

Вестник Череповецкого государственного университета. 2024. № 5 (122). С. 18–30.  
Cherepovets State University Bulletin, 2024, no. 5 (122), pp. 18–30.

Научная статья  
УДК 004.942, 303.72  
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-5-122-2>  
EDN: OGERCD

## Представление результатов теоретико-множественного анализа сложной системы

Иван Сергеевич Бондарев<sup>1✉</sup>, Сергей Алексеевич Гаврицков<sup>2</sup>,  
Оксана Сергеевна Логунова<sup>3✉</sup>, Михаил Юрьевич Наркевич<sup>4</sup>,  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова,  
Магнитогорск, Россия,  
<sup>1✉</sup>[ivanbond1998@mail.ru](mailto:ivanbond1998@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>  
<sup>2</sup>[zlatokuznec@mail.ru](mailto:zlatokuznec@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8648-2228>  
<sup>3✉</sup>[logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>  
<sup>4</sup>[my.narkevich@magtu.ru](mailto:my.narkevich@magtu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

**Аннотация.** Статья посвящена применению теоретико-множественного анализа для исследования сложных систем. Рассматривается представление системы как математического множества, определение основных понятий: структуры системы, ее элементов. Результатом теоретико-множественного анализа является модель системы, представленная в виде записи на математическом языке множеств, которая преобразуется в виде сетевой структуры, гиперкуба. Рассмотрены этапы формирования структуры системы и формирование таблиц с номенклатурами элементов, свойств и параметров. Поэтапно описан процесс создания разверток системы.

**Ключевые слова:** теоретико-множественный анализ, сложные системы, системный анализ, подсистемы, взаимодействие подсистем, сетевая модель, развертка

**Для цитирования:** Бондарев И. С., Гаврицков С. А., Логунов О. С., Наркевич М. Ю. Представление результатов теоретико-множественного анализа сложной системы // Вестник Череповецкого государственного университета. 2024. № 5 (122). С. 18–30.  
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-5-122-2>

## Presenting the results of a set-theoretic analysis of a complex system

Ivan S. Bondarev<sup>1✉</sup>, Sergey A. Gavritskov<sup>2</sup>,  
Oksana S. Logunova<sup>3✉</sup>, Mikhail Yu. Narkevich<sup>4</sup>,

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russia,

<sup>1✉</sup>ivanbond1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>

<sup>2</sup>zlatokuznec@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8648-2228>

<sup>3✉</sup>logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

<sup>4</sup>my.narkevich@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

**Abstract.** The article considers the application of a set-theoretic analysis to the study of complex systems. It considers the representation of the system as a mathematical set, the definition of basic concepts: the structure of the system, its elements. The result of the set-theoretic analysis is a model of the system represented as a record in the mathematical language of sets, which is transformed in the form of a network structure, hypercube. The authors examine the stages of the system structure formation and formation of tables with nomenclatures of elements, properties and parameters. The process of creating the system sweeps is described step by step.

**Keywords:** set-theoretic analysis, complex systems, system analysis, subsystems, subsystem interaction, network model, deployment

**For citation:** Bondarev I. S., Gavritskov S. A., Logunova O. S., Narkevich M. Yu. Presenting the results of a set-theoretic analysis of a complex system. *Cherepovets State University Bulletin*, 2024, no. 5 (122), pp. 18–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-5-122-2>

### Введение

В современном мире теоретико-множественный анализ играет ключевую роль в понимании и описании сложных систем (систем, состоящих из множества взаимодействующих составляющих, подсистем). Одним из основных результатов такого анализа является представление системы в виде математической записи, которая определяет множества и их отношения. Подобная запись позволяет описать структуру системы, ее составные элементы, а также связи между ними.

Задачи, связанные с анализом сложных систем, возникают в самых разных областях, от экономики и социологии до биологии и физики. Сложные системы обладают множеством свойств, которые делают их анализ трудным и многообразным. Теория игр, линейное программирование и другие методы анализа применимы только к определенным типам сложных систем. Теоретико-множественный анализ предлагает новый подход к анализу сложных систем. Этот подход основан на представлении системы в виде математических множеств и исследовании их структуры, элементов и взаимодействий.

Важность исследования теоретико-множественных методов анализа сложных систем обусловлена их универсальностью и возможностью применения к широкому кругу задач. В отличие от других методов, теоретико-множественные методы не ограничены определенными типами систем и могут быть использованы для анализа

любых сложных систем. Это делает их особенно актуальными для междисциплинарных исследований<sup>1</sup>.

Теоретико-множественный подход к анализу систем имеет глубокие корни в математике и логике, но его применение в контексте сложных систем относительно ново. Несмотря на то, что существуют некоторые методы, основанные на теоретико-множественном подходе, они не получили широкого распространения и требуют дальнейшего изучения и развития.

Основная цель исследования – повысить достоверность информации о структуре сложных систем на основе представления результатов теоретико-множественного анализа.

Для достижения данной цели решены следующие задачи: определение понятия структуры системы, формирование представления сложной системы в виде гиперкуба и его элементов.

## Основная часть

### Представление структуры системы

Результатом теоретико-множественного анализа является модель системы, представленная в виде записи на математическом языке множеств. Для построения этой записи необходимо определить понятия структуры системы и ее элементов.

Структура системы – это устойчивость, упорядоченность в пространстве и времени элементов системы и связей между ними.<sup>2</sup>

Простой элемент системы – простейшая, неделимая часть системы. Дополним определение элемента, под элементом будем понимать предельный результат деления системы, обладающий важными свойствами в понимании субъекта, выполнения определенной задачи или достижения цели.

В процессе системного анализа сложную систему можно разделить на составляющие несколькими методами, которые определяются конкретной задачей, целями и условиями исследования. При необходимости субъект может изменять принцип разбиения, декомпозиции, выделять другие элементы и получать с помощью нового разбиения более адекватное, с его точки зрения, представление об анализируемом объекте или проблемной ситуации<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Аркулис М. Б., Сагадатов А. И., Климов С. С., Кабанова В. В., Николаев А. А., Дерябин Д. И. Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества опасных производственных объектов на металлургическом предприятии: структура и алгоритмы // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 5 (110). С. 29–48. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3> EDN ELUMKD; Логунова О. С., Арефьева Д. Я., Сухов Д. А., Гладышева М. М., Торчинский В. Е. Научные публикационные коллаборации: структурирование и визуализация информации // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. № 5 (92). С. 22–41. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-5-92-2> EDN: LMGUHT

<sup>2</sup> Вдовин В. М., Суркова Л. Е., Валентинов В. А. Теория систем и системный анализ. Москва: Дашков и К, 2018. 644 с.

<sup>3</sup> Там же.

При многоуровневом разбиении сложной системы часто ее делят на подсистемы, ориентируясь на обобщенные свойства системы и связи.

Подсистема – это обособленная, автономная часть системы, которая обладает функциональностью и свойствами системы, но в то же время имеет свою специфическую цель и задачи. Она также характеризуется такими свойствами, как структурная завершенность, взаимосвязь компонентов и внутренняя организация<sup>1</sup>.

Если части системы не обладают такими свойствами, то вводятся новые понятия. *Компоненты* – совокупности однородных элементов. *Конгломерат* – совокупность компонент.

Система объекта определяется через набор выбранных для наблюдения свойств. Описание системы включает следующие действия: выбор переменных, параметров и канала наблюдения.

Для каждого свойства объекта выбирается переменная, которая суммирует изменение проявлений этого свойства. Набору наблюдаемых проявлений свойства соответствует набор значений этой переменной<sup>2</sup>.

В результате любая сложная система может быть представлена в виде гиперкуба, в котором введены координаты: элементы системы, свойства элементов и параметры.

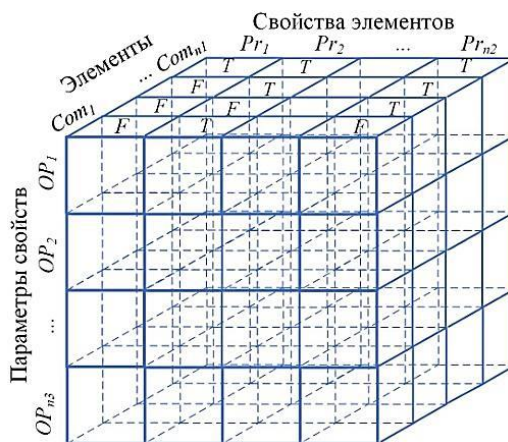


Рис. 1. Структурно-параметрическая схема системы:

$Com_1, Com_2, \dots$  – компоненты системы;  $Pr_1, Pr_2, \dots$  – свойства компонент системы;  
 $OP_1, OP_2, \dots$  – значения параметров свойств для компонент системы;  $n_1$  – количество компонент;  $n_2$  – количество свойств у компонент системы;  $n_3$  – количество параметров для свойств компонент системы;  $T$  – true;  $F$  – false

<sup>1</sup> Волкова В. Н., Денисов А. А. Теория систем и системный анализ. Москва: Юрайт, 2024. 562 с.

<sup>2</sup> Маторин С. И. Теория систем и системный анализ. Москва: Директ-Медиа, 2019. 508 с.

Формально система может быть представлена в виде множества:

$$S = \left\{ Com_i \left\{ Pr_{ij} \left\{ Op_{ijk} \right\} \right\} \right\} \rightarrow \{ St_l \}, \quad (1)$$

где  $S$  – множество, определяющее систему как заданную структуру;  $\{Com_i\}$  – множество элементов системы, включая подсистемы, компоненты и конгломераты,  $i = \overline{1; N}$ ;  $N$  – количество элементов системы;  $\{Pr_{ij}\}$  – множество свойств каждого элемента системы,  $j = \overline{1; N_j}$ ;  $N_j$  – количество свойств у  $i$ -го элемента системы;  $\{Op_{ijk}\}$  – множество параметров, определяющих свойства элемента  $Pr_{ij}$ ,  $k = \overline{1; N_k}$ ;  $N_k$  – количество параметров для свойства  $Pr_{ij}$ ;  $\{St_l\}$  – множество состояний системы, определенное комбинацией параметров для свойств каждого элемента.

Построение гиперкуба начинается с определения его развертки. Развертка гиперкуба – это три поверхности (Элементы – Свойства); (Свойства – Параметры); (Элементы – Параметры) (см. рис. 2).

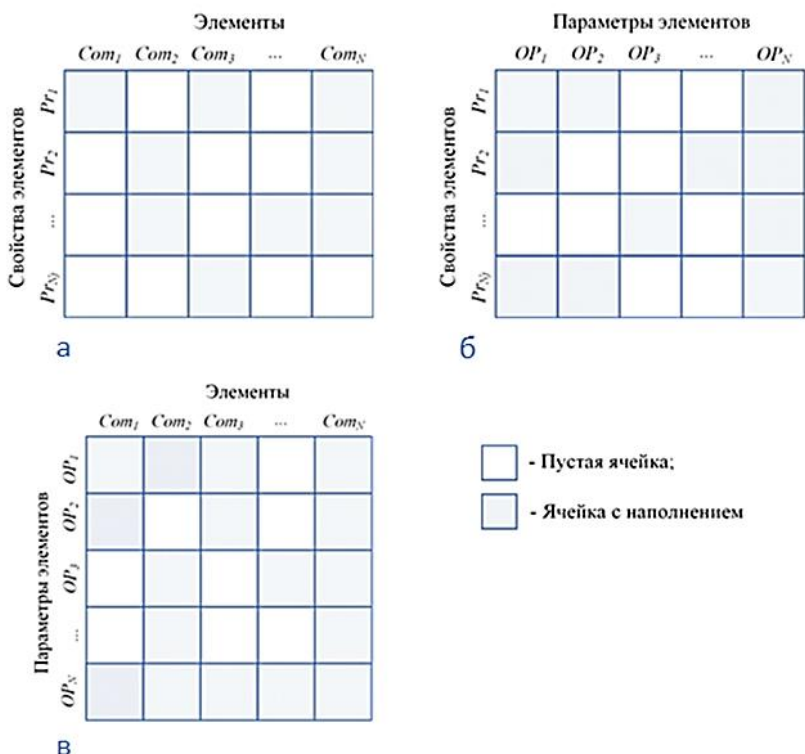


Рис. 2. Развертки гиперкуба системы: а – поверхность (Элемент → Свойство); б – поверхность (Свойства → Параметры); в – поверхность (Элемент → Параметры)

В аналитической записи каждой развертки появляется необходимость указания заполнения ячейки. Для этой цели достаточно ввести справочник типов данных *Type*, который может хранить каждая ячейка: простой элемент – 1; компонент – 2; конгломерат – 3; подсистема – 4; 0 – пустота ячейки.

Величины  $N, N_j, N_k$  формируют размерность гиперкуба для представления системы. При наличии такого справочника аналитическая запись развертки примет вид:

– развертка в плоскости (Элемент  $\rightarrow$  Свойство):

$$R_1 = \{Com_i(Type) \cdot \{Pr_{ij}\}\}, \quad i = \overline{1; N}, \quad j = \overline{1; N_j}; \quad (2)$$

– развертка в плоскости (Элемент  $\rightarrow$  Параметр):

$$R_3 = \{Com_i(Type) \cdot \{Op_{ik}\}\}, \quad i = \overline{1; N}, \quad k = \overline{1; N_k}, \quad (3)$$

где *Type* – тип данных для хранения в ячейке указанной развертки.

Разбиение составных частей системы на четыре вида: элементы, компоненты, конгломераты и подсистемы (см. определения выше) – обусловлено развитием типов данных при проектировании и разработке программных продуктов для имитационного моделирования и создания цифровых двойников систем. Эволюция составных частей системы приведена на рис. 3.

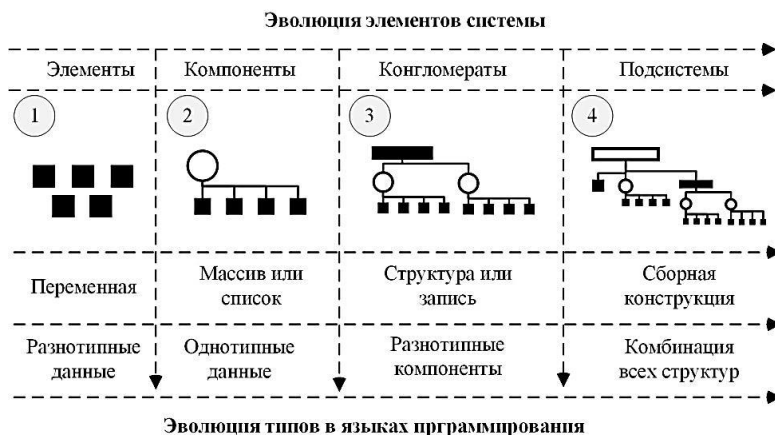


Рис. 3. Схема эволюции элементов системы и типов данных

Если в ячейках развертки системы рассматриваются только простые элементы, то достаточно задать развертки  $R_1$  и  $R_2$ . Развертка  $R_3$  может быть получена как произведение матриц:

$$R_3 = R_2^T \times R_1.$$

Каждый элемент такой развертки будет показывать количество параметров у каждого элемента системы.

**Например.** Пусть для описания системы заданы две развертки с помощью матриц:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

тогда третья развертка согласно (4) примет вид:

$$R_3 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Если хотя бы один из элементов системы является компонентом, конгломератом или сборной конструкцией, то формула (4) теряет смысл. В этом случае для построения развертки  $R_3$  требуется использовать *метод консолидации и расщепления разверток*.

**Пример.** Пусть развертки  $R_1$  и  $R_2$  представлены в виде таблиц. Требуется отобразить траекторию построения развертки  $R_2$ .

**Шаг 1.** Построение и разметка исходных разверток (см. рис. 4).

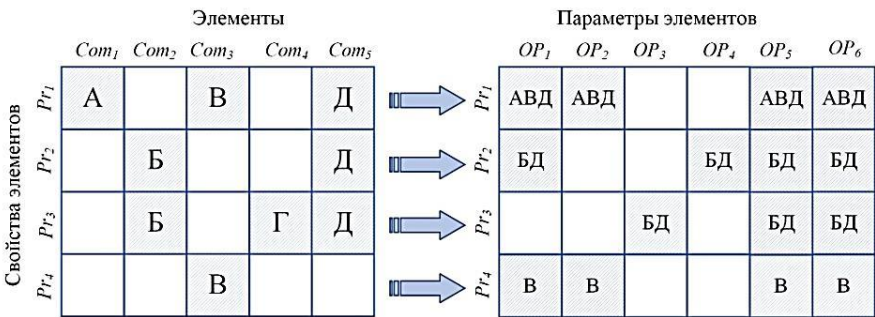


Рис. 4. Разметка разверток по элементам и свойствам

На первом шаге построения развертки происходит разметка параметров по ячейкам системы. При этом наблюдается повторение параметров каждого свойства для нескольких ячеек. При этом можно записать первый уровень развертки по ячейкам и свойствам (см. таблицу).

Таблица

**Множественный состав разверток элементов и свойств**

| По ячейкам (по столбцам $R_1$ )          | По свойствам (по строкам $R_2$ )              |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $R_1^1 = \{Com_1 \{Pr_1\}\}$             | $R_2^1 = \{PR_1 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}\}$ |
| $R_1^2 = \{Com_2 \{Pr_2, Pr_3\}\}$       | $R_2^1 = \{PR_2 \{Op_1, Op_4, Op_5, Op_6\}\}$ |
| $R_1^3 = \{Com_3 \{Pr_2, Pr_4\}\}$       | $R_2^1 = \{PR_3 \{Op_3, Op_5, Op_6\}\}$       |
| $R_1^4 = \{Com_4 \{Pr_4\}\}$             | $R_4^1 = \{PR_4 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}\}$ |
| $R_1^5 = \{Com_5 \{Pr_1, Pr_2, Pr_3\}\}$ |                                               |

На Шаге 1 происходит консолидация элементов, свойств и параметров.

**Шаг 2.** Расщепление в новую развертку элементов и параметров.

На рис. 5 показана траектория расщепления параметров по элементам системы. При этом образуются пучки расщепления от одной ячейки развертки  $R_2$  в развертку  $R_3$ .

Множественная запись разверток по элементам и параметрам примет вид:

$$\begin{aligned}
 R_3^1 &= \{Com_1 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}\}, \\
 R_3^2 &= \{Com_2 \{Pr_2 \{Op_1, Op_4, Op_5, Op_6\}, Pr_3 \{Op_3, Op_5, Op_6\}\}\}, \\
 R_1^3 &= \{Com_3 \{Pr_2 \{Op_1, Op_4, Op_5, Op_6\}, Pr_4 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}\}\}, \\
 R_1^4 &= \{Com_4 \{Pr_4 \{PR_4 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}\}\}\}, \\
 R_1^5 &= \{Com_5 \{Pr_1 \{Op_1, Op_2, Op_5, Op_6\}, Pr_2 \{Op_1, Op_4, Op_5, Op_6\}, Pr_3 \{Op_3, Op_5, Op_6\}\}\}.
 \end{aligned}$$

Объединение разверток  $R_3^1$ ,  $R_3^2$ ,  $R_1^3$  и  $R_1^5$  определяет структуру исходной системы:

$$S = \{R_1, R_2, R_3\} = R_1 \cap R_2 \cap R_3. \quad (5)$$

Формирование структуры системы должно сопровождаться таблицами с номенклатурами элементов, свойств и параметров, которые определяют одну из частей множественно-информационного анализа.

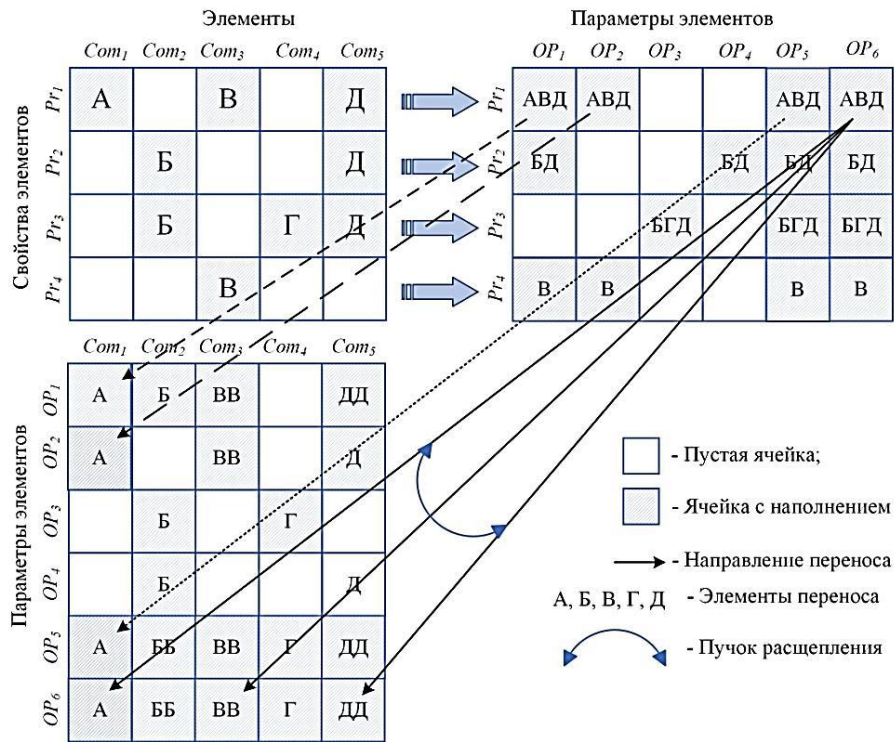


Рис. 5. Схема переноса параметров на пространство ячеек системы

В реальных условиях при рассмотрении сложных систем ее элементы не являются простыми. Поэтому граница элементов приобретает форму «фьорда» и разворачивается в структуру компонент, конгломератов и сборных конструкций. Структура границы каждой ячейки становится сложной и при визуализации раскрывается интерактивно. Абстрактный пример границы элементов приведен на рис. 6.

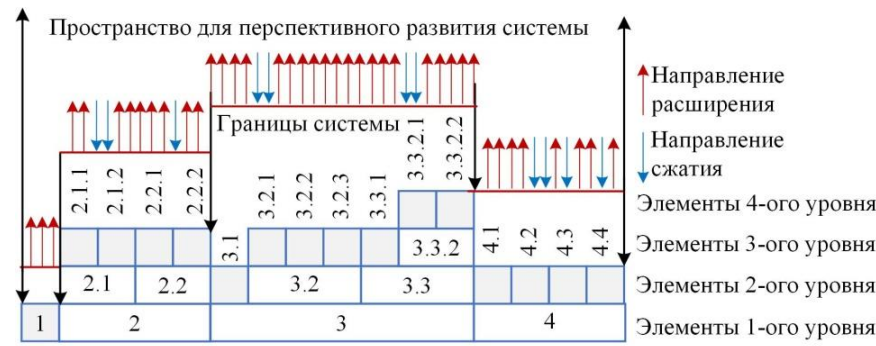


Рис. 6. Границы совершенства системы

**Пример.** Пусть задана структура, определяющая границу элементов сложной системы:

$$Com = \{Com_1(1), Com_2(3), Com_3(4), Com_4(2)\}, \quad (6)$$

где  $Com$  – множество элементов системы;  $Com_i(k)$  – элементы системы структуры типа  $k$ ; 1, 2, 3, 4 – коды типов структуры: простой элемент, 2 – компонент, 3 – конгломерат; 4 – сборная конструкция.

Для элементов  $Com_2(3), Com_3(4), Com_4(2)$  дополнительно должна быть определена внутренняя структура:

$$Com_2(3) = \{Com_{21}(2) \cdot \{Com_{211}(1), Com_{212}(1)\}, Com_{22}(2) \cdot \{Com_{221}(1), Com_{222}(1)\}\}, \quad (7)$$

$$Com_3(4) = \{Com_{31}(1), Com_{32}(2), Com_{33}(4)\} = \\ = \{Com_{31}(1), Com_{32}(2) \cdot \{Com_{321}(1), Com_{322}(1), Com_{323}(1)\}, \quad (8)$$

$$Com_{33}(4) \cdot \{Com_{331}(1), Com_{332}(2) \cdot \{Com_{3321}(1), Com_{3322}(1)\}\}\} \\ Com_4(2) = \{Com_{41}(1), Com_{42}(1), Com_{43}(1), Com_{44}(1)\}, \quad (9)$$

На этапе определения количества элементов системы, т. е. состава множества  $Com$ , наличие свойств и параметров не является существенным.

При указанных условиях получаем виды границ, приведенных на рис. 6.

«Фьордовая» структура системы формируется на этапе системного анализа предметной области и должна подразумевать возможности ее развития и пульсации по количеству элементов всех видов.

В последующие промежутки времени в системе могут исчезать и появиться новые элементы как в эталонной, так и в новой области структуры.

Появление новых элементов и новых свойств изменяет размерность гиперкуба (см. рис. 7). Это приводит к указанию в формальной записи множественной модели введение обозначений момента времени  $t$ . Например, формулы (2) и (3) примут вид:

– развертка в плоскости (Элемент – Свойство):

$$R_1^t = \{Com_i(Type) \cdot \{Pr_{ij}\}\}, i = \overline{1; N^t}, j = \overline{1; N_j^t}; \quad (10)$$

– развертка в плоскости (Элемент – Параметр):

$$R_3^t = \{Com_i(Type) \cdot \{Op_{ik}\}\}, i = \overline{1; N^t}, k = \overline{1; N_k^t}, \quad (11)$$

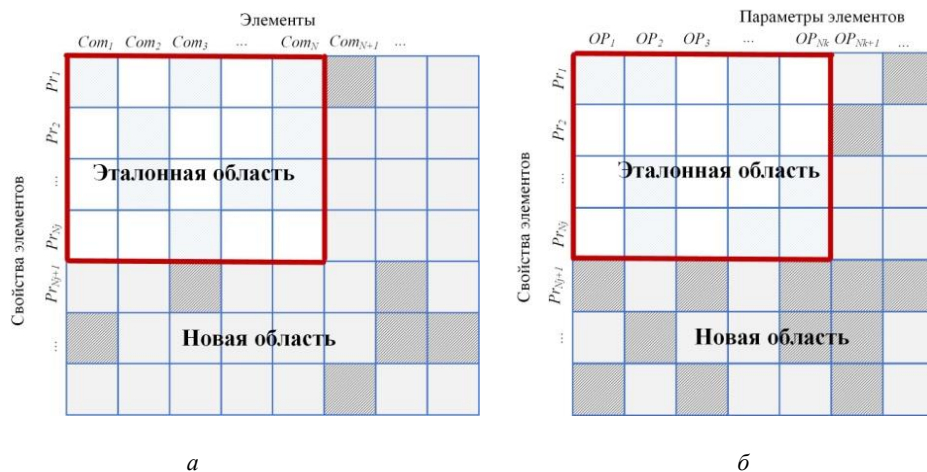


Рис. 7. Пример расширения размерности системы при появлении новых свойств и параметров

Решение о размерности системы в эталонном или новом состоянии принимается в ходе применения основных методов системного анализа: анализа и декомпозиции.

## Выводы

В заключение можно сказать, что теоретико-множественный анализ является эффективным инструментом для исследования сложных систем. Результаты, представленные в данной статье, показывают, что представление системы в виде гиперкуба позволяет получить глубокое понимание структуры и элементов системы, а также впоследствии выявить закономерности и взаимосвязи между ними.

Сравнение результатов с ранее известными данными показывает, что теоретико-множественный анализ позволяет получить более точные и детальные результаты, чем другие методы анализа сложных систем, так как позволяет учитывать все аспекты системы. Уже сейчас можно сказать, что он имеет большой потенциал и может стать основой для новых методов анализа сложных систем в будущем.

Ограничения полученных результатов связаны с тем, что теоретико-множественный анализ требует более глубокого понимания математики и теории множеств. Кроме того, для применения этого подхода к конкретным системам может потребоваться разработка специализированного программного обеспечения.

Практическое применение результатов теоретико-множественного анализа может включать разработку новых методов управления сложными системами, улучшение систем принятия решений, а также создание новых технологий в области искусственного интеллекта и машинного обучения.

Перспективы исследования заключаются в дальнейшем развитии теоретико-множественного анализа как инструмента исследования сложных систем, а также в разработке новых методов и подходов на его основе. Это может привести к созданию новых технологий и решений, которые будут способствовать развитию науки и техники в целом.

### Список литературы / References

Вдовин В. М., Суркова Л. Е., Валентинов В. А. *Теория систем и системный анализ*. Москва: Дашков и К, 2018. 644 с.

Vdovin V. M., Surkova L. E., Valentinov V. A. *Theory of systems and system analysis*. Moscow: Dashkov i K, 2018. 644 p.

Волкова В. Н., Денисов А. А. *Теория систем и системный анализ*. Москва: Юрайт, 2024. 562 с.

Volkova V. N., Denisov A. A. *Theory of systems and system analysis*. Moscow: Iurait, 2024. 562 p.

Маторин С. И. *Теория систем и системный анализ*. Москва: Директ-Медиа, 2019. 508 с.

Matorin S. I. *Theory of systems and system analysis*. Moscow: Direkt-Media, 2019. 508 p.

Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Аркулис М. Б., Сагадатов А. И., Климов С. С., Кабанова В. В., Николаев А. А., Дерябин Д. И. Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества опасных производственных объектов на металлургическом предприятии: структура и алгоритмы. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2022, № 5 (110), с. 29–48. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3> EDN: ELUMKD

Narkevich M. Iu., Logunova O. S., Arkulis M. B., Sagadatov A. I., Klimov S. S., Kabanova V. V., Nikolaev A. A., Deriabin D. I. Applied digital platform for assessing the dynamics of the quality of hazardous industrial facilities at a metallurgical enterprise: structure and algorithms. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 5 (110), pp. 29–48. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3> EDN: ELUMKD

Логунова О. С., Арефьева Д. Я., Сухов Д. А., Гладышева М. М., Торчинский В. Е. Научные публикационные коллаборации: структурирование и визуализация информации. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2019, № 5 (92), с. 22–41. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-5-92-2> EDN: LMGUHT

Logunova O. S., Aref'eva D. Ia., Sukhov D. A., Gladysheva M. M., Torchinskii V. E. Scientific publication collaborations: structuring and visualizing information. *Cherepovets State University Bulletin*, 2019, no. 5 (92), pp. 22–41. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-5-92-2> EDN: LMGUHT

### Сведения об авторах

**Иван Сергеевич Бондарев** – аспирант; <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>, ivanbond1998@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Ivan S. Bondarev** – Postgraduate Student, <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>, ivanbond1998@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

**Сергей Алексеевич Гаврицков** – кандидат педагогических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-8648-2228>, zlatokuznec@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Sergey A. Gavritskov** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8648-2228>, zlatokuznec@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

**Оксана Сергеевна Логунова** – доктор технических наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, [logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru), Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Oksana S. Logunova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, [logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

**Михаил Юрьевич Наркевич** – кандидат технических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>, [narkevich\\_mu@mail.ru](mailto:narkevich_mu@mail.ru), Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Mikhail Yu. Narkevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>, [narkevich\\_mu@mail.ru](mailto:narkevich_mu@mail.ru), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

**Заявленный вклад авторов:** Бондарев И. С. – 70 %, Гаврицков С. А. – 10 %, Логунова О. С. – 10 %, Наркевич М. Ю. – 10 %. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** Ivan S. Bondarev – 70 %, Sergey A. Gavritskov – 10 %, Oksana S. Logunova – 10 %, Mikhail Yu. Narkevich – 10 %. The authors declare no conflicts of interests.

---

Статья поступила в редакцию 28.02.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 24.06.2024.

The article was submitted 28.02.2024; Approved after reviewing 10.06.2024; Accepted for publication 24.06.2024.