывая постановку задачи как выявление топологических дефектов, в рамках данной статьи традиционное определение нечеткого графа расширяется при введении нечеткого множества вершин графа $X = \{ \langle \mu_x(x_i) / x_i \rangle \}$, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ функциями принадлежности $\mu_x(x_i) \in [0, 1]$.

Такое расширение определения нечеткого графа позволяет расширить обнаружение, локализацию и идентификацию топологических отказов на ситуации исчезновения в результате неисправностей вершин графа из модели или изменения взаимного влияния вершин графа.

Множество вершин X граф-модели основано на множестве свойств Z , связанных с функционированием обследуемой системы во внешней среде или в среде других объектов и систем

$$Z = N \cup M,$$

где N – множество свойств внешней среды, которые находятся в причинно-следственных связях со свойствами обследуемой системы; M – множество свойств функционирования системы.

Таким образом, в граф-модели наряду с «собственными» свойствами объекта встречаются и такие, которые обусловлены окружающей средой. Поэтому вопросы выделения модели объекта из пространства модели среды очень важны, в том числе и потому, что такая операция дает возможность разбиения сложных граф-моделей на более простые.

Выделение модели функционирования объекта из пространства среды математически есть процедура замыкания множества вершин X , $X = [M]$, описывающих свойства всего объекта. В основе этой процедуры лежит ряд утверждений, из которых следуют важные следствия.

Граф-модель – пространство, представляющее функционирующую систему, должно быть связанным. Это означает, что между элементами множества свойств объекта должны быть определены некоторые отношения.

Уже отмечалось, что выделение модели функционирования объекта из модели пространства среды можно формулировать как операцию замыкания множества M . Это означает, что конечное замкнутое множество функциональных свойств объекта соответствует множеству точек прикосновения множества M , т. е.

$$X = [M] = \bigcup_{\rho=1}^m x_{\rho},$$

где x_{ρ} – точка прикосновения множества M , т. е. точка, каждая окрестность которой содержит по крайней мере одну точку из M ; m – число всех точек прикосновения множества M .

Нечеткие когнитивные карты. Все задачи обнаружения и локализации топологических отказов могут решаться и на уровне нечеткого неориентированного графа, но получение ориентированного графа дополнительно дает принципиальную возможность причинно-следственного анализа возникновения и распространения неисправностей в технической системе, а также их ранжирования по степени важности. Последнее может быть реализовано при рассмотрении полученного ориентированного нечеткого графа технической системы как нечеткой когнитивной карты, где вершины называются концептами, описывающими системные факторы (переменные) и

дуги между концептами, описывающие причинно-следственные связи. При имитации процессов на нечетких когнитивных картах легко учитываются воздействия на эти факторы или изменения характера связей.

Автором этого понятия считается Б. Коско [4]. Основное преимущество нечетких когнитивных карт – наглядность представления анализируемой системы и легкость интерпретации причинно-следственных связей, имитация поведения системы, контроль за всеми параметрами модели. Предлагаемый подход относится к универсальным, ориентированным на любые объекты диагностирования, для которых тем или иным способом описана их логическая структура [5].

На рис. 1 вершины графа C_i – это концепты, т. е. переменные модели. Термин «нечеткий» в названии отражает веса на дугах w_{ij} – это влияние одной переменной C_i на другую C_j , степени принадлежности соответствующего нечеткого множества типа «слабо», «средне», «сильно». Термин «когнитивный» говорит о субъективности оценок эксперта в выражениях типа «повышается» или «понижается» – например, «повышение C_i приводит к понижению C_j ».

Иерархическая поэтапная процедура прогнозирования потенциально возможных неисправностей технической системы. В данной статье нечеткие когнитивные карты будут использоваться для разработки иерархической поэтапной процедуры прогнозирования потенциально возможных неисправностей системы. Процедура базируется на методике эволюционного синтеза сложных систем, методах математической статистики и нечеткой логики. При этом требуется решение следующих проблем:

- определение множество вершин нечеткого графа как координат диагностируемого процесса;
- определение функций принадлежности ребер графа.

Иерархическая поэтапная процедура ставит своей целью разработку качественной модели прогнозирования возникновения неисправностей. Математически это основывается на понятии нечеткого бинарного отношения предпочтения [6], [7]. Нечеткое бинарное отношение всегда строится на некотором множестве. В данном случае это множество потенциально неисправных объектов технической системы $O:O = \{o_1, o_2, o_3, \dots, o_n\}$,

где o_i – i -й объект с возможностью возникновения неисправности, n – мощность множества O . Так как между объектами существуют связи и рассмотрение ведется по сути дела на уровне нечеткого графа, то связи между объектами описываются степенью принадлежности и интерпретируются как «неисправность объекта o_i порождает неисправность объекта o_j ».

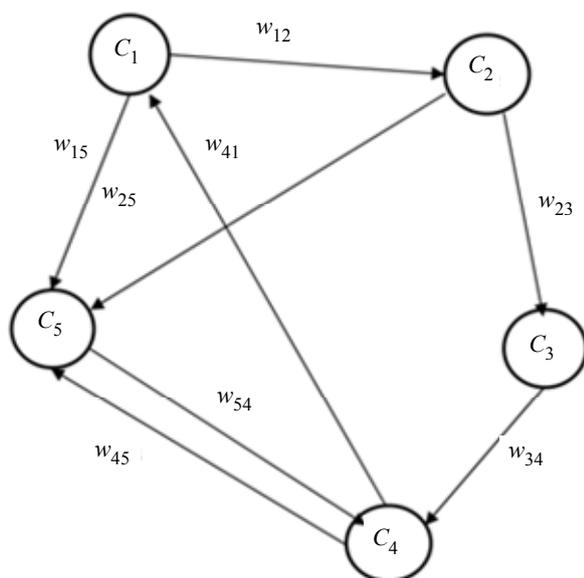


Рис. 1. Пример нечеткой когнитивной карты
Fig. 1. Example of a fuzzy cognitive map

Далее необходимо выделить на этом нечетком графе иерархию, которая позволит определить все возможные сценарии возникновения неисправностей и последовательность проведения диагностических мероприятий.

Алгоритм построения иерархической диаграммы диагностирования (рис. 2) и работы с ней:

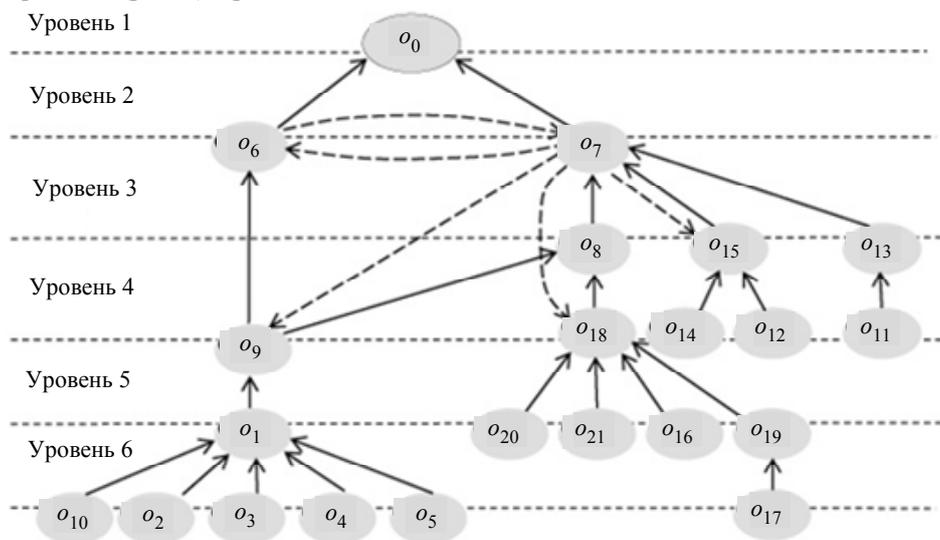


Рис. 2. Пример иерархической диаграммы диагностирования неисправностей
Fig. 2. Example of a hierarchical diagram of fault diagnosis

- 1) удаление замыкающих дуг графа;
- 2) распределение вершин графа по уровням иерархии;
- 3) на первом уровне иерархии – только вершины без выходных дуг;
- 4) вершины второго уровня иерархии связаны с вершинами первого уровня;
- 5) на i -м уровне иерархии – только вершины, связанные с вершинами на уровнях с первого по i -й;
- 6) исключение циклов;
- 7) достижение узлов диаграммы, из которых не исходят дуги, и проверка их работоспособности;
- 8) расчет среднего весов всех дуг, входящих в путь на графе. Эта величина – инструмент ранжирования сценариев в процессе процедуры диагностирования по их потенциальной опасности, что и позволяет прогнозировать потенциально возможные неисправности.

С точки зрения теории графов каждый возможный сценарий представляет собой путь на графе. Путь состоит из дуг переходов o_i в o_j . На рис. 2 каждый кружок определяет определенное состояние o_i . Каждому переходу приписана его функция принадлежности нечеткого множества, показывающая степень влияния одной неисправности на другую.

Заключение. Причинно-следственные модели в области интеллектуальных отказоустойчивых систем управления в подсистемах, основанных на знаниях, имеют когнитивную природу, их построение определяется законами когнитивного моделирования. В основе когнитивного анализа и моделирования лежит причинно-следственный анализ и моделирование процессов, протекающих в системе. Это справедливо и для задачи прогно-

зирования возникновения неисправностей, где все задачи обнаружения и локализации топологических неисправностей, обеспечения отказоустойчивости могут решаться на уровне нечеткого неориентированного графа, но получение ориентированного графа дополнительно дает принципиальную возможность причинно-следственного анализа возникновения и распространения неисправностей в технической системе, их ран-

жирования по степени важности, влияния управляющих воздействий на поведение системы. Последнее может быть реализовано при рассмотрении полученного ориентированного нечеткого графа технической системы как нечеткой когнитивной карты, где присутствуют концепты вершины, описывающие системные факторы (переменные), и дуги между концептами, описывающие причинно-следственные связи.

Список литературы

1. Глуценко П. В. Техническая диагностика. М.: Вузовская книга, 2004. 248 с.
2. Кораблев Ю. А. Проектирование гибридных интеллектуальных систем отказоустойчивого управления. СПб.: Изд-во Печатный Цех, 2019. 156 с.
3. Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие графы и гиперграфы. М.: Научный мир, 2005. 256 с.
4. Kosko fuzzy cognitive maps // Int. J. of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. P. 65–75.

5. Осис Я. Я. Диагностирование на граф-моделях. М.: Академкнига, 1991. 244 с.
6. Ракитянская А. Б., Ротштейн А. П. Диагностика на основе нечетких отношений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 12. С. 113–130.
7. Ротштейн А. П. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем // Надежность. 2019. № 4. С. 24–31.

Информация об авторах

Кораблёв Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: juri.korablev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2432-7169>

Лосева Дарья Михайловна – аспирант кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: d.m.loseva@gmail.com

Шестопалов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: shestopalov_08@mail.ru

References

1. Glushhenko P. V. Tehnicheskaja diagnostika. M.: Vuzovskaja kniga, 2004. 248 s. (In Russ.).
2. Korablev Ju. A. Proektirovanie gibridnyh intellektual'nyh sistem otkazoustojchivogo upravlenija. SPb.: Izd-vo Pечатnyj Ceh, 2019. 156 s. (In Russ.).
3. Bershtejn L. S., Bozhenjuk A. V. Nechetkie grafy i gipergrafy. M.: Nauchnyj mir, 2005. 256 s. (In Russ.).
4. Kosko Fuzzy Cognitive Maps // Int. J. of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. P. 65–75.

5. Osis Ja. Ja. Diagnostirovanie na graf modeljah. M.: Akademkniga, 1991. 244 s. (In Russ.).
6. Rakitjanskaja A. B., Rotshtejn A. P. Diagnostika na osnove nechetkih otnoshenij // Avtomatika i telemehnika. 2007. № 12. S. 113–130. (In Russ.).
7. Rotshtejn A. P. Nechetkie kognitivnye karty v analize nadezhnosti sistem // Nadezhnost'. 2019. № 4. S. 24–31. (In Russ.).

Information about the authors

Yury A. Korablev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automation and Control Processes Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: juri.korablev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2432-7169>

Daria M. Loseva – postgraduate student of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: d.m.loseva@gmail.com

Mikhail Yu. Shestopalov – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: shestopalov_08@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.01.2022; принята к публикации после рецензирования 02.02.2023; опубликована онлайн 25.03.2023.

Submitted 26.01.2022; accepted 02.02.2023; published online 25.03.2023.
