

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-7-19
УДК 519.7

ОСНОВЫ ФОРМАЛЬНОЙ ТЕОРИИ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Н. В. Федорова

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова,
Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация*

Генерирующие и иные энергетические объекты являются сложными техническими системами, находящимися во взаимодействии с внешней материально-финансовой и информационно-правовой средой. Для обеспечения функционирования и развития технической системы важно определить ее место в ряду других технических систем: технические системы и их элементы должны быть классифицированы. Представлены основы формальной теории классификации технических систем. Определены объекты классификации. Формализованы понятия классификации, классификационного признака, значения классификационного признака. Сформулированы цель и задачи классификации. Этапы формирования и применения классификаторов включают формирование состава и структуры ядра классификатора, маркировку элементов области интерпретации и выбор элемента, соответствующего запросу пользователя. Представлены алфавит, правила вывода, аксиомы и основные теоремы формальной теории классификации. Утверждается, что полная непротиворечивая независимая теория классификации разрешима. Рассмотрена систематика видов классификаторов: элементарные (неполный и полный), базисные (дискретные иерархические, дискретные матричные, непрерывные ленточные), сложные (комбинированные и предельные). Приведены примеры использования классификаторов различных типов при описании энергетических объектов. Рассмотрены некоторые алгоритмы, проблемы маркировки и выбора. Применение обоснованной и структурированной теории классификации позволит лучше понимать и описывать взаимосвязи технических и связанных с ними систем, повысит эффективность функционирования и развития технических систем.

Ключевые слова: технические системы, классификация, формальная теория, энергетические объекты и системы.

Для цитирования: Федорова Н. В. Основы формальной теории классификации технических систем на примере объектов энергетики // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 2. С. 7–19. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-7-19.

Введение

Тепловые электрические станции (ТЭС) и другие объекты энергетики являются сложными техническими системами [1], вписанными в материально-финансовую и информационно-правовую среду [2]. Представление генерирующих энергетических объектов в стандарте IDEF0 [3, 4] позволяет выделить в них такие подсистемы, как элементы входного потока (преобразуемое сырье), элементы выходного потока (продукция основная и побочная, отходы), средства преобразования входного потока в выходной (оборудование, приборы, персонал), условия преобразования (законы, стандарты), обратная связь. Для обеспечения функционирования и развития технических систем, для обеспечения взаимодействия технических специалистов, экономистов, юристов важно определить место конкретной системы в ряду других: технические системы и их элементы должны быть классифицированы. В данной работе автором предпринята попытка систематизации классификаций технических систем на примере энергетических объектов.

Были поставлены задачи – разработать теоретические основы классификации технических систем в энергетике в виде формальной аксиоматической теории, которая позволит учесть все виды применяемых на практике способов классификации и классификационных признаков; исследовать методы модификации классификаторов, прогноза результатов применения классификаторов; создать теоретические основы алгоритмизации применения классификаторов.

Системы классификации, их особенности и недостатки

В России были приняты правила по стандартизации [5], содержащие основные положения Единой системы классификации и кодирования (ЕСКК), которые практически ежегодно обновляются с учетом развития технологий и международных рекомендаций. Однако эти правила имеют ряд недостатков: не отражены все применяемые на сегодняшний день способы классификаций технических систем, а только иерархический (последовательный) и фасетный (параллельный); недостаточно четко представлена последовательность действий по преобразованию классификаций; не рассмотрены вопросы возможной взаимосвязи классификационных признаков; не рассмотрена специфика применения классификационных признаков непрерывной природы; не рассмотрены вопросы алгоритмизации, конечности и эффективности алгоритмов кодирования и поиска, основанных на данных классификациях; классификации объектов рассматриваются с целью их последующего кодирования и не затрагивают (в явном виде) процессы функционирования и развития технических систем. Перечисленные недостатки снижают степень соответствия классификации, проведенной согласно ЕСКК, современному состоянию совокупности заявленных объектов классификации.

С точки зрения теории в настоящее время нет единого подхода к классификации технических систем. Как правило, в технике и других областях используются иерархические классификации [6]. Выбор способа классификации определяется разработчиком с учетом поставленной задачи, нормативных документов, на основании личного опыта и предпочтений. В практической деятельности классификация позволяет упорядочить объекты по наличию общих признаков или различий. Но при этом сами классификации могут сформироваться векторными, матричными (фасетными), при непрерывных значениях классификационных признаков – ленточными, при необходимости учета множества разнородных признаков – комбинированными (иерархо-матричными), при необходимости выделить возможные сферы применения – зональными, при необходимости учета этапов технологического цикла – циклическими. Целью классификации может быть не только кодирование объектов, но и адекватное отражение технологических процессов. Преимущества единого подхода к классификации, предлагаемого в данной работе: теоретическое обобщение и сравнительный анализ свойств различных классификаторов, используемых на сегодняшний день; практичность, возможность на основе этого подхода создавать алгоритмы маркировки вновь вводимых объектов и выбора объектов в базах. Формальная теория классификации дает ответ на вопрос, в каком случае существует конечный алгоритм выбора.

Актуальность предлагаемого в данной работе подхода обусловлена необходимостью теоретической обработки, упорядочения и обобщения накопленного опыта классификации технических и связанных с ними систем. Научная новизна и теоретическая значимость проделанной работы заключаются в построении формальной аксиоматической теории классификации, в формализации цели, задач, этапов, методов классификации и операций с классификаторами. Практическая значимость заключается в создании предпосылок для последующей алгоритмизации различных этапов классификации: преобразования ядра классификатора, маркировки или выбора элементов в области интерпретации. Анализ ядра классификатора в контексте конкретной области интерпретации позволит оценить эффективность (реализуемость, конечность) выбора.

Объекты классификации и специфика технических систем в энергетике

Объекты классификации – это области интерпретации теории классификации или отдельные элементы этих областей. В данной работе в качестве объектов классификации рассматриваются все аспекты технических (энергетических) систем, включая структуру, функции, процессы, подсистемы и надсистемы, а именно: материальные технические объекты (оборудование и его составные части, измерительные приборы, здания и сооружения, электростанции, энергетические системы и комплексы); иные объекты материальной сферы, необходимые для создания и функционирования технических энергетических систем (топливо, воздух, вода, иные ви-

ды сырья и ресурсов); иные объекты нематериальной сферы (документы, законы, стандарты, патенты); субъекты технических и связанных с техническими процессами (персонал электростанции, проектно-конструкторских, научно-исследовательских, учебных заведений, собственники и инвесторы, работники банковской, страховой, законодательной сфер); технические процессы (технологии производства и проведения измерений, процессы развития и обновления технических систем); связанные с техническими процессами (законотворчество, финансовая, страховая, проектная, научная, учебная деятельность, социальные явления).

Представленная в данной работе теория базировалась на энергетических системах, проиллюстрирована примерами из области энергетики. Энергетические технические системы имеют ряд особенностей: все они связаны с процессами производства, преобразования, аккумуляции и использования энергии; структура и взаимосвязи энергетических технических систем могут иметь общие черты и различия по сравнению с другими техническими системами; значительная доля классификационных признаков является физическими величинами непрерывной природы, которые на начальном этапе классификации дискретизируются в соответствии с системой предпочтительных чисел [7]; значения многих физических величин потенциально бесконечны, но значения классификационных признаков на основе этих физических величин ограничены существующим уровнем развития техники и технологий; используемые характеристики рабочих тел или оборудования могут быть взаимосвязаны (например, термодинамические параметры пара). Предлагаемая теория классификации может быть распространена на другие виды технических систем.

Классификаторы: общие положения

Классификация – это процесс применения классификатора к отдельным элементам и области интерпретации в целом и результат этого процесса; это определение соответствия элементов области интерпретации классификационным признакам и, если это возможно, деление области интерпретации на части согласно значениям классификационных признаков.

Например, полагаем, что классификационный признак – «рабочее тело турбины», значения признака – «паровые, газовые, иные». В области интерпретации «Турбины» объекты с маркировкой К-300-240 (конденсационная), Т-250/300-240 (теплофикационная), ПТ-135/165-130/15 (с производственным и теплофикационным отборами) являются паровыми, турбина ГТ-700-5 – газовая, турбины типа ВН 235-61 – реактивные гидравлические, т. е. в рассматриваемой классификации относятся к классу «иные».

Классификационные признаки рассматриваем как категории, которым может быть дано определение, отделяющее фиксированный классификационный признак от остальных признаков. Значения классификационных признаков могут образовывать как дискретные множества, так и непрерывные. В частности, если классификационный признак является технической характеристикой (работа непрерывная/периодическая, движение сред прямоток/противоток/перекрестный ток), то чаще всего множество его значений дискретно. Если классификационный признак – физическая величина (рабочий диапазон температур, давлений), то множество значений, как правило, непрерывно. Некоторые технические характеристики также имеют непрерывное множество значений, например КПД. Как дискретные, так и непрерывные множества значений могут быть как ограниченными, так и потенциально бесконечными: КПД принимает значения в интервале от 0 до 1, диапазон измерений пирометра в Кельвинах больше 0, но в теории не ограничен сверху. Для технических систем дискретные множества значений классификационных признаков конечные (часто с числом значений меньше 10) или счетные (потенциально). Однако на практике уровень развития техники и технологий определяет естественные ограничения на потенциально бесконечные множества значений. Например, разработанные на сегодняшний день промышленные пирометры могут измерять температуру до 10 000 К. В соответствии со свойствами значений классификационных признаков будем различать классификаторы дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные. Для качественных признаков применимы дискретные классификации, для количественных – дискретные и непрерывные. В простейшем случае для проведения классификации необходима одна область интерпретации, содержащая один объект, и один классификационный признак, возможно, не применимый к данному объекту, но в случае применимости имеющий по крайней мере одно содержательное значение.

Цель и задачи классификации

Целью классификации является повышение эффективности функционирования и развития технических систем путем упорядочивания различных аспектов структуры и жизненного цикла

этих систем. Задачи классификации, характеризующие различные этапы формирования и применения классификаторов: формирование состава и структуры ядра классификатора как набора классификационных признаков и их значений на основании анализа параметров, свойств и назначения элементов области интерпретации; маркировка, присвоение каждому элементу области интерпретации набора значений классификационных признаков, однозначно характеризующих данный элемент, это основная (прямая) задача классификации; выбор элемента (элементов) области интерпретации, соответствующего заданному пользователем, с учетом целевого использования, набору значений классификационных признаков (возможно, выбор неоднозначный, нечеткий).

Единый подход к различным видам классификаций позволяет планировать структуру классификаций с учетом свойств характерных параметров, а затем алгоритмизировать решение задач классификации. Используемые в данной работе определения понятия классификации и ее задач отличаются от приведенных в [5] ввиду различия целей. Целью разработки ЕСКК является кодирование информации. Цель, заявленная в данной работе, включает в себя кодирование как один из аспектов повышения эффективности технических систем.

Требования к формальным теориям

Согласно [8] формальная аксиоматическая теория считается определенной, если:

- задано конечное или счетное множество произвольных символов – алфавит;
- конечные последовательности символов называются выражениями теории;
- имеется подмножество выражений, называемых формулами;
- выделено подмножество формул, называемых аксиомами;
- правила вывода образуют конечное множество отношений между формулами.

Не все выражения, трактуемые как произвольно построенные последовательности символов языка, имеют смысл.

Формула – это корректное, допустимое выражение. Будем считать формулой такую последовательность символов, включающую обозначения объектов, операндов, скобок и иных символов, которой можно сопоставить значение истинности и словесное описание, указывающее на определенный объект или действие в контексте теории классификации.

Аксиома – утверждение, истинность которого принимается без доказательств. Аксиомы делятся:

- на логические, общие для целого класса формальных теорий;
- нелогические или собственные, определяющие специфику и содержание конкретной теории;
- контекстные, связанные со спецификой области интерпретации.

Гипотеза – предположение, утверждение, которое может быть истинно при определенных условиях.

Выводом (дедукцией) называется всякая последовательность формул такая, что всякая формула последовательности есть либо аксиома, либо гипотеза, либо непосредственное следствие каких-либо предыдущих формул по одному из правил вывода.

Формула называется теоремой, если существует вывод, в котором эта формула является последней. *Теорема* – это доказуемая формула. При необходимости отмечают, что теоремы должны выводиться только из аксиом, без гипотез.

В качестве аксиом и теорем будем рассматривать формулы, внешняя связка которых есть бинарное отношение равенства или тождественного равенства.

Разновидности дедуктивных теорий в зависимости от способа доказательства теорем: задание аксиом и правил вывода, формальная аксиоматическая теория; задание только аксиом, правила вывода считаются общеизвестными, полужормальная аксиоматическая теория; задание только правил вывода, аксиом нет, теория естественного вывода.

Дедуктивные (выводимые) теории должны обладать следующими свойствами: непротиворечивость, полнота, независимость, разрешимость, выводимость, интерпретация, общезначимость.

Основы формальной теории классификации технических систем

В формировании теории классификации использованы элементы теоретико-множественного и геометрического подходов, элементарной и линейной алгебры, алгебры высказываний.

Символы алфавита и их значение:

- 1) $a, b, c, \dots, x, y, z; a_1, \dots, a_n$ – объекты классификации 0-уровня, элементы области интерпретации;
- 2) $A, B, C, AI, AI1, AI2$ – совокупности объектов 0-уровня, области интерпретации теории T ;
- 3) $K, L, M, K1, K2, \dots$ – классификационные признаки теории T ;
- 4) $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i, k_{ij}, \dots$ – конкретные значения классификационных признаков;
- 5) $T, T1, T2, \dots$ – формальные теории классификации;
- 6) F, G, H – упорядоченная система классификационных признаков, классификаторы;
- 7) $\text{Ker}(T), \text{Ker}(F)$ – ядро классификационной теории T , ядро классификатора F , упорядоченная система классификационных признаков и их значений, а также схема этой системы, построенная с применением операций и по правилам алгебры высказываний (от англ. «kernel»);
- 8) $\text{Con}(\text{Ker}(T))$ – свертка ядра классификатора (от англ. «convolution»), выражение алгебры высказываний или значение истинности, полученное после допустимого формального преобразования и упрощения схемы ядра классификатора;
- 9) f, g, h – алгебраические формулы, функциональная зависимость;
- 10) операнды первого уровня, применяются для построения (первичного) ядра классификатора – унитарные операции $\bar{}, \lceil, \neg$ (отрицание), \uparrow, \downarrow (инверсия); бинарные операции $\wedge, \&$ (конъюнкция, и), \vee (дизъюнкция, или);
- 11) операнды второго уровня, применяются для преобразования и сравнения классификаторов и их ядер – унитарные операции \in (принадлежность элемента множеству), \notin (элемент не принадлежит множеству); бинарные операции \oplus (сложение), $-$, \setminus (вычитание), \otimes (умножение), $/$ (деление), $|$ (соответствие объектов различной природы, разложение по модулю (признаку)), \circ (суперпозиция), $=$ (равенство), \neq (неравенство), \equiv (тождественно равно), \subset, \subseteq (строгое и нестрогое вложение), \cap (пересечение), \cup (объединение), \Rightarrow (следствие), \Leftrightarrow (равнозначность); \lim – переход к пределу (последовательности, элементов, объектов);
- 12) скобки $()$, запятые « $,$ » для группировки формул;
- 13) кванторы \forall (всеобщности) и \exists (существования);
- 14) 1 (True, истина) и 0 (False, ложь) – значения истинности высказываний;
- 15) \emptyset (пустое множество), U (универсальное множество).

Выражения, формулы, аксиомы и теоремы строим согласно общим требованиям к формальным теориям. Правила вывода считаем общеизвестными, поэтому теория классификации может быть отнесена к полуформальным теориям. В частности, в доказательствах применяем:

- прямой вывод $((A \wedge (A \Rightarrow B)) \Rightarrow B) \equiv 1$;
- вывод от противного $((\neg B \Rightarrow \neg A) \wedge A) \Rightarrow B \equiv 1$;
- вывод по индукции $((A_0, A_n \Rightarrow A_{n+1} \forall n \in M) \Rightarrow A_n \forall n \in M) \equiv 1$.

Утверждения «классификационный признак применим к области интерпретации», «элемент области интерпретации соответствует значению классификационного признака» и иные характеристики теории классификации есть высказывания, которые могут быть истинными или ложными. К ним применимы законы логики высказываний, а к теории классификации – законы формальных теорий.

На рис. 1 показаны возможные результаты применения классификационного признака K к объектам области интерпретации A .

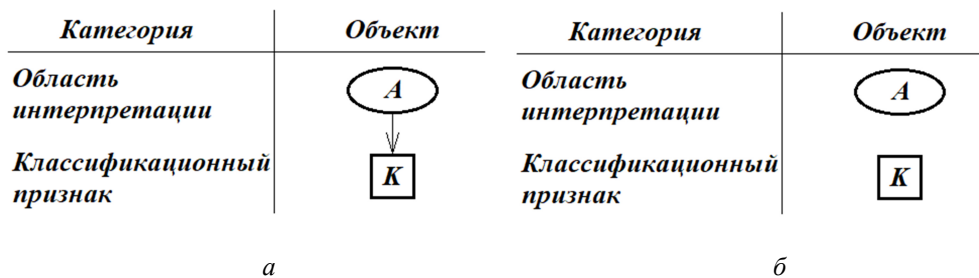


Рис. 1. Возможные результаты применения классификационного признака к области интерпретации: *a* – признак применим к области интерпретации; *б* – признак не применим к области интерпретации

Возможные результаты применимости значения признака k_1 к объекту a_1 из области A можно проиллюстрировать рис. 2.



Рис. 2. Возможные результаты применения значения классификационного признака неполного (а, б) и полного (в, г) классификатора к элементу области интерпретации:
 а, в – значение признака характеризует объект; б, г – значение признака не характеризует объект

Будем говорить, что значение k_1 классификационного признака K является *содержательным*, если ему соответствует конкретное количественное или качественное выражение. Количественное значение может быть представлено числом, множеством чисел, числовым интервалом.

Логические аксиомы теории классификации.

Аксиома 1. Любой классификационный признак K либо применим к области интерпретации A , либо не применим к ней: $K|A \vee \neg K|A \equiv 1$.

Аксиома 2. Классификационный признак K не может быть одновременно применим и не применим к области интерпретации A : $K|A \wedge \neg K|A \equiv 0$.

Аксиома 3. Элемент a области интерпретации A либо удовлетворяет значению k классификационного признака K , либо не удовлетворяет ему: $k|a \vee \neg k|a \equiv 1$.

Аксиома 4. Элемент a области интерпретации A не может одновременно удовлетворять и не удовлетворять значениям k классификационного признака K : $k|a \wedge \neg k|a \equiv 0$.

Собственные аксиомы теории классификации.

Аксиома 5. Если классификационные признаки K^1 и K^2 независимы, то результаты их применимости к области интерпретации A также независимы.

Аксиома 6. Любой классификационный признак K может принимать n значений k_1, k_2, \dots, k_n , где значения k_1, k_2, \dots, k_{n-1} являются содержательными, $n \geq 2$.

Аксиома 7. Если значения k_1 и k_2 классификационного признака K не пересекаются, то результаты соответствия элемента a области интерпретации A этим значениям независимы.

Аксиома 7 нетривиальна для непрерывных классификационных признаков, когда значения классификационного признака являются интервалами (диапазонами значений).

Аксиома 8. Свертка ядра полного классификатора тождественно равна 1.

Контекстная аксиома теории классификации энергетических технических систем.

Аксиома 9. Классификационные признаки K^1 и K^2 могут являться независимыми для одних элементов области интерпретации и зависимыми для других элементов.

Назовем теорию классификации *полной*, если для любого элемента a области интерпретации A , к которой применим классификационный признак K , найдется значение признака k , характеризующее a . В процессах выбора оборудования тепловых электрических станций в силу обстоятельств объективного и субъективного характера не всегда рассматривается полный перечень доступного оборудования.

Назовем теорию классификации *независимой*, если для любой пары независимых классификационных признаков K^1 и K^2 вопрос о том, характеризует ли каждый из этих признаков область A , решается независимо, а также если признак K характеризует A , то для любой независимой (непересекающейся) пары значений признака k_1 (диапазон $(k_{11}; k_{12})$) и k_2 (диапазон $(k_{21}; k_{22})$) вопрос о том, характеризуют ли они элемент a , решается независимо. Вопрос о независимости признаков и их значений в теории классификации является существенным. Например, для внешней среды температура и давление – независимые параметры, а для пара как рабочего тела оборудования – зависимые.

Назовем теорию классификации *непротиворечивой*, если для любого классификационного признака K всегда и однозначно решается вопрос о его применимости к области интерпретации A , а в случае возможности применения признака K для любого его значения k и для любого элемента a из области A всегда и однозначно решается вопрос о соответствии значения k элементу a . Если признак K применим к области A , то назовем *алгоритмом классификации* процедуру сопоставления каждому элементу a области интерпретации A (единственного) значения k классификационного признака K теории классификации T . Назовем теорию классификации *разрешимой*, если в ней можно построить конечный алгоритм классификации. Для решения практических задач теория классификации должна быть разрешимой и непротиворечивой.

Теорема 1. В полной теории T с классификационным признаком K , применимым к области интерпретации A и имеющим значения k_1, k_2, \dots, k_n , если элемент a из области A не соответствует значениям k_1, k_2, \dots, k_{n-1} , то он соответствует значению k_n :

$$k_n = \neg k_1 \wedge \neg k_2 \wedge \dots \wedge \neg k_{n-1} = \neg (k_1 \vee k_2 \vee \dots \vee k_{n-1}),$$

т. е. последнее значение – это отсутствие соответствия элемента всем ранее перечисленным значениям. В словесном описании этому соответствует слово «иное». Возможны случаи (концепции):

1) все значения k_1, k_2, \dots, k_n являются содержательными, и достоверно известно, что имеются другие содержательные значения (например, рассматриваются только отдельные виды турбин, но при этом разных производителей и разной мощности);

2) все значения k_1, k_2, \dots, k_n являются содержательными, и достоверно известно (доказано), что других содержательных значений быть не может (например, принцип действия установки во времени непрерывный/дискретный/дискретно-непрерывный);

3) значения k_1, k_2, \dots, k_{n-1} являются содержательными, значение k_n объединяет все иные, отличные от выделенных, содержательные значения, известные и неизвестные;

4) значения k_1, k_2, \dots, k_{n-1} являются содержательными, на момент классификации они исчерпывают все известные содержательные значения, но имеется потенциальная возможность иных содержательных значений, которые объединены в значении k_n .

В случае 1 классификатор является неполным, в случаях 2, 3, 4 – полным. Поскольку в случаях 3 и 4 наполнение значения k_n неоднозначно и доподлинно не известно, будем называть это значение несодержательным.

Теорема 2. В полной непротиворечивой независимой теории T с классификационным признаком K , принимающим значения $k_1, k_2, \dots, k_n, n \geq 2$, справедливы равенства $\neg k_1 = k_2 \vee k_3 \vee \dots \vee k_n; \neg k_2 = k_1 \vee k_3 \vee \dots \vee k_n; \dots; \neg k_j = \bigvee_{i=1}^{j-1} k_i \vee \bigvee_{i=j+1}^n k_i; \dots; \neg k_n = k_1 \vee k_2 \vee \dots \vee k_{n-1}$.

В полной непротиворечивой независимой теории классификации T множество значений классификационного признака k_1, k_2, \dots, k_n образует один из возможных вариантов многозначной логики (при $n = 2$ – двузначную) [9], подчиняется ее аксиомам, теоремам и правилам вывода.

Теорема 3. Полная непротиворечивая независимая теория классификации разрешима.

Разрешимость теории классификации имеет принципиальное значение. В разрешимых теориях можно построить алгоритм, позволяющий за конечное число шагов провести маркировку элемента области интерпретации или поиск требуемого элемента в базе маркированных элементов или сделать вывод, что данные задачи не могут быть выполнены.

В неразрешимых теориях классификации элементу области интерпретации может соответствовать более одного значения классификационного признака или не соответствовать ни одного. В таких случаях необходима разработка алгоритмов, рекомендуемых наиболее близкие значения, а окончательное решение остается за ЛПР (лицом, принимающим решения). Подобные рекомендации могут быть основаны, в частности, на методах нечеткой логики [10].

Виды классификаторов

Классификаторы (системы классификации) можно разделить на три вида.

Первый вид состоит из двух элементарных классификаторов, неполного e_1 (см. рис. 2, а, б) и полного e_{10} (см. рис. 2, в, г). В результате применения неполного классификатора элемент области интерпретации либо маркируется на соответствие значению k_1 классификационного признака K (см. рис. 2, а), либо остается без маркировки (см. рис. 2, б). В результате применения полного классификатора элемент области интерпретации всегда получает маркировку: на соответствие значению k_1 классификационного признака K (см. рис. 2, в) или на отсутствие соответствия этому значению (см. рис. 2, г). Ядро неполного элементарного классификатора $\text{Ker}(e_1) = K(k_1)$, ядро полного элементарного классификатора $\text{Ker}(e_{10}) = K(k_1, \neg k_1)$.

Элементарные классификаторы могут быть применены к разделению области интерпретации A на классы по отношению к значению k_1 . Для классификатора e_{10} возможные результаты представлены на рис. 3.

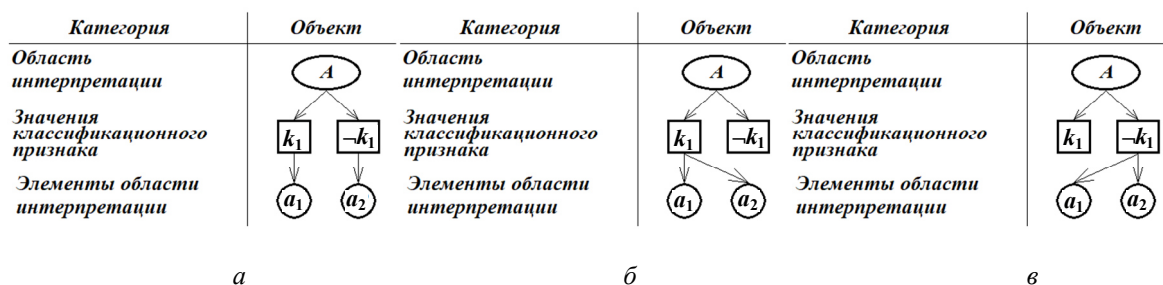


Рис. 3. Возможные результаты применения полного элементарного классификатора к разделению области интерпретации на классы: а – нетривиальный; б – тривиальный; в – вырожденный

В случае, показанном на рис. 3, а, исходная область A может быть разделена на две части по отношению к признаку k_1 , в случаях, показанных на рис. 3, б и 3, в – не может.

Элементарные классификаторы занимают особое место в системе классификаторов, составляя зародыш любой классификации. Любая другая классификация является определенной комбинацией элементарных. Отметим, что $\text{Ker}(e_{10}) = k_1 \vee \neg k_1$, $\text{ConKer}(e_{10}) \equiv 1$, $\text{Ker}(e_1) = k_1$.

Второй вид составляют базисные классификаторы, в которых отражена основная идея, принцип, ядро того или иного подхода к классификации технических систем. Их нельзя представить в виде комбинации более простых классификаторов, за исключением элементарных.

Логично требовать, чтобы совокупность базисных классификаторов теории была независимой. На основании анализа учебных и научных материалов, ГОСТов, интернет-источников, имеющих отношение к объектам энергетики, был сделан вывод о наличии трех типов базисных классификаторов: иерархических дискретных Ir , матричных дискретных Mt (включая векторные Vt и сверхматричные SMt) и ленточных непрерывных Lt .

Третий вид – сложные классификаторы, модификации и комбинации базисных классификаторов, полученные из одного или более классификаторов различных типов с применением операндов второго уровня. Классификаторы как упорядоченные системы классификационных признаков, применяемые к областям интерпретации теории классификации, выступают в качестве операндов первого уровня. В качестве операндов второго уровня при формировании сложных классификаторов использовались суперпозиция и/или предельный переход.

Назовем классификацию *комбинированной*, если ее можно представить как суперпозицию базисных. Классификация $Ir \circ Mt | A = Ir (Mt | A)$ является матрично-иерархической, классификация $Mt \circ Ir | A = Mt (Ir | A)$ – иерархо-матричной, классификация $Vt \circ Lt | A = Vt (Lt | A)$ – ленточно-векторной и т. п. Назовем классификацию *предельной*, если ее можно представить как предел последовательности классификаторов одного типа, например $Z = \lim_{n \rightarrow \infty} Lt_n$.

Алгоритмы маркировки и выбора

В соответствии с аксиомами и теоремами теории классификации эффективные алгоритмы маркировки и выбора существуют не всегда. Если не может быть решена задача маркировки, значит, маркеров (наборов значений классификационных признаков) для всех элементов области интерпретации недостаточно или маркеры некорректны. Если задача выбора не может быть решена, невозможно ответить на вопрос, есть ли в области интерпретации требуемые элементы. Возможны ситуации, когда задача выбора решена, но неоднозначно (найден более одного подходящего элемента) или отрицательно (показано, что в области интерпретации нет подходящих элементов). Во всех перечисленных случаях необходимо корректировать постановку задачи выбора: с точки зрения практики должно быть выбрано одно оптимальное решение.

Проблемы, возникающие при маркировке и выборе элементов области интерпретации, могут сигнализировать не только о недостаточно корректно поставленных задачах или недостатках в структуре классификатора, но и о системных проблемах, связанных с предметной областью – энергетикой, что позволяет диагностировать проблемы функционирования и прогнозировать направления развития этих систем. Если для объектов области интерпретации два классификационных признака связаны взаимно однозначным соответствием, значит, в ядре классификатора достаточно отразить один из них и в документах, описывающих технические системы, упорядочивать информацию по одному признаку. Если сформировался практический запрос на набор классификационных признаков, отсутствующий у элементов области интерпретации (например, насосы одновременно большого расхода и большого перепада давлений), значит, необходимы разработка и производство новых видов оборудования, приборов, технологий. Если выбрано несколько элементов, удовлетворяющих условиям запроса, то необходима разработка правил для конкретизации выбора. Например, у большинства манометров нижний предел измерения давлений равен 0, поэтому для измерения малых давлений подойдет значительное число манометров. Тогда при выборе учитывают максимальное измеряемое давление, его стабильность, свойства окружающей среды, т. е. необходим учет условий функционирования системы.

На рис. 4 представлен упрощенный алгоритм маркировки для двухуровневой иерархии. Классификационные признаки дискретные, независимые.

Классификация полная, непротиворечивая. Согласно теореме 3 такая классификация разрешима. Согласно алгоритму маркировки элементы области интерпретации A упорядочены по номерам от 1 до n : $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Перебирая элементы в порядке нумерации, для каждого элемента ai , $i = 1, \dots, n$ рассматриваем значения классификационного признака первого уровня k_1, \dots, k_{n1} . Возможны два исхода: элемент ai соответствует одному из содержательных значений k_1, \dots, k_{n1} или не соответствует ни одному из этих значений. Во втором случае полагаем, что элемент удовлетворяет значению k_{n1} (иное), и на этом присвоение значения (маркировка) выполнено: $ai | k_{n1}$. В первом случае, если элемент ai удовлетворяет значению kj , смотрим, соответствуют ли этому значению классификационные признаки второго уровня kj_1, \dots, kj_{n2} . Если нет, считаем присвоение значения признака выполненным: $ai | kj$ – элементу ai соответствует значение признака kj . Если да, переходим на следующий уровень классификации и определяем, какому значению признака второго уровня соответствует элемент ai : $ai | kj_l$, $1 \leq l \leq n_2$. При наличии большего количества уровней в расширенном алгоритме далее определяем, есть ли для значения kj_l классификационные признаки третьего уровня $kj_{l1}, \dots, kj_{l-n_3}$ и т. д. Допускается, что разные элементы получат одинаковую маркировку.

Алгоритм выбора для данной иерархии подобен алгоритму маркировки. Полагаем, что все элементы области интерпретации $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ промаркированы и задан конкретный набор значений классификационных признаков kj_l (одно- или двухуровневый, индекс l может отсутствовать), допустимый для данной области интерпретации.

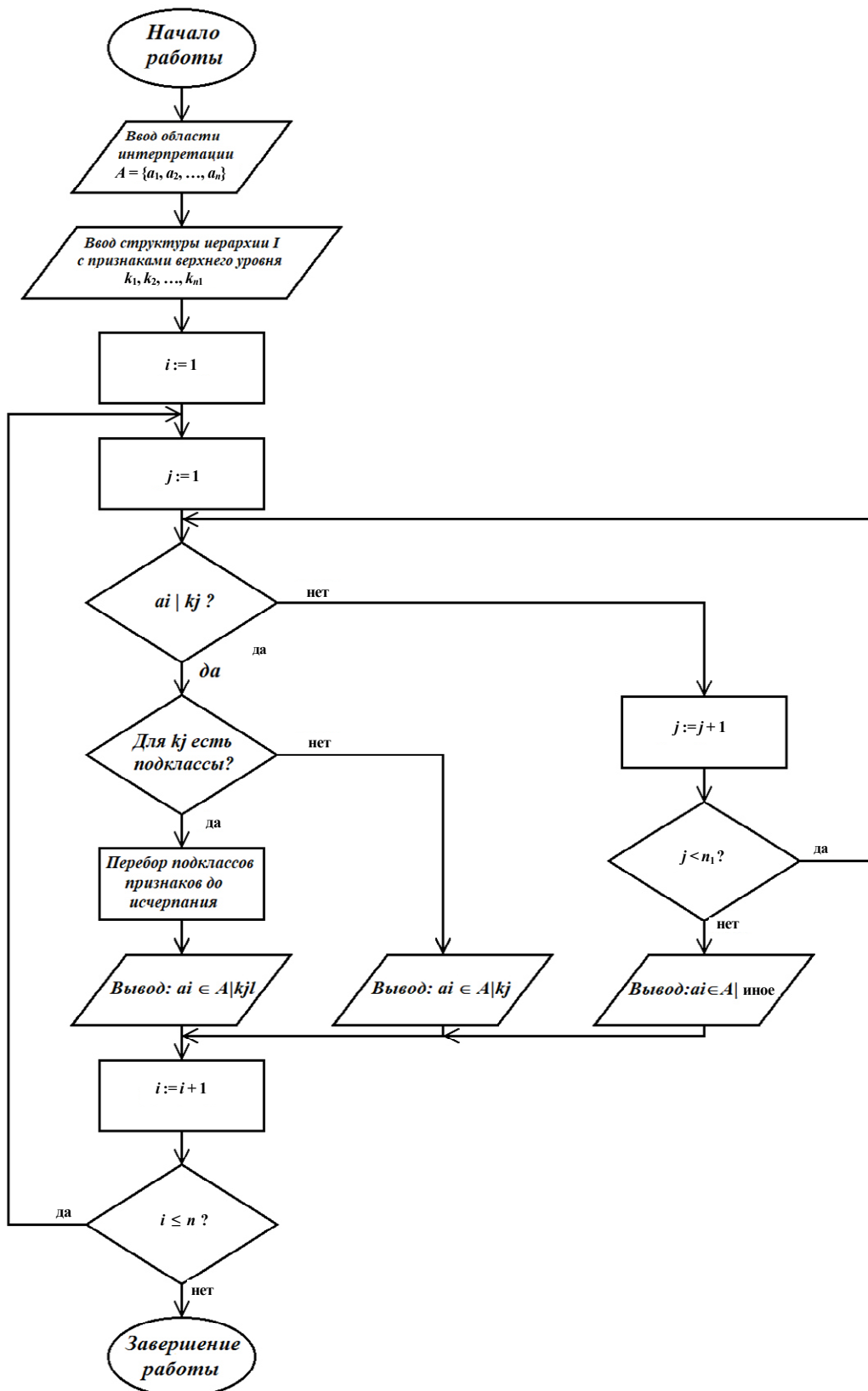


Рис. 4. Упрощенный алгоритм маркировки для двухуровневой иерархии

Перебирая последовательно все элементы области интерпретации, находим требуемый элемент a_i , возможно, не единственный, или убеждаемся, что требуемых элементов нет.

Заключение

В данной работе представлены основы теории классификации технических систем. Рассмотрены способы и системы классификации, в частности ЕСКК. Отмечено, что все применяемые на сегодняшний день способы классификаций технических систем не систематизированы, не рассмотрена специфика классификации, если классификационные признаки являются зависимыми или имеют непрерывную природу. Рассмотрены объекты классификации и специфика технических систем в энергетике. Отмечено, что для энергетических систем, связанных с процессами преобразования энергии, значительная доля классификационных признаков является физическими величинами непрерывной природы, возможно, зависимыми друг от друга.

Сформулированы цель и задачи классификации. Задачи характеризуют этапы классификации: формирование ядра классификатора, маркировка и выбор элементов области интерпретации.

С учетом общих требований к формальным теориям сформулированы основы формальной теории классификации технических систем, включающие символы языка и их значения, правила вывода, аксиомы и теоремы. Согласно теоретическим положениям полная непротиворечивая независимая теория классификации разрешима. Введены понятия видов классификаторов: элементарные, базисные (иерархические, векторные и матричные, ленточные), сложные (комбинированные и предельные). Рассмотрены отдельные проблемы алгоритмизации маркировки и выбора.

Основное преимущество и отличие предлагаемого подхода к классификации от существующих – создание теоретических предпосылок для формализации и использования *различных* способов классификации, уже нашедших применение в современной научной и практической деятельности, в том числе отличающихся от наиболее широко распространенных иерархических и матричных (фасетных), на основе единой формальной теории классификации.

Новизна проделанной работы заключается в построении формальной аксиоматической теории классификации, в формализации цели, задач, этапов, методов классификации и операций с классификаторами. Практическая значимость заключается в создании предпосылок для последующей алгоритмизации различных этапов классификации для классификаторов различной структуры, с классификационными признаками непрерывной и дискретной природы. Анализ ядра классификатора в контексте области интерпретации позволит оценить эффективность выбора.

На основании положений теории в последующих работах автором будут исследованы свойства базисных и сложных классификаторов, возможности расширения и потенциальные сферы применения этих классификаторов.

Результаты исследований, представленные в данной работе, могут быть применены для систематизации и описания технических и связанных с ними систем, алгоритмизации процессов классификации этих систем, прогнозирования проблем функционирования и направления развития этих систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хубка В. Теория технических систем. М.: Мир, 1987. 202 с.
2. Fedorova N. Systemic aspects of the energy complex based on coal TPP // Energy System Research 2019 E3S Web of Conferences 114, 06001 (2019). URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/40/e3sconf_esr2019_06001.pdf (дата обращения: 22.12.2020).
3. Federal Information Processing Standards Publication: integration definition for function modeling (IDEF0). URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/FIPS/fipspub183.pdf> (дата обращения: 22.12.2020).
4. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Госстандарт России. 49 с.
5. ПР 50.1.019-2000. Основные положения единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации и унифицированных систем документации в Российской Федерации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200042805> (дата обращения: 22.12.2020).
6. Саламатов Ю. П. Система законов развития техники. Красноярск, 1996. URL: http://rus.triz-guide.com/assets/files/book_2/ (дата обращения: 22.12.2020).
7. ГОСТ 8032-84. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. М.: Изд-во стандартов, 1987. 18 с.
8. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. М.: Наука, 1971. 322 с.
9. Карпенко А. С. Развитие многозначной логики. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 448 с.
10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.

Статья поступила в редакцию 29.12.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Наталья Васильевна Федорова – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова; Россия, 346428, Новочеркасск; fedorovanv61@rambler.ru.



PRINCIPLES OF FORMAL CLASSIFICATION THEORY OF TECHNICAL SYSTEMS: CASE OF ENERGY FACILITIES

N. V. Fedorova

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation*

Abstract. The article describes the power generating and other energy facilities as complex technical systems interacting with the material, financial, informational and legal environment. To ensure functioning and development of a technical system it is important to determine its place among other technical systems: technical systems and their elements must be classified. There have been presented the principles of formal theory of technical system classification. The classification objects have been given a definition. The concepts of classification, classification attribute and meaning of the classification attribute are formalized. The goal and tasks of the classification are formulated. The stages of forming and applying classifiers include developing the composition and structure of classifier kernel, marking interpretation elements and selecting an element corresponding to the user's request. The alphabet, inference rules, axioms and main theorems of the classification formal theory are presented. It is proved that a complete consistent independent classification theory is decidable. The taxonomy of the classifier types is considered: elementary (incomplete and complete), basic (discrete hierarchical, discrete matrix, continuous band), complex (combined and limiting). Examples of using classifiers of various types in the description of energy objects are given. The algorithms, labeling and selection problems are considered. The use of a grounded and structured classification theory allows better understanding and description of the relationship between technical and related systems and it increases the efficiency of functioning and development of technical systems.

Key words: technical systems, classification, formal theory, energy objects and systems.

For citation: Fedorova N. V. Principles of formal classification theory of technical systems: case of energy facilities. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;2:7-19. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-7-19.

REFERENCES

1. Khubka V. *Teoriia tekhnicheskikh sistem* [Technical systems theory]. Moscow, Mir Publ., 1987. 202 p.
2. Fedorova N. Systemic aspects of the energy complex based on coal TPP. *Energy System Research 2019 E3S Web of Conferences 114*, 06001 (2019). Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/40/e3sconf_esr2019_06001.pdf (accessed: 22.12.2020).
3. *Federal Information Processing Standards Publication: integration definition for function modeling (IDEF0)*. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/FIPS/fipspub183.pdf> (accessed: 22.12.2020).
4. R 50.1.028-2001. *Informatsionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniia* [R 50.1.028-2001. Information technology to support life cycle of products. Functional Modeling Methodology]. Moscow, Gosstandart Rossii. 49 p.
5. PR 50.1.019-2000. *Osnovnye polozheniia edinoi sistemy klassifikatsii i kodirovaniia tekhniko-ekonomicheskoi i sotsial'noi informatsii i unifikirovannykh sistem dokumentatsii v Rossiiskoi Federatsii* [PR 50.1.019-2000. General provisions of unified system of classification and coding of technical, economic and social information and unified documentation systems in the Russian Federation]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200042805> (accessed: 22.12.2020).

6. Salamatov Iu. P. *Sistema zakonov razvitiia tekhniki* [System of laws of technology development]. Krasnoiarsk, 1996. Available at: http://rus.triz-guide.com/assets/files/book_2/ (accessed: 22.12.2020).
7. GOST 8032-84. *Predpochtitel'nye chisla i riady predpochtitel'nykh chisel* [GOST 8032-84. Preferred numbers and series of preferred numbers]. Moscow, Izd-vo standartov, 1987. 18 p.
8. Mendel'son E. *Vvedenie v matematicheskuiu logiku* [Introduction to mathematical logic]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 322 p.
9. Karpenko A. S. *Razvitie mnogoznachnoi logiki* [Development of multivalued logic]. Moscow, Izd-vo LKI, 2010. 448 p.
10. Zade L. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiuu priblizhennykh reshenii* [Concept of linguistic variable and its application in making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976. 167 p.

The article submitted to the editors 29.12.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Natalia V. Fedorova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Thermal Power Plants and Heat Engineering; Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); Russia, 346428, Novocherkassk; fedorovanv61@rambler.ru.

