

# УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-7-20  
УДК 519.7

## СЛОЖНЫЕ КЛАССИФИКАТОРЫ ФОРМАЛЬНОЙ ТЕОРИИ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ИЕРАРХО-МАТРИЧНЫЕ, ЗОНАЛЬНЫЕ, ЦИКЛИЧЕСКИЕ

*Н. В. Федорова*

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

Различные аспекты сложных технических систем могут быть упорядочены и классифицированы в соответствии с совокупностью, структурой и значениями характеризующих эти системы признаков на основе единого подхода к различным видам классификаций. Наиболее сложными являются рассмотренные в данной работе иерархо-матричные, циклические и зональные классификаторы. Зоны – это области, выделенные в пространстве классификационных признаков, отличающиеся одинаковым значением дополнительного целевого классификационного признака. Размерность зональной классификации равна количеству описательных классификационных признаков, зональная размерность равна количеству зон. Сложение зон осуществляется по целевому классификационному признаку, умножение зон заключается во введении новых описательных классификационных признаков. Циклическость – повторение подобных элементов, которое происходит в пространстве физических величин или иных параметров. Для всех циклов определено понятие стадий цикла, которое является специфическим (целевым) классификационным признаком. Внутренняя размерность цикла равна количеству стадий, внешняя размерность равна количеству актов цикла, описательная размерность равна количеству описательных классификационных признаков. Сложение циклов может осуществляться как по стадиям, так и по описательным признакам и заключается в увеличении количества значений классификационных признаков. Умножение циклов, аналогично умножению зон, заключается во введении новых описательных классификационных признаков. Зональные и циклические классификаторы широко применяются в практике описания и планирования технических энергетических систем. Широкий спектр классификаторов, упорядоченный с позиции единой формальной теории классификации, позволяет учитывать особенности конкретных технических систем, условия функционирования объектов, контекст области интерпретации. В результате повысится степень адекватности классификаторов разнообразию объектов области интерпретации и репрезентативность моделей, основанных на классификаторах.

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

**Для цитирования:** Федорова Н. В. Сложные классификаторы формальной теории классификации технических систем: иерархо-матричные, зональные, циклические // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 4. С. 7–20. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-7-20.

### **Введение**

Различные аспекты сложных технических систем могут быть упорядочены и классифицированы в соответствии с совокупностью, структурой и значениями характеризующих эти системы признаков на основе единого подхода к различным видам классификаций. Основы теории классификации технических систем допускают представление в терминах формальной аксиоматической теории, с выбором области интерпретации, в частности, состоящей из энергетических

объектов. Классификаторы формальной теории подразделяются на элементарные, базисные и сложные. В данной работе будут рассмотрены свойства и особенности сложных комбинированных и предельных классификаторов – иерархо-матричных, зональных и циклических.

### **Постановка задачи исследования**

Была поставлена задача: исследовать и описать свойства и особенности сложных классификаторов – иерархо-матричных и иных комбинированных, предельных комбинированных зональных, модифицированных комбинированных циклических; рассмотреть возможные операции по преобразованию этих классификаторов; изучить свойства операций с классификаторами; обобщить полученные результаты с применением аппарата формальной теории; рассмотреть возможные сферы предпочтительного использования конкретных видов классификаторов.

### **Общее понятие сложных классификаторов**

В формальной теории можно определить три вида классификаторов: элементарные (неполный и полный), базисные (иерархические дискретные, матричные дискретные и ленточные непрерывные) и сложные. В элементарных классификаторах представлено общее понятие классификации. В базисных классификаторах отражены принципы подходов к классификации технических систем. Сложные классификаторы – это модификации и комбинации базисных, полученные с помощью операндов второго уровня, таких как суперпозиция и предельный переход. Если применяется суперпозиция базисных классификаторов, то полученные классификации называем комбинированными. Если применяется предельный переход, то полученные классификации называем предельными. Модификацией является, в частности, введение целевого классификационного признака, рассматриваемого отдельно от остальных, описательных признаков, и отражающего обобщенную характеристику объектов области интерпретации – экономическую эффективность, целесообразность предпочтительного применения и т. п. Использование различных подходов и модификаций в одном ядре сложного классификатора позволяет повысить степень адекватности модели разнообразию объектов области интерпретации, учесть условия функционирования объектов, контекст области интерпретации, повысить репрезентативность моделей, основанных на классификаторах, и степень восприятия для пользователей особенностей объектов области интерпретации и соотношений между объектами.

Актуальность предлагаемого в данной работе подхода обусловлена необходимостью не только теоретического исследования, но и адаптации для практического применения всех используемых в современной практике способов классификации технических и связанных с ними систем. Научная новизна и теоретическая значимость проделанной работы заключается в описании структуры, свойств и особенностей сложных классификаторов, таких как иерархо-матричные и иные комбинированные, зональные предельные комбинированные, циклические модифицированные комбинированные, а также простейших операций с классификаторами: сложение/вычитание, умножение/деление, сравнение, разбиение, введение целевого классификационного признака. Результаты данной работы могут быть использованы в процедурах планирования, описания и наглядного представления технологических и экономических процессов, разработки технологических циклов, выбора оборудования, а также при проведении классификации и кодирования материальных объектов и процессов, при разработке алгоритмов изменения баз данных с учетом структуры классификаторов, что обуславливает практическую значимость работы.

### **Комбинированные классификаторы: иерархо-матричные и иные**

**Понятие, структура, размерность комбинированной классификации.** Комбинированные классификации применяются, когда структура классификационных признаков такова, что их нельзя упорядочить по правилам базисных классификаций: часть из них независимы, другие же соподчинены, некоторые признаки имеют дискретную природу, другие непрерывную. Область интерпретации делится на классы по правилам одного базисного классификатора – внутреннего, затем другого – внешнего. Для внешнего классификатора вся структура внутреннего классификатора рассматривается как один обобщенный классификационный признак. При суперпозиции двух различных классификаторов можно определить шесть видов классификаторов второго уровня:  $Mt \circ Ir$  – иерархо-матричные (внутренняя классификация – иерархическая, внешняя – матричная) (рис. 1),  $Ir \circ Mt$  – матрично-иерархические,  $Lt \circ Ir$  – иерархо-ленточные,  $Ir \circ Lt$  – ленточно-иерархические,  $Mt \circ Lt$  – ленточно-матричные,  $Lt \circ Mt$  – матрично-ленточные.

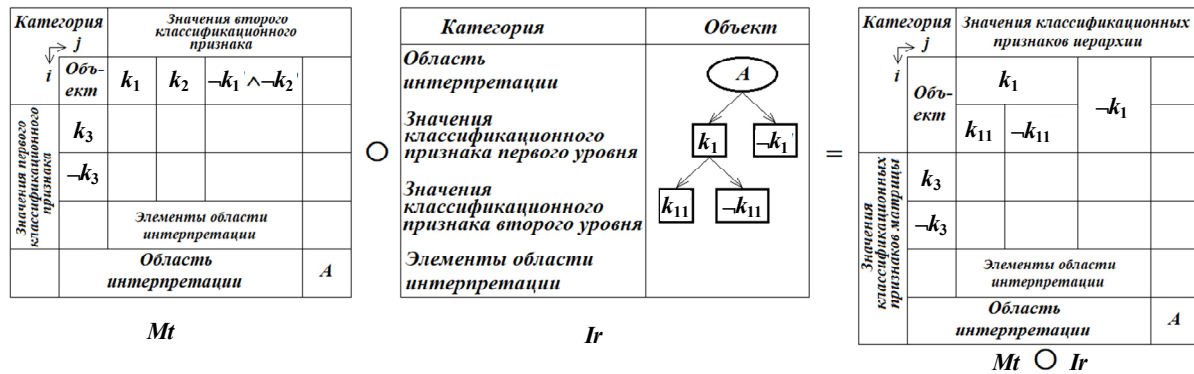


Рис. 1. Построение ядра простейшей иерархо-матричной классификации

Ввиду общности свойств два последних вида классификаторов можно объединить в один. Векторные и сверхматричные классификации полагаем разновидностью матричных. Еще три комбинированные классификации являются суперпозицией двух одинаковых классификаций  $Ir \circ Ir, Mt \circ Mt, Lt \circ Lt$ . В первом случае определенным классам (узлам) иерархии соответствуют не уникальные объекты, а вложенные иерархии. Во втором и третьем случаях определенным классам (ячейкам) матрицы/ленты соответствуют вложенные матрицы/ленты. Аналогично вводятся комбинированные классификаторы третьего и последующих уровней. Базисные классификаторы имеют уровень 1. Суперпозиция двух базисных классификаторов есть комбинированный классификатор уровня 2. Комбинированный классификатор уровня  $n$  есть суперпозиция классификатора уровня 1 и комбинированного классификатора уровня  $n - 1$ , где  $n \geq 3$ .

В табл. представлен пример практического применения иерархо-матричной модели [1].

**Иерархо-матричная модель классификации параметров систем утилизации сточных вод ТЭС**

Характеристика показателя	Показатель	Система охлаждения				
		Прямочная	Оборотная			
			С водохранилищем	С брызгальной установкой	С башенной градирней	С воздушной конденсационной установкой
Расход природных ресурсов	Дополнительный удельный расход условного топлива, т/(ГВт · ч)	0	9	23	32	46
	Безвозвратное водопотребление, м <sup>3</sup> /(ГВт · ч)	1 000	1 400	2 000	2 200	50
	Отвод земли под водоохладители, га	0	570	60	5	7
Выбросы в окружающую среду	Сброс тепла в атмосферу, Гкал/(ГВт · ч)	1 380	1 450	1 520	1 600	1 730
	Сброс солей в водоем, т/(ГВт · год)	0,3	0,9	1,3	1,5	0,02
Экономические показатели	Удельные капиталовложения, руб./ГВт уст. мощности в ценах 2000 г.)	12	16	17	20	60
	Эксплуатационные затраты, млн руб./ГВт · год)	4,7	4,4	9,9	13,5	22,2
	Расход электроэнергии, (ГВт · ч)/год	0,05	0,04	0,07	0,10	0,09

Размерность и расширенную размерность комбинированных классификаций определяем по правилам составляющих их базисных классификаций, разделяя размерности внутренней и внешней классификаций символом  $\times$ . Так, для иерархо-матричных классификаций, если  $\dim(Mt) = m, \dim(Ir) = n$ , то  $\dim(Mt \circ Ir) = (m - 1) \times n$ , следовательно,  $m \geq 2$ , т. е. иерархо-векторные классификации не определены. Если (см. рис. 1)  $\dim(Mt) = 2, \text{extdim}(Mt) = 2 \times 3$ ,

$\dim(Ir) = 2$ ,  $\text{extdim}(Ir) = ((2), (2), 0)$ , то  $\dim(Mt \circ Ir) = 1|_M \times 2|_I$ ,  $\text{extdim}(Mt \circ Ir) = 2 \times ((2), (2), 0)$ . Общее и предельное количество классов, операции сложения/вычитания, умножения/деления, сравнения в комбинированных классификациях определяются по аналогии с базисными.

**Сфера применения комбинированных классификаторов.** Комбинированные классификаторы широко применяются в технической и справочной литературе, в стандартах при описании свойств оборудования и приборов [1–3].

### Предельные комбинированные классификаторы: зоны

**Понятие, структура, размерность зональной классификации.** Предельные классификации получаются как предел последовательности (комбинированных) классификаторов. Границы классов в пространстве классификационных признаков могут приобрести сложную конфигурацию.

Зональные классификации применяются, когда классификационные признаки по своей природе непрерывны, поскольку являются физическими величинами, но границы классов в пространстве классификационных признаков не являются линиями и поверхностями первого порядка, параллельными осям координат (осям классификационных признаков), при этом внутри основных классов могут быть выделены подклассы. Таким образом, зональные классификации являются расширением понятий ленточных и иерархических классификаций. Зоны – это области, выделенные в пространстве классификационных признаков, как правило, связанные и отличающиеся одинаковым значением дополнительного целевого классификационного признака.

Зональные классификации применимы, когда количество классификационных признаков не менее  $n + 1$ ,  $n \geq 2$ , из которых  $n$  классификационных признаков, не соподчиненные, но, возможно, зависимые, задают пространство, в котором формируются границы зон, и еще один признак характеризует степень соответствия элементов области интерпретации, попавших в конкретную зону, целевому показателю количественной или качественной природы (минимальная стоимость производства, максимальный КПД, минимизация рисков, улучшение экологических показателей и т. п.). Назовем первые  $n$  признаков описательными, последний – целевым. Ядро зональной классификации –  $\text{Ker}(Zt) = K_1 \otimes_L K_2 \otimes_L \dots \otimes_L K_n \otimes_Z K_{n+1} = K$ , где  $\otimes_L$  – умножение в формате ленточной (или матричной) классификации;  $\otimes_Z$  – зональное умножение, введение целевого классификационного признака. При одном описательном классификационном признаке зональные классификации вырождаются в ленточные. Зональная классификация не может быть представлена как комбинация ленточных классификаций, но может быть приближена с любой степенью точности комбинацией ленточных классификаций:  $Z = \lim_{n \rightarrow \infty} Lt_1 \circ Lt_2 \circ \dots \circ Lt_n$ .

В практике классификации технических систем при  $n = 2$  границы зон являются аналитическими кривыми или ломаными линиями, составленными из конечного количества дуг аналитических кривых и отрезков прямых (рис. 2, а) [4].

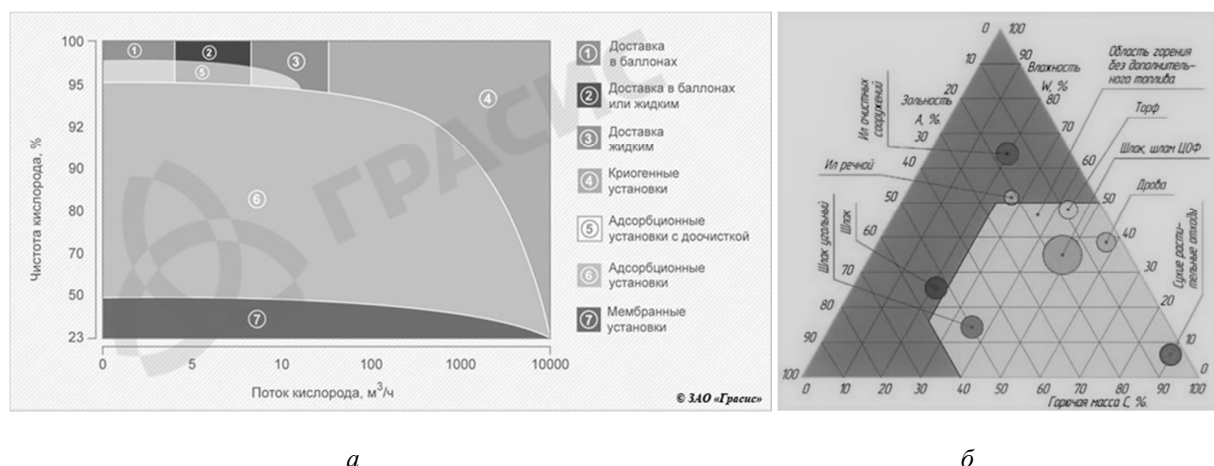


Рис. 2. Примеры зональных моделей: а – зональная модель представления экономической целесообразности различных способов доставки и производства кислорода ( $O_2$ ); б – зональная модель состава и свойств различных видов низкореакционных топлив и отходов в формате треугольника Таннера

При необходимости отразить на плоскости зоны при  $n = 3$  и при наличии зависимости между значениями описательных классификационных признаков используют дополнительную разметку плоскости классификационных признаков, например подобную треугольнику Таннера (рис. 2, б) [5]. Для зональных классификаций значения описательных классификационных признаков задают критические точки границ зон. Значения целевого признака часто представлены формальными номерами зон или, наоборот, подробными словесными описаниями зон, а подклассы выделены только визуально.

Назовем размерностью зональной классификации количество описательных классификационных признаков:  $\dim(Zt) = n \geq 2$ . Назовем зональной размерностью зональной классификации  $z\dim(Zt) = m \geq 2$  количество зон и подклассов (подзон), упорядоченных аналогично иерархической классификации (если выделена и поименована одна зона, оставшееся поле – это «иное»). Назовем присоединенной размерностью зональной классификации максимальное количество уровней иерархии, вложенных в отдельные зоны:  $attdim(Zt) = p \geq 1$  (от англ. *attached* – присоединенный). Суммарное количество зон и подклассов будем называть количеством классов всех уровней и обозначать  $nc(Zt) = r$  (от англ. *number of classes* – количество классов).

На рис. 2, а представлена зональная классификация экономической целесообразности различных способов доставки и производства кислорода. Описательные классификационные признаки – поток кислорода,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , и чистота кислорода, %. Целевой признак – экономическая целесообразность, в данном случае – минимизация затрат на производство и доставку кислорода. Для этой зональной классификации  $\dim(Zt) = 2$ ,  $z\dim(Zt) = ((7); (2, 2, 2, 0, 3, 0, 0))$ ,  $attdim(Zt) = 2$ ,  $nc(Zt) = 13$ . Для рис. 2, б  $\dim(Zt) = 3$ ,  $z\dim(Zt) = ((2); (4, 6))$ ,  $attdim(Zt) = 2$ ,  $nc(Zt) = 12$ .

**Операции над зональными классификациями: сложение, умножение, сравнение, разбиение.** Сложение и умножение определено для зональных классификаций с одинаковыми описательными и целевым классификационными признаками. Обозначим символом  $\partial A|Zt$  совокупность границ всех зон и подклассов области интерпретации  $A$  при зональной классификации  $Zt$ .

Назовем суммой зональных классификаций  $Zt1$  и  $Zt2$  зональную классификацию  $Zt3 = Zt1 \oplus_z Zt2$ , удовлетворяющую условиям рис. 3.

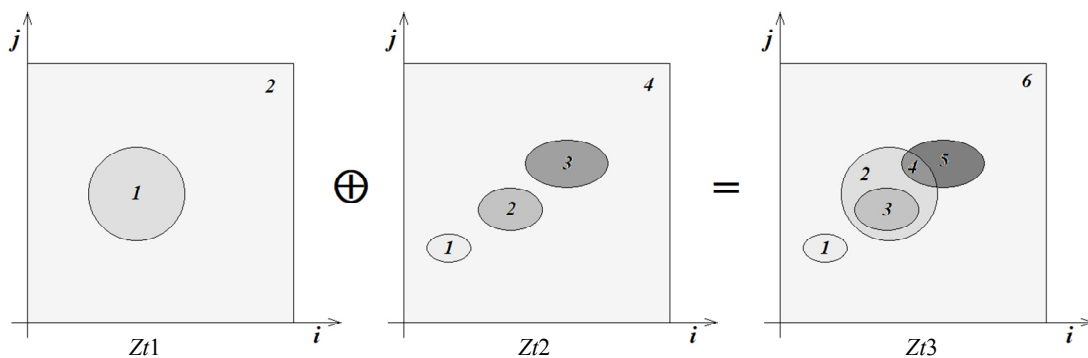


Рис. 3. Пример сложения зональных классификаций описательной размерности 2

1. Классификации  $Zt1$ ,  $Zt2$ ,  $Zt3$  имеют одинаковые наборы описательных и зонального классификационных признаков  $K$ , (в общем случае  $\dim(Zt1) = m$ ,  $\dim(Zt2) = n$ ,  $\dim(Zt3) = m$ ,  $m \geq n \geq 2$ ,  $Zt1$  – основная классификация,  $Zt2$  – присоединяемая классификация).

2. Для любой допустимой области интерпретации  $A$   $\partial A|Zt3 = \partial A|Zt1 \cup \partial A|Zt2$ .

3. В классификации  $Zt3 = Zt1 \oplus_z Zt2$  присутствуют все значения классификационных признаков классификаций  $Zt1$  и  $Zt2$  и добавляются новые значения целевого классификационного признака, соответствующие пересечениям зон  $Zt1$  с зонами  $Zt2$ .

Сложение зональных классификаций коммутативно и ассоциативно. Визуально сложение зональных классификаций подобно их наложению друг на друга и заключается во введении новых значений классификационных признаков.

Назовем произведением зональных классификаций  $Zt1$  и  $Zt2$  зональную классификацию  $Zt3 = Zt1 \otimes_z Zt2$ , удовлетворяющую условиям рис. 4.

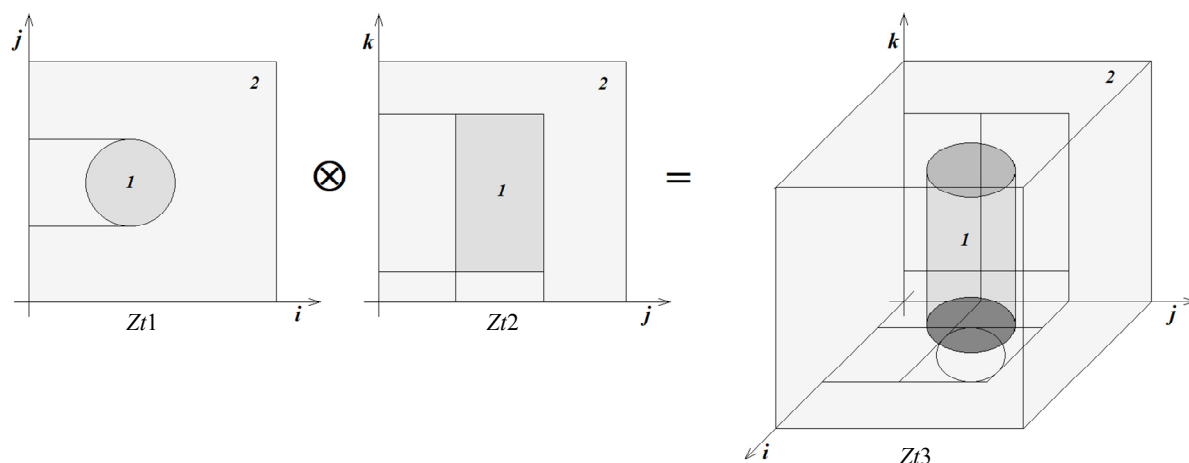


Рис. 4. Пример умножения зональных классификаций размерности 2 с одним общим описательным классификационным признаком

С точностью до наименования, в классификации  $Z_{t1}$  есть описательные классификационные признаки, отсутствующие в  $Z_{t2}$ , в классификации  $Z_{t2}$  есть признаки, отсутствующие в  $Z_{t1}$ , в классификации  $Z_{t3}$  есть все признаки, присутствующие в  $Z_{t1}$  или в  $Z_{t2}$ :  $\{K_1 = \text{Ker}(Z_{t1}), K_2 = \text{Ker}(Z_{t2}), K_3 = \text{Ker}(Z_{t3}), K_1 \setminus K_2 \neq \emptyset, K_2 \setminus K_1 \neq \emptyset, K_3 = K_1 \cup K_2\}$ .

Если  $K_4 = K_1 \cap K_2$ , классификационный признак  $K_i \in K_3$ , но  $K_i \notin K_4$ , то разбиение по признаку  $K_i$  проводится в соответствии с той классификацией, которой этот признак принадлежит.

Если  $K_i \in K_4 = K_1 \cap K_2$ , то разбиение проводится по правилам суммирования для зональных классификаций.

Произведение зональных классификаций аналогично произведениям матричных и ленточных классификаций и заключается во введении в исходную классификацию новых описательных классификационных признаков, что визуально подобно введению новых осей измерений в пространстве классификационных признаков. Произведение зональных классификаций коммутативно с точностью до изоморфного соответствия результирующих зон, ассоциативно и дистрибутивно по сложению.

Могут быть введены операции *вычитания* и *деления* зональных классификаций. Вычитание заключается в удалении из уменьшаемой классификации зон, присутствующих в вычитаемой классификации, если таковые имеются. Деление – удаление из классификации-делимого описательных классификационных признаков классификации-делителя, если таковые имеются, уменьшение размерности пространства классификационных признаков.

Две зональные классификации  $Z_{t1}$  и  $Z_{t2}$  являются *равными*:  $Z_{t1} = Z_{t2}$ , если у них в пространстве описательных классификационных признаков совпадают границы ( $\partial A|Z_{t1} = \partial A|Z_{t2}$ ) и разбиение на зоны с точностью до нумерации/наименования целевых значений (которые могут не совпадать). Назовем классификацию  $Z_{t2}$  *разбиением* классификации  $Z_{t1}$ , если  $\partial A|Z_{t1} \subset \partial A|Z_{t2}$ . При этом  $Z_{t1}$  является *сборкой* классификации  $Z_{t2}$ . При сборке зональной классификации происходит *объединение* двух и более зон в одну.

В процессе введения зональной классификации существующих технических объектов может потребоваться выполнение расчетов с применением методов оптимизации. При выборе зоны для планируемого к реализации технического объекта нужно определиться с совокупностью и приоритетностью оцениваемых параметров, с планируемыми значениями этих параметров, с вводимыми ограничениями, с действиями в случаях, если не подходит ни одна из зон или подходят несколько зон. В целом процедура и результаты выбора являются нечеткими [6].

#### **Формализованные свойства зональной классификации.**

**Теорема 1 ( $Z_t$ ).** Зональная классификация проводится не по отдельным классификационным признакам и их значениям, а по их совокупности.

**Теорема 2 ( $Z_t$ ).** Удаление или введение новых (описательных) классификационных признаков зональной классификации может изменить классификацию области интерпретации по другим классификационным признакам.

*Теорема 3 (Zt).* Удаление или введение новых содержательных значений классификационных признаков зональной классификации (новой зоны) может изменить классификацию области интерпретации по другим содержательным значениям и наполнение значения признака «иное».

*Теорема 4 (Zt).* Результаты операций над зональными классификациями являются нечеткими.

**Сфера применения зональных классификаторов.** Данные классификаторы широко применяются в репрезентативных целях ввиду своей наглядности [4, 5].

**Модифицированные комбинированные классификаторы: циклы**

**Понятие, структура, размерность циклической классификации.** Цикличность – повторение идентичных (равных или подобных) элементов. Повторение может происходить во времени, в геометрическом пространстве, в пространстве иных физических величин (температура, давление, сила тока и др.), в технологическом поле.

Для всех ранее рассмотренных классификаторов ядро классификатора формируется введением классификационных признаков и их значений. Для зональных классификаций мы назвали такие признаки описательными. Для циклов эти признаки могут присутствовать с сохранением метрики, присутствовать в качественном выражении или отсутствовать. Но для всех циклов определено понятие *стадий* цикла, ядро классификатора формируется в том числе при разбиении цикла на стадии. Стадия – законченный этап, ограниченный маркерами начала и конца. Стадийность цикла выступает как классификационный признак. Ядро циклической классификации –  $\text{Ker}(Zt) = K_1 \otimes_L K_2 \otimes_L \dots \otimes_L K_n \otimes_C K_{n+1} = K$ , где  $\otimes_L$  – умножение в формате ленточной (или матричной) классификации, введение описательного классификационного признака;  $\otimes_C$  – умножение в циклической классификации, введение стадийного классификационного признака,  $n \geq 1$ .

Назовем минимальную совокупность и последовательность стадий, полностью характеризующих цикл и повторяемых без изменений *единичным актом цикла*. Одна стадия может повторяться в одном акте цикла более одного раза. Одно- и двухстадийные циклы могут быть только без повторения стадий. На рис. 5 представлены схемы некоторых простейших циклов.

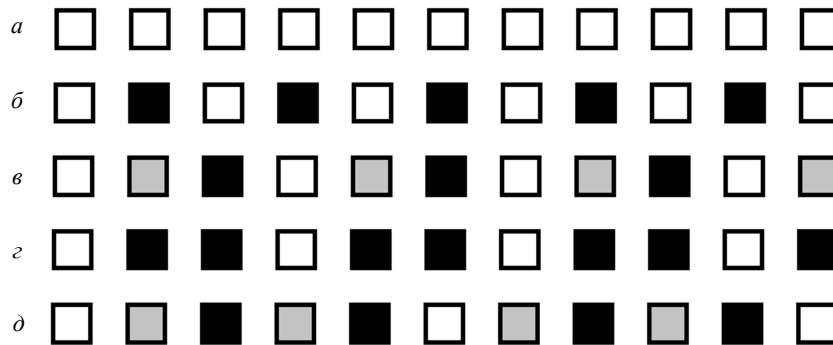


Рис. 5. Схемы некоторых простейших циклов: *a* – одностадийный (вырожденный); *b* – двухстадийный; *c* – трехстадийный без повторения стадий; *d* – трехстадийный с повторением стадий; *d* – пятистадийный с повторением стадий

Зачастую ограничиваются выделением трех стадий цикла: подготовка, основной процесс, завершение. В зависимости от того, разворачивается ли цикл в непрерывном или дискретном множестве (пространстве), одному акту цикла можно сопоставить ленточный *Ltn* или векторный *Vtn* классификатор соответственно, где *n* – количество стадий акта цикла,  $n \geq 1$ . Цикл можно представить в виде суперпозиции исходной классификации и векторной (вторичный вектор конечномерный или предельный бесконечномерный):  $Vtm \circ Ltn$ ,  $Vtm \circ Vtn$ ,  $Vt\infty \circ Ltn$ ,  $Vt\infty \circ Vtn$ , где *m* – количество актов цикла при конечном их повторении. Количество стадий *n* назовем внутренней *размерностью* цикла:  $\text{intdim}(Cl) = n$  (англ. *internal dimension* – внутренний размер); количество повторений (полных) актов цикла *m* (или  $\infty$  – бесконечность) – внешней *размерностью* цикла:  $\text{extdim}(Cl) = m$  (англ. *external dimension* – внешний размер); количество различных стадий  $k \leq n$  назовем сокращенной внутренней размерностью:  $\text{abintdim}(Cl) = k$  (англ. *abbreviated internal dimension* – сокращенный внутренний размер). Если после конечного повторения актов цикла осуществлено еще несколько начальных стадий, но цикл не завершен, назовем это раз-

мерностью остатка  $\text{resdim}(Cl) = r$  (англ. *residue* – остаток),  $0 \leq r \leq n-1$ . Количество описательных классификационных признаков назовем описательной размерностью:  $\text{desdim}(Cl) = p$  (англ. *description* – описание),  $p \geq 1$ .

Для циклов, схемы которых представлены на рис. 5:  $a$  –  $\text{intdim}(Cl) = \text{abintdim}(Cl) = 1$ ,  $\text{extdim}(Cl) = 11$ ,  $\text{resdim}(Cl) = 0$ ;  $b$  –  $\text{intdim}(Cl) = \text{abintdim}(Cl) = 2$ ,  $\text{extdim}(Cl) = 5$ ,  $\text{resdim}(Cl) = 1$ ;  $c$  –  $\text{intdim}(Cl) = \text{abintdim}(Cl) = \text{extdim}(Cl) = 3$ ,  $\text{resdim}(Cl) = 2$ ;  $d$  –  $\text{intdim}(Cl) = 3$ ,  $\text{abintdim}(Cl) = 2$ ,  $\text{extdim}(Cl) = 3$ ,  $\text{resdim}(Cl) = 2$ ;  $e$  –  $\text{intdim}(Cl) = 5$ ,  $\text{abintdim}(Cl) = 3$ ,  $\text{extdim}(Cl) = 2$ ,  $\text{resdim}(Cl) = 1$ .

Повторяемость совокупности и последовательности стадий цикла предполагает, что после осуществления одного акта цикла мы оказываемся в условиях, равных или подобных тем, что были до осуществления цикла. Это позволяет графически изображать один акт цикла в виде замкнутой кривой, а развертку цикла подобно синусоиде. Если одним из параметров цикла является величина, для которой введена метрика (например, физические величины время, расстояние, температура, сила тока и т. п.), можно ввести понятия *амплитуды* и *периода цикла*, циклы с угасанием/развитием по амплитуде, с замедлением/ускорением по периоду, равномерные циклы с неизменными периодом и амплитудой.

По характеру воздействия на надсистему можно выделить циклы *ресурсопреобразующие* и *ресурсопотребляющие*. Если в процессе цикла образуется (и отводится) некоторый продукт, будем называть такой цикл *продуктивным*. Продукты цикла можно разделить на *полезные продукты* и *отходы*. Если действия по восстановлению ресурса и по утилизации отходов включены в акт цикла, будем называть такой цикл *полным*.

Особой разновидностью являются *циклы с обратной связью* (рис. 6).

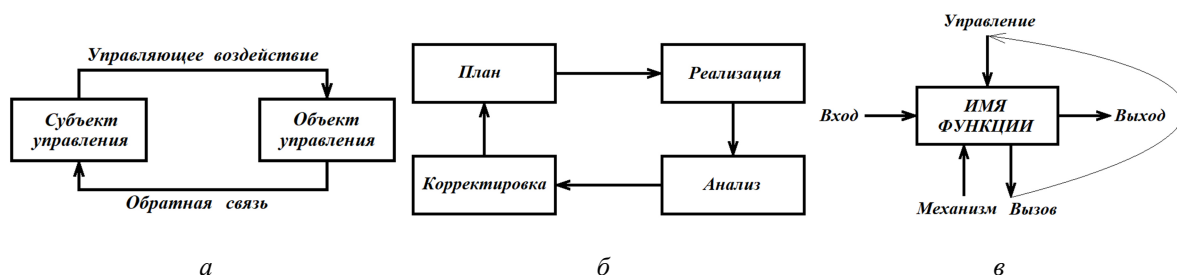


Рис. 6. Модели циклов с обратной связью:  $a$  – простейшая двухстадийная;  $b$  – четырехстадийная;  $c$  – функциональный блок с обратной связью

Согласно российским [7] и международным [8] стандартам, при моделировании бизнес-процессов применяют функциональные блоки с обратной связью (рис. 6,  $c$ ), вызов-запрос на обратную связь.

При разработке информационных систем, программного обеспечения, автоматизированных систем, где стадии цикла выделяют согласно [9–11], и при проектировании в других предметных областях применяют каскадные (последовательные) (рис. 7,  $a$ ), итерационные (рис. 7,  $b$ ) и спиральные (рис. 7,  $c$ ) модели [12].

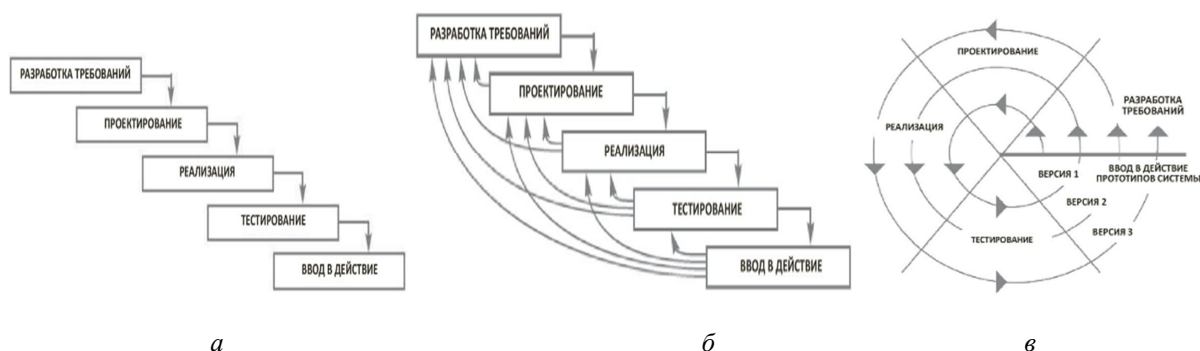


Рис. 7. Циклы проектирования:  $a$  – каскадный;  $b$  – итерационный;  $c$  – спиральный



Каскадная модель не имеет обратной связи, итерационная и спиральная предусматривают обратную связь. На рис. 5–7 описательные классификационные признаки не показаны, отражены только стадии цикла.

*Операции над циклическими классификациями: разбиение и объединение стадий, сложение, умножение, сравнение.* Со стадиями цикла можно проводить операции *разбиения и объединения*, которые являются унитарными по отношению к циклу в целом. Если цикл  $CL$  разбит на последовательные стадии  $st1, st2, \dots, stn$  (от англ. *stage* – стадия), то  $\text{Ker}(CL) = \{st1, st2, \dots, stn, K\}$ , где  $K$  – совокупность и структура описательных классификационных признаков и их значений. Разбиение стадии  $sti$  на  $j$  подстадий обозначим  $spl(sti) = \{sti1, sti2, \dots, stij\}$  (от англ. *splitting* – расщепление). При этом общее количество стадий в ядре цикла увеличивается на  $j - 1$ . Объединение стадий цикла от стадии  $i$  до стадии  $i + j$  в одну обозначим  $\text{assoc}(\{sti, st(i + 1), \dots, st(i + j)\}) = st(i, i + j)$  (от англ. *association* – объединение). При этом количество стадий в ядре цикла уменьшается на  $j$ . При объединении стадий производится *сборка* циклического классификатора.

При *формальном сложении циклов* (постадийно) после всех стадий первого цикла выполняются все стадии второго цикла, отсутствующие в первом цикле:  $CI3 = CI1 \oplus_{\text{form}} CI2$ . Полагаем, что складываемые циклы  $CI1$  и  $CI2$  разворачиваются в одном описательном пространстве, заданном признаками  $K$ , но с различным разбиением на стадии  $KC1$  и  $KC2$  соответственно,  $\text{Ker}(CI1) = K \otimes_{|C} KC1$ ,  $\text{Ker}(CI2) = K \otimes_{|C} KC2$ ,  $\text{Ker}(CI3) = K \otimes_{|C} (KC1 \oplus_{|C} KC2)$ . Такое сложение некоммутативно, но ассоциативно. *Формальное вычитание* есть удаление из стадий цикла-уменьшаемого стадий цикла-вычитаемого, если таковые имеются. При *формальном умножении циклов* (по описательным признакам)  $CI3 = CI1 \otimes_{\text{form}} CI2$  полагаем, что умножаемые циклы  $CI1$  и  $CI2$  разворачиваются в различных описательных пространствах  $K1$  и  $K2$  соответственно, но с одинаковым разбиением на стадии  $KC$ ,  $\text{Ker}(CI1) = K1 \otimes_{|C} KC$ ,  $\text{Ker}(CI2) = K2 \otimes_{|C} KC$ . Тогда при формальном умножении циклов разбиение на стадии не меняется, но можно наблюдать развитие цикла в пространстве описательных переменных большей размерности:  $\text{Ker}(CI3) = K1 \otimes_{|L} K2 \otimes_{|C} KC$ . Такое умножение коммутативно с точностью до перестановки описательных классификационных признаков циклов, ассоциативно и дистрибутивно по сложению циклов. *Формальное деление* есть удаление из описательных классификационных признаков цикла-делимого признаков цикла-делителя, если таковые имеются, уменьшение размерности пространства описательных признаков.

Если для цикла определены понятия диапазона изменений и периода, можно определить *фактическое сложение циклов* по общему метрическому параметру  $CI3 = CI1 \oplus_{\text{act}} CI2$  и *фактическое умножение циклов* при различных метрических параметрах  $CI3 = CI1 \otimes_{\text{act}} CI2$ , аналогично тому, как это было введено ранее для ленточных (матричных) классификаций. Такие операции будут коммутативными, ассоциативными и дистрибутивными. Они допускают введение обратных операций *фактического вычитания и деления*.

Равенство (сравнение) циклов также можно рассматривать формальное и фактическое. Будем говорить, что цикл  $CI1$  *формально равен* циклу  $CI2$ :  $CI1 = |_{\text{form}} CI2$ , если эти циклы имеют одинаковую структуру ядер:  $\text{Ker}(CI1) = \text{Ker}(CI2)$ . В этом случае между стадиями двух циклов можно установить взаимно однозначное соответствие. Будем говорить, что цикл  $CI1$  *фактически равен* циклу  $CI2$ :  $CI1 = |_{\text{act}} CI2$ , если эти циклы формально равны, разворачиваются в одинаковых пространствах описательных переменных  $K1 = K2$  и имеют одинаковый контекст разбиения на стадии  $KC1 = KC2$  с учетом содержания областей интерпретации.

**Этапы циклической классификации.** Первый этап циклической классификации – четкое разграничение стадий путем введения маркеров начала и окончания каждой конкретной стадии. Маркером может быть время, техническое состояние объекта, количество выпускаемой продукции и т. п. Второй этап – определение содержательного наполнения стадий цикла с учетом области интерпретации: какие виды деятельности соответствуют каждой стадии, параметры видов деятельности (например, температуры, давления, расходы сред). Третий этап – применение классификатора к области интерпретации (предметной области) для установления соответствия между элементами области интерпретации (например, видами оборудования) и стадиями цикла. Предварительно элементы области интерпретации должны быть маркированы в соответствии с совокупностью и значениями описательных классификационных признаков. При этом один элемент может соответствовать одной или нескольким стадиям или не соответствовать ни од-

ной стадии. Четвертый этап циклической классификации – принятие решения о выборе элементов предметной области. Возможные ситуации: каждой стадии соответствует один элемент; имеются стадии, которым соответствует более одного элемента; имеются элементы, которые соответствуют более чем одной стадии; имеются стадии, которым не соответствует ни один элемент. В первом случае задача циклической классификации для рассматриваемой предметной области решена. Во втором случае расширяется перечень параметров элементов и повторяется выбор. В третьем случае, возможно, предпочтение следует отдавать элементам, соответствующим большему количеству стадий. В четвертом случае следует вернуться ко второму этапу классификации и уточнить параметры наполнения стадий цикла, а затем снова повторить третий и четвертый этапы или принять решение о невозможности реализации цикла в данной предметной области.

**Формализованные свойства циклической классификации.** Можно выделить два альтернативных подхода к циклической классификации, каждый из которых имеет 2 модификации. В отличие от всех ранее рассмотренных классификаторов данные подходы вводятся аксиоматически. Все ранее рассмотренные классификации относятся в первую очередь к материальным объектам, но могут характеризовать и технические процессы. Цикл – это в первую очередь процесс (многократного повторения), условия, способы, критерии осуществления которого определяются ЛПР на начальном этапе проектирования.

Первый подход.

*Аксиома 1 I (CI).* Содержательное наполнение стадий цикла проводится независимо для каждой стадии.

*Аксиома 2 I (CI).* Циклическая классификация области интерпретации проводится независимо для каждой стадии.

*Аксиома 3 I (CI).* Разбиение или объединение стадий цикла не влияет на содержательное наполнение других стадий, не смежных с изменяемыми.

*Аксиома 4 I (CI).* Разбиение или объединение стадий цикла не меняет классификацию области интерпретации для других стадий, не смежных с изменяемыми.

Второй подход.

*Аксиома 1 II (CI).* Содержательное наполнение стадий цикла распределяется для всего комплекса стадий взаимосвязанно.

*Аксиома 2 II (CI).* Циклическая классификация области интерпретации проводится для всего комплекса стадий взаимосвязанно.

*Аксиома 3 II (CI).* Любое преобразование стадий цикла влияет на содержательное наполнение всех стадий.

*Аксиома 4 II (CI).* Любое преобразование стадий цикла влияет на классификацию области интерпретации для всех стадий.

Модификации задаются добавлением к выбранному набору четырех аксиом *I (CI)* или *II (CI)* одной из двух нижеследующих аксиом.

*Аксиома 5 А (CI).* Результаты операций над стадиями цикла (разбиение, объединение, содержательное наполнение) являются строго определенными.

*Аксиома 5 Б (CI).* Результаты операций над стадиями цикла (разбиение, объединение, содержательное наполнение) являются нечеткими.

**Сфера применения циклических классификаторов.** Данные классификаторы применяются при описании, моделировании, прогнозировании экономических, управленческих и технологических процессов [7–13]. На рис. 8 представлена технологическая схема ТЭЦ как разновидность цикла [13].

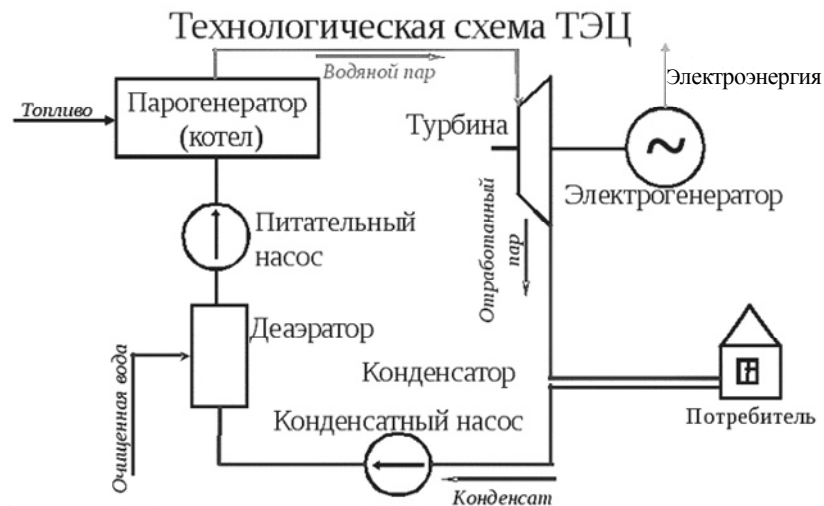


Рис. 8. Технологическая схема ТЭЦ

На этой схеме можно выделить вложенные циклы: топливно-энергетический (топливо – парогенератор – турбина – электрогенератор – электроэнергия), теплоснабжения потребителей (отработанный пар – потребитель – конденсат), пароводяной (очищенная вода – деаэратор – парогенератор – водяной пар – турбина – отработанный пар – конденсатор – конденсат – конденсатный насос).

### Заключение

В данной работе рассмотрены сложные типы классификаторов – комбинированные иерархо-матричные и иные, предельные комбинированные зональные, модифицированные комбинированные циклические, – которые широко применяются в практике описания и планирования технических энергетических систем и процессов. Определены понятие, структура и размерность данных классификаторов. Введены операции над классификаторами: сложение/вычитание, умножение/деление, сравнение. Особенностью зональных и циклических классификаторов является наличие целевого классификационного признака – обобщенной характеристики для градации зон или критерия принадлежности к определенной стадии цикла. Для этих классификаторов могут быть введены новые операции – разбиение/объединение зон/стадий цикла. Представлены формализованные свойства зональных и циклических классификаторов. Для данных классификаций могут не соблюдаться требования полноты, независимости. Отнесение объекта области интерпретации к определенной зоне или стадии цикла зависит от совокупности значений нескольких (многих) параметров, которые могут меняться. Поэтому решение задач классификации с применением сложных классификаторов может быть нечетким. Определены возможные сферы применения комбинированных, зональных и циклических классификаторов.

Отличие предлагаемого в данной работе подхода к классификации от существующих заключается в более полном учете структуры и свойств объектов области интерпретации и целевого назначения результатов классификации. Широкий спектр классификаторов, упорядоченных с позиции единой формальной теории классификации, позволит повысить степень адекватности классификатора свойствам объектов области интерпретации. Новизна проделанной работы заключается в описании структуры, свойств и особенностей сложных классификаторов и операций с классификаторами. Практическая значимость заключается в создании предпосылок для последующей алгоритмизации операций по преобразованию сложных классификаторов, в частности классификаторов процессов. Предлагаемый подход может быть использован при разработке стандартов, моделировании, планировании экономических, технологических и управленческих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сточные воды ТЭС*. PowerPoint presentations online. URL: <https://en.ppt-online.org/83519> (дата обращения: 22.12.2020).
2. *ГОСТ 24278-2016*. Установки турбинные паровые стационарные для привода электрических генераторов ТЭС. Общие технические требования (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.
3. *ГОСТ Р 8.905-2015*. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Манометры показывающие. Рабочие средства измерений. Метрологические требования и методы испытаний (Переиздание). М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
4. *Грасис*: официальный сайт компании. URL: <https://www.grasys.ru> (дата обращения: 22.12.2020).
5. *Левин Б. И.* Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
6. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.
7. *Р 50.1.028-2001*. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Госстандарт России, 2003. 50 с.
8. *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).
9. *ГОСТ 34.601-90*. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. М.: Стандартинформ, 2009. 6 с.
10. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010*. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. М.: Росстандарт, 2012. 160 с.
11. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-99*. Информационная технология (ИТ). Процессы жизненного цикла программных средств. М.: Госстандарт России, 2003. 42 с.
12. *Модели* жизненного цикла. Каноническое и типовое проектирование ИС. PowerPoint presentations online. URL: <https://ppt-online.org/460516> (дата обращения: 22.12.2020).
13. *Тепловые* электрические станции традиционной энергетики. Гидроэлектростанции. PowerPoint presentations online. URL: <https://en.ppt-online.org/28551> (дата обращения: 22.12.2020).

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](mailto:fedorovanv61@rambler.ru).



**COMPLEX CLASSIFIERS OF FORMAL CLASSIFICATION THEORY OF TECHNICAL SYSTEMS: HIERARCHO-MATRIX, ZONE, CYCLIC**

***N. V. Fedorova***

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

**Abstract.** The article highlights the different aspects of complex technical systems that can be ordered and classified in accordance with the totality, structure and values of the attributes characterizing these systems by a unified approach to various types of classifications. The most complex classifiers studied in this work are hierarchical-matrix, cyclic and zonal classifiers. Zones are the areas identified in the space of classification attributes that characterized by a simi-

lar value of an additional target classification attribute. The dimension of the zonal classification is equal to the number of descriptive classification attributes, the zonal dimension is equal to the number of zones. Adding the zones is carried out according to the target classification criterion, multiplying the zones consists in introducing the new descriptive classification attributes. Cyclicity is repetition of the similar elements that occurs in the space of physical quantities or other parameters. The concept of cycle stages is defined for all cycles, which is a specific (target) classification attribute. The internal dimension of the cycle is equal to the number of stages, the external dimension is equal to the number of acts of the cycle, the descriptive dimension is equal to the number of descriptive classification attributes. Addition of cycles can be carried out both by stages and by descriptive features and consists in increasing the number of values of classification attribute. Multiplication of cycles consists in the introduction of new descriptive classification attributes. Zonal and cyclic classifiers are widely used in the practice of describing and planning technical energy systems. A wide range of classifiers ordered from the standpoint of a unified formal theory of classification will take into account the features of specific technical systems, the conditions for the objects functioning, the context of the interpretation area. As a result, the degree of adequacy of classifiers to the diversity of the interpretation area objects and the representativeness of models based on classifiers will increase.

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

**For citation:** Fedorova N. V. Complex classifiers of formal classification theory of technical systems: hierarcho-matrix, zone, cyclic. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;4:7-20. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-7-20

#### REFERENCES

1. *Stochnye vody TES. PowerPoint presentations online* [Waste waters of thermal electric station. PowerPoint presentations online]. Available at: <https://en.ppt-online.org/83519> (accessed: 22.12.2020).
2. GOST 24278-2016. *Ustanovki turbinnye parovye statsionarnye dlia privoda elektricheskikh generatorov TES. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia (s Popravkoi)* [GOST 24278-2016. Stationary steam turbine installations for driving electric generators of thermal power plants. General technical requirements (with amendment)]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 23 p.
3. GOST R 8.905-2015. *Gosudarstvennaia sistema obespecheniia edinstva izmerenii (GSI). Manometry pokazyvaiushchie. Rabochie sredstva izmerenii. Metrologicheskie trebovaniia i metody ispytanii (Pereizdanie)* [GOST R 8.905-2015. State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Indicating manometers. Working measuring instruments. Metrological requirements and test methods (Reissue)]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 p.
4. *Grasis: oftsial'nyi sait kompanii* [Grasys: official website of company]. Available at: <https://www.grasys.ru> (accessed: 22.12.2020).
5. Levin B. I. *Ispol'zovanie tverdykh bytovykh otkhodov v sistemakh energosnabzheniia* [Using solid household wastes in power supply systems]. Moscow, Energoizdat, 1982. 224 p.
6. Zade L. *Poniatie lingvisticheskoi peremnoi i ego primenie k priniatiu priblizhennykh reshenii* [Concept of linguistic variable and its application to adoption of approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976. 167 p.
7. 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 Publ., 2003. 50 p.
8. *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).
9. GOST 34.601-90. *Informatsionnaia tekhnologiia. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniia* [GOST 34.601-90. Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of creation]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 6 p.
10. GOST R ISO/MEK 12207-2010. *Informatsionnaia tekhnologiia. Sistemnaia i programmnaia inzheneriia. Protsessy zhiznennogo tsikla programmykh sredstv* [GOST R ISO / IEC 12207-2010. Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes]. Moscow, Rosstandart Publ., 2012. 160 p.
11. GOST R ISO/MEK 12207-99. *Informatsionnaia tekhnologiia (IT). Protsessy zhiznennogo tsikla programmykh sredstv* [GOST R ISO / IEC 12207-99. Information technology (IT). Software life cycle processes]. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 2003. 42 p.

12. *Modeli zhiznennogo tsikla. Kanonicheskoe i tipovoe proektirovanie IS. PowerPoint presentations online* [Life cycle models. Canonical and typical IC design. PowerPoint presentations online]. Available at: <https://ppt-online.org/460516> (accessed: 22.12.2020).

13. *Teplovye elektricheskie stantsii traditsionnoi energetiki. Gidroelektrostantsii. PowerPoint presentations online* [Thermal power plants of traditional energy. Hydroelectric power plants. PowerPoint presentations online]. Available at: <https://en.ppt-online.org/28551> (accessed: 22.12.2020).

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](mailto:fedorovanv61@rambler.ru).

