

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DECISION MAKING

УДК 004.94

DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-1-0-7

Жихарев А.Г.<sup>1</sup>  
Маматов Р.А.<sup>2</sup>  
Губкин А.В.<sup>3</sup>  
Игнатенко П.В.<sup>3</sup>

### СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИСЧИСЛЕНИЯ СИСТЕМ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

<sup>1)</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия

<sup>2)</sup> Управление Росгвардии по Белгородской области, ул. Преображенская, 60А, Белгород, 308009, Россия

<sup>3)</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

*e-mail: zhikharev@bsu.edu.ru*

#### Аннотация

В статье рассматриваются основы оригинального формального аппарата – исчисление систем как функциональных объектов. Исчисление рассматривается в контексте его использования для формализации процедур системно-объектного анализа слабо-формализуемых систем с целью моделирования процессов адаптации и эволюции таких систем. Рассматриваются базовые понятия исчисления, такие как: системно-объектная модель, узловой объект, потоковый объект, связи системно-объектной модели, структурные компоненты потоковых и узловых объектов. Рассматривается пример абстрактной системы и ее формальное представление средствами исчисления. Кроме того, приводится пример использования метода системно-объектного имитационного моделирования для построения модели системы формирования комбинированного канального сигнала с целью исследования его уровня устойчивости к помехам. Рассмотренные в работе механизмы формализованного описания структуры и функций сложных систем позволяют учитывать при моделировании ряд общесистемных принципов и закономерностей, а также природу моделируемой системы, адекватную решаемой задаче.

**Ключевые слова:** системно-объектный подход; системное моделирование; системно-объектная модель; узловой объект; потоковый объект

**Для цитирования:** Жихарев А.Г., Маматов Р.А., Губкин А.В., Игнатенко П.В. Структурные элементы исчисления систем как функциональных объектов // Научный результат. Информационные технологии. – Т.7, №1, 2022. – С. 57-67. DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-1-0-7

Zhikharev A.G.<sup>1</sup>  
Mamatov R.A.<sup>1</sup>  
Gubkin A.V.<sup>3</sup>  
Ignatenko P.V.<sup>3</sup>

### STRUCTURAL ELEMENTS OF CALCULUS OF SYSTEMS AS FUNCTIONAL OBJECTS

<sup>1)</sup> Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia

<sup>2)</sup> Rosgvardia Directorate for the Belgorod Region, 60A Preobrazhenskaya St., Belgorod, 308009, Russia

<sup>3)</sup> Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

*e-mail: zhikharev@bsu.edu.ru*

### Abstract

The article discusses the basics of the original formal apparatus – the calculus of systems as functional objects. Calculus is considered in the context of its use to formalize the procedures of system-object analysis of weakly formalized systems. The basic concepts of calculus are considered, such as: a system-object model, a node object, a streaming object, connections of a system-object model, structural components of streaming and node objects. An example of an abstract system and its formal representation by means of calculus is considered. In addition, an example is given of using the method of system-object simulation modeling to build a model of a combined channel signal generation system in order to study its level of resistance to interference.

**Key words:** system-object approach, system modeling, system-object model, node object, stream object

**For citation:** Zhikharev A.G., Mamatov R.A., Gubkin A.V., Ignatenko P.V. Structural elements of calculus of systems as functional objects // Research result. Information technologies. – Т.7, №1, 2022. – P. 57-67. DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-1-0-7

### ВВЕДЕНИЕ

Системно-объектный метод анализа слабо-формализуемых систем [1] представляет собой перспективное направление развития системно-объектного подхода [2] в прикладном аспекте. С целью формализации системно-объектного анализа [1] ранее авторами предложено использование теории объектов Аббади-Карделли [3]. Однако, данная формальная теория не позволяет учесть все системообразующие факторы моделируемой системы, а также описать элементарные операции на множествах структурных, функциональных и объектных характеристик моделируемой системы. Для решения данной задачи авторами предложен оригинальный формальный аппарат – исчисление систем как функциональных объектов, где используются некоторые формализмы теории объектов Аббади-Карделли. Ранее были определены такие понятия, как: системно-объектная модель, потоковый объект (частный случай объекта теории Аббади-Карделли), узловой объект [4]. Рассмотрим подробнее множество узловых объектов в терминах исчисления систем как функциональных объектов.

### МНОЖЕСТВО УЗЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Введем в рассматриваемое исчисление множество узловых объектов  $S$ , которое соответствует множеству систем как УФО-элементов. Система как УФО-элемент представляет собой триединую конструкцию, где должны быть учтены структурные характеристики системы, определяющиеся перекрестком входящих и исходящих связей системы. Таким образом, структурные характеристики системы, представляют собой интерфейс системы, за счет которого она может рассматриваться в контексте некоторой надсистемы. Функциональные характеристики системы определяются запросом надсистемы – внешняя детерминанта системы, которая формально представлена как раз в виде интерфейса УФО-элемента (далее – узловой объект). Также функциональная характеристика определяется конкретными процедурами преобразования входных связей узлового объекта в выходные. Объектные характеристики узлового объекта представляют собой набор параметров той субстанции, которая реализует функцию узлового объекта. Таким образом, множество узловых объектов системно-объектной модели может быть представлено в следующем формальном виде:

$$S = \{s_1, \dots, s_n\}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество узловых объектов (систем);  $s_n$  – узловой объект.

Для учета в формальном аппарате исчисления систем как функциональных объектов контекста системы, введем во множество узловых объектов специальный элемент, представляющий собой контекст моделируемой системы, далее такой узловой объект будем обозначать с нижним индексом «kontext» –  $s_{\text{context}}$ . Такой узловой объект является «черным ящиком» с точки зрения моделирования, однако его необходимо учитывать, так как именно контекст системы определяет ее внешнюю детерминанту, которая в модели представлена входящими и исходящими потоковыми объектами первого уровня. Таким образом, множество

узловых объектов системно-объектной модели всегда будет включать контекстный узловой объект  $S_{context}$ .

Каждый  $n$ -й элемент множества  $S$  представляет собой специальный узловой объект (соответствующий конкретной системе/УФО-элементу), который в соответствии с исчислением объектов Аббади-Карделли состоит из полей и метода и имеет следующий вид:

$$s_n = [U, f, O], \quad (2)$$

где:

1.  $U$  — представляет собой множество полей для описания интерфейсных потоковых объектов узлового объекта  $s_n$  (порты узлового объекта), соответствующих множеству функциональных связей моделируемой системы. Множество  $U$ , в свою очередь можно разделить на два подмножества: подмножество потоковых объектов, которые выступают в качестве входных портов и подмножество потоковых объектов, выступающих в качестве выходных портов узлового объекта, таким образом:

$$U = U? \cup U! \quad (3)$$

где,  $L?$  — представляет собою множество входящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих входящим связям системы,  $L!$  — представляет собою множество исходящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих исходящим связям системы.

2. Функция в выражении (2)  $f$  — представляет собой метод узлового объекта  $s_n$ , описывающий процесс преобразования ресурсов, поступающих посредством входящих интерфейсных потоковых объектов (входящих связей системы)  $L?$  в выходящие —  $L!$ . Далее метод узлового объекта будем представлять в виде функции от множества входящих потоковых объектов:

$$f(L?)L! \quad (4)$$

где  $f$  — метод узлового объекта (функция системы) с областью определения  $D(f)=L?$  и областью значений  $E(f)=L!$ , соответственно. Так как входящие интерфейсные порты узлового объекта являются экземплярами множества потоковых объектов, т.е. справедливо утверждение, что любой входящий порт узлового объекта принадлежит множеству потоковых объектов:

$$\forall l? \in L? \rightarrow l? \in L \quad (5)$$

Представленное выше утверждение также справедливо для исходящих связей системы:

$$\forall l! \in L! \rightarrow l! \in L \quad (6)$$

3.  $O$  — представляет собою множество полей для описания объектных характеристик узлового объекта (системы)  $s_n$ , элементы которого имеют следующий формат: «идентификатор»: «значение». Т.е. множество  $O$  можно понимать, как набор полей узлового объекта. Причем, поля узлового объекта можно условно поделить на три группы: первая группа – характеризуют входные порты узлового объекта (например, пропускная способность входящего порта), вторая группа характеризует выходные порты узлового объекта (например, пропускная способность входящего порта), третья группа – характеризует объект, участвующий в реализации метода узлового объекта. Таким образом, множество полей для описания объектных характеристик системы состоит из трех подмножеств:

$$O = O? \cup O! \cup Of, \quad (7)$$

где: множество полей  $O?$  содержит параметры, характеризующие входы системы,  $O!$  – множество параметров, характеризующих выходы системы и  $Of$  – множество параметров, характеризующих объект, участвующий в реализации функции системы. С формальной точки зрения, перечисленные множества объектных характеристик содержат постоянные величины, задействованные в описании функции узла (подробнее будет рассмотрено далее).

Принимая во внимание описанные выше компоненты узлового объекта, выражение (2) можно записать в следующем уточненном виде:

$$s_n = [L?, L!; f(L?)L!; O?, O!, Of] \quad (8)$$

Графическое представление выражения (8) показано на рисунке 1.

Выражение (8) будем использовать далее для описания узловых объектов системно-объектной модели.

### МНОЖЕСТВО СВЯЗЕЙ СИСТЕМЫ

Далее рассмотрим множество связей системы. Ранее мы определили множества потоковых и узловых объектов – «строительный материал», из которого создается модель. Для учета внутренних связей системы в определение системно-объектной модели вводится множество  $C$ , где содержатся все связи между узловыми объектами. Каждая связь, характеризуется, как минимум тремя компонентами: источник связи – экземпляр узлового объекта, для которого связь выступает в качестве исходящей; получатель связи – экземпляр узлового объекта, для которого связь выступает в качестве входящей; тип связи – экземпляр потокового объекта. Таким образом, множество связей системно-объектной модели определим следующим образом:

$$C = \{(s_{out}, s_{in}, l) | s_{out} \in S, s_{in} \in S, l \in L\}, \quad (9)$$

где:  $s_{out}$  – экземпляр узлового объекта – источника связи;  $s_{in}$  – экземпляр узлового объекта – получателя связи;  $l$  – тип связи между указанными выше узловыми объектами.

Рассмотрим пример описания абстрактной системы в терминах исчисления систем как функциональных объектов, используя множества потоковых, узловых объектов и связей, описанные выше. Для этого рассмотрим графоаналитическое представление системы, как показано на рисунке 1.

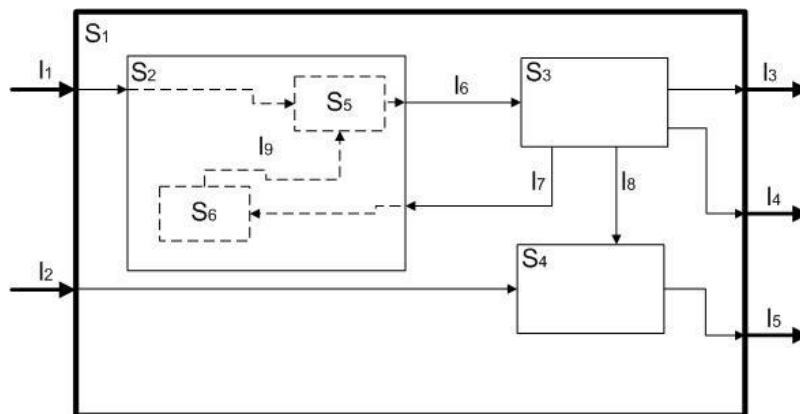


Рис. 1. Системно-объектная модель абстрактной системы  
Fig. 1. System-object model of an abstract system

В соответствии с формальным представлением системно-объектной модели [4], представленную выше графическую интерпретацию запишем в следующем виде:

$$M = \langle L, S, C \rangle \quad (10)$$

Далее, распишем подробнее компоненты системно-объектной модели.  $L$  – множество потоковых объектов модели (иерархия связей системы). Как видно из рисунка 1, в модели имеют место девять потоковых объектов различной природы. В описании мы пренебрегаем внутренней структурой потоковых объектов, а также их отношением к отдельным классам базовой иерархии связей. Тогда для рассматриваемого примера множество имеет вид:  $L = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9\}$ .  $S$  – множество узловых объектов модели (подсистем). Для рассматриваемого примера множество узловых объектов будет содержать шесть элементов плюс контекстный узловой объект:  $S = \{s_{context}, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ .

Рассмотрим подробнее элементы множества узловых объектов, которые представлены далее:  $s_{context} = [\{l_3, l_4, l_5\}, \{l_1, l_2\}; \emptyset; \emptyset]$ ,  $s_1 = [\{l_1, l_2\}, \{l_3, l_4, l_5\}; f(l_1, l_2) l_3, l_4, l_5; O_1]$ ,  $s_2 = [\{l_1, l_7\}, l_6; f(l_1, l_7) l_6; O_2]$ ,  $s_3 = [l_6, \{l_3, l_4, l_8, l_7\}; f(l_6) l_3, l_4, l_8, l_7; O_3]$ ,  $s_4 = [\{l_2, l_8\}, l_5; f(l_2, l_8) l_5; O_4]$ ,  $s_5 = [\{l_1, l_9\}, l_6; f(l_1, l_9) l_6; O_5]$ ,  $s_6 = [l_7, l_9; f(l_7) l_9; O_6]$ .

Далее рассмотрим множество связей системы. Для рассматриваемого примера множество связей имеет следующий вид:  $C = \{[S_{context}, S5, l1], [S_{context}, S4, l2], [S3, S_{context}, l3], [S3, S_{context}, l4], [S4, S_{context}, l5], [S5, S3, l6], [S3, S6, l7], [S3, S4, l8], [S6, S5, l9]\}$ .

Таким образом, множества, представленные выше, в достаточной мере описывают системно-объектную модель с точки зрения структурных характеристик, однако, следует отметить, что перечисленные множества не отражают иерархию узловых объектов системно-объектной модели.

### **МЕТОД УЗЛОВОГО ОБЪЕКТА**

Рассмотрим подробнее формальный аспект описания методов узловых объектов. По определению, метод узлового объекта представляет собой функциональную характеристику системы (функция УФО-элемента) и характеризуется интерфейсом, то есть наборами входящих и выходящих потоковых объектов. Рассматривая метод узлового объекта как математическую функцию, здесь в качестве параметров функции выступают входящие потоковые объекты со своими наборами полей, а в качестве значения – набор выходящих потоковых объектов, а точнее, их поля. Причем функция системы (метод узлового объекта) может быть реализована двумя способами:

1. Реализация метода за счет подсистем нижнего уровня. Данный вариант имеет место в процессе моделирования реальной системы тогда, когда мы не достигли требуемого уровня декомпозиции системы и не представляется возможным описать логику преобразования входных потоковых объектов в выходные. Рассматривая пример абстрактной системы, представленной на рисунке 1, можно констатировать следующее: метод узла  $s_1.f$  реализуется методами узлов  $s_2.f, s_3.f, s_4.f$ . В тоже время, метод узла  $s_2.f$  реализуется методами узлов  $s_5.f, s_6.f$ .

2. Реализация метода, используя язык описания функциональных узлов (подробно рассмотрен далее). Этот вариант реализации метода узлового объекта имеет место тогда, когда был достигнут требуемый уровень декомпозиции системы и представляется возможным описать логику преобразования входных потоковых объектов в выходные.

Рассмотрим подробнее первый вариант реализации метода узлового объекта на примере абстрактной системно-объектной модели, представленной на рисунке 1. Как было отмечено выше, метод узлового объекта с номером один реализуется за счет методов узловых объектов с номерами два, три и четыре. Введем термин «вложенность функций», определение которого заключается в следующем: метод узлового объекта считается вложенным, если он участвует в реализации метода другого узлового объекта. Далее вложенность методов узловых объектов будем обозначать фигурной скобкой, направленной в сторону того метода, который реализуется за счет других методов. Для рассматриваемого примера, покажем формальную вложенность методов узловых объектов с номерами два, три и четыре:

$$s_1.f = \left\{ \begin{array}{l} s_2.f \\ s_3.f \\ s_4.f \end{array} \right. \quad (11)$$

Выражение 11 далее будем интерпретировать следующим образом: метод узлового объекта  $s_1.f$  реализуется методами узлов  $s_2.f, s_3.f, s_4.f$ . Тогда, вложенность всех методов узловых объектов системно-объектной модели, представленной на рисунке 1 можно представить в виде выражения (12).

$$s_1.f = \left\{ \begin{array}{l} s_2.f = \left\{ \begin{array}{l} s_5.f \\ s_6.f \end{array} \right. \\ s_3.f \\ s_4.f \end{array} \right. \quad (12)$$

Рассмотрим методы представленных в выражении (12) узловых объектов с учетом потоковых объектов – параметров и потоковых объектов – результатов, например, для узлового объекта  $s_1$  функция имеет вид:

$$s_1.f = f(l_1, l_2)l_3, l_4, l_5. \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), в качестве потоковых объектов – параметров функции узлового объекта  $s_1$  выступают потоковые объекты один и два, а в качестве потоковых объектов – результатов выступают объекты три, четыре и пять.

Тогда полная запись представления вложенности методов узловых объектов вместе с их интерфейсами можно представить в следующем виде:

$$s_1.f(l_1, l_2)l_3, l_4, l_5 = \begin{cases} s_2.f(l_1, l_7)l_6 = \begin{cases} s_5.f(l_1, l_9)l_6 \\ s_6.f(l_7)l_9 \end{cases} \\ s_3.f(l_6)l_3, l_4, l_7, l_8 \\ s_4.f(l_2, l_8)l_5 \end{cases} \quad (14)$$

Выражение (14) можно рассматривать как альтернативное сокращенное представление структурных параметров системно-объектной модели. Действительно, метод узлового объекта первого уровня – левая часть выражение (14) имеет потоковые объекты, составляющие его интерфейс, связывающие его исключительно с контекстным потоковым объектом – первый уровень иерархии системно-объектной модели. Вложенные методы узловых объектов составляют второй уровень иерархии системно-объектной модели. Если имеет место вложенность методов узловых объектов второго уровня, тогда в системно-объектной модели имеет место третий уровень иерархии, как в рассматриваемом примере абстрактной системно-объектной модели.

Также из выражения (14), имея иерархию связей системы в виде множества потоковых объектов, можно воспроизвести множество связей системы. Анализируя выражение 14 и графоаналитическое представление системно-объектной модели можно сформулировать несколько утверждений, представленных ниже.

Из выражения (14) видно, что потоковый объект  $l_1$  является входящим потоком по отношению к узлу  $s_5$ , в то же время источником этой связи является внешняя среда  $s_{context}$ . Не трудно заметить, что для таких связей истинно следующее утверждение: любая связь  $c = \{s_{context}, s_{in}, l\}$ , составляющая контекст узла  $s_{in}$  (входящая связь по отношению к узлу  $s_{in}$ ), также является входящей связью по отношению к узлу  $s^*$  если функция узла  $s^*.f$  реализована в том числе, с помощью функции узла  $s_{in}.f$ . То есть, если существует такая связь, которая является входящей по отношению к некоторому узлу и источником связи является внешняя среда  $s_{context}$ , тогда эта связь также будет входящей для узлов, функции которых реализованы с помощью функции первого узла напрямую или косвенно (через функции третьих узловых объектов). Формально это утверждение можно записать в следующем виде:

$$\forall c = \{s_{context}, s_{in}, l\} \exists c = \{s_{context}, s^*, l\} \text{ если } s^*.f = \begin{cases} s_{in}.f \\ \dots \end{cases} \quad (15)$$

Для доказательства утверждения (15) рассмотрим произвольный узел  $s$  для которого существует связь  $c = \{s_{context}, s, l\}$ , а также узел  $s^*$  такой что:

$$s^*.f = \begin{cases} s.f \\ \dots \end{cases} \quad (16)$$

По условию мы знаем, что  $s.f=f(l)$ , тогда справедливо выражение:

$$s^*.f = \begin{cases} s.f(l) \\ \dots \end{cases} \rightarrow s^*.f(l) = \begin{cases} s.f(l) \\ \dots \end{cases} \rightarrow \forall \{s_{context}, s^*, l\} \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что существование связи  $\{s_{context}, s, l\}$  гарантирует существование связи  $\{s_{context}, s^*, l\}$  при выполнении условия (16). Таким образом, возвращаясь к примеру абстрактной системы, графоаналитическое представление которой показано на рисунке 1, можно констатировать факт, что связь  $\{s_{context}, s_5, l_1\}$  с условием вложенности методов (16) гарантирует наличие еще двух входящих связей узловых объектов верхних уровней:  $\{s_{context}, s_1, l_1\}$  и  $\{s_{context}, s_2, l_1\}$ .

Следует отметить, что выражение (15) справедливо также для исходящих связей системы, тех у которой в качестве приемника выступает специальный узловой объект  $s_{context}$ , т.е. также справедливо утверждение:

$$\forall c = \{s_{out}, s_{context}, l\} \exists c = \{s^*, s_{context}, l\} \text{ если } s^*.f = \begin{Bmatrix} s_{out}.f \\ \dots \end{Bmatrix}. \quad (18)$$

Для доказательства соотношения (18) рассмотрим произвольный узел  $s$  для которого существует связь  $c = \{s, s_{context}, l\}$ , а также узел  $s^*$  такой что:

$$s^*.f = \begin{Bmatrix} s.f \\ \dots \end{Bmatrix}. \quad (19)$$

По условию мы знаем, что  $s.f=f(l)$ , тогда справедливо выражение:

$$s^*.f = \begin{Bmatrix} s.f(l) \\ \dots \end{Bmatrix} \rightarrow s^*.f(l) = \begin{Bmatrix} s.f(l) \\ \dots \end{Bmatrix} \rightarrow \forall \{s^*, s_{context}, l\} \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что существование связи  $\{s, s_{context}, l\}$  также как и в первом случае с входящей связью гарантирует существование связи  $\{s^*, s_{context}, l\}$  при выполнении условия (19). Рассматривая пример модели системы, представленной на рисунке 1, можно заключить, что связь, например,  $\{s_4, s_{context}, l_5\}$  гарантирует наличие связи узлового объекта верхнего уровня  $\{s_1, s_{context}, l_5\}$ .

По аналогии со связями, у которых в качестве источника или приемника выступает внешняя среда, рассмотрим внутренние связи системы, те, которые связывают два узловых объекта, находящихся на разных уровнях иерархии. Например, связь  $l_7$  (см. рисунок 1) связывает два узловых объекта  $s_3$  и  $s_6$ . Очевидно, что справедливо следующее утверждение: любая связь  $c = \{s_{out}, s_{in}, l\}$ , также является входящей связью по отношению к узлу  $s^*$  если функция узла  $s^*.f$  реализована в том числе, с помощью функции узла  $s_{in}.f$  и в качестве параметров вышеуказанных функций имеет место потоковый объект  $l$ , т.е.  $s_{in}.f=f(l, \dots)$  и  $s^*.f=f(l, \dots)$ . Формально данное утверждение можно представить в виде:

$$\forall c = \{s_{out}, s_{in}, l\} \exists \{s_{out}, s^*, l\} \text{ если } s^*.f(l, \dots) = \begin{Bmatrix} s_{in}.f(l, \dots) \\ \dots \end{Bmatrix} \quad (21)$$

Для доказательства утверждения (21) рассмотрим такой узловой объект  $s$ , для которого существует связь  $c = \{s_{out}, s, l\}$  а также узловой объект  $s^*$ , метод которого реализуется, в том числе за счет метода первого узлового объекта, т.е.:

$$s^*.f = \begin{Bmatrix} s.f \\ \dots \end{Bmatrix}. \quad (22)$$

Тогда, справедливо следующее:

$$s^*.f = \begin{Bmatrix} s.f(l) \\ \dots \end{Bmatrix} \rightarrow s^*.f(l) = \begin{Bmatrix} s.f(l) \\ \dots \end{Bmatrix} \rightarrow \forall \{s_{out}, s^*, l\} \quad (23)$$

Следует отметить, что выражение (21) справедливо для тех связей, источник которых находится выше по уровню иерархии, чем узловой объект – получатель связи. Т.е. в случае если для связи  $c = \{s_{out}, s, l\}$  узловые объекты  $s_{out}$  и  $s$  находятся на одном уровне иерархии, из чего следует:

$$s^*.f = \begin{Bmatrix} s.f \\ s_{out}.f \\ \dots \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

тогда утверждение (21) не выполняется.

Как видно из выражения (23), направление связи в данном случае не играет никакой роли. Соответственно справедливо утверждение: любая связь  $c = \{s_{out}, s_{in}, l\}$ , также является исходящей связью по отношению к узлу  $s^*$  если функция узла  $s^*.f$  реализована в том числе, с помощью функции узла  $s_{out}.f$  и в качестве значений вышеуказанных функций имеет место потоковый объект  $l$ , т.е.  $s_{out}.f=f(\dots)l$  и  $s^*.f=f(\dots)l$ . Формально данное утверждение можно представить в виде:

$$\forall c = \{s_{out}, s_{in}, l\} \exists \{s^*, s_{out}, l\} \text{ если } s^*.f(\dots)l = \begin{Bmatrix} s_{out}.f(\dots)l \\ \dots \end{Bmatrix} \quad (25)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим использование представленных выше структурных элементов исчисления систем как функциональных объектов на примере моделирования технической системы формирования комбинированного канального сигнала с целью исследования эффективности сигнально-кодовых конструкций с позиции их помехоустойчивости [5]. Как было отмечено выше, сперва необходимо выделить потоковые объекты предметной области. Для решения задачи исследования эффективности сигнально-кодовых конструкций необходимо разработать модель системы передачи информации от источника к приемнику с учетом воздействия шумов на канал передачи информации. Рассмотрим системно-объектную модель вида:

$$M = \langle L, S, Q \rangle \quad (27)$$

где:  $L$  – множество потоковых объектов модели;  $S$  – множество узловых объектов модели и  $Q$  – множество связей. Рассмотрим подробнее множество потоковых объектов, в котором необходимо выделить следующие:

- $D_{er}(t)=[d_{er}]$  – потоковый объект представляет собой вероятность ошибки в канале связи и содержит одно поле, где хранится значение вероятности;
- $S(t)=[s]$  – потоковый объект представляет собой сообщение, которое необходимо передать по каналу связи, имеет одно поле для хранения текущего передаваемого разряда;
- $S'(t)=[s']$  – потоковый объект представляет собой сообщение, полученное на стороне адресата, содержит одно поле для хранения текущего декодированного разряда сообщения;
- $U(t)=[u]$  – потоковый объект представляет собой модулированный сигнал, передаваемый по каналу связи, содержит одно поле для хранения мгновенной энергии сигнала;
- $Y(t)=[y]$  – потоковый объект представляющий сигнал на входе в демодулятор, содержит одно поле для хранения мгновенной энергии сигнала;
- $N(t)=[n]$  – потоковый объект представляющий помехи, воздействующие на сигнал в канале связи, имеет одно поле для хранения значения мгновенной энергии помехи;
- $PRS=[r_1, r_2, \dots, r_n]$  – потоковый объект – представляет собою псевдослучайную двоичную последовательность, поле потокового объекта  $PRS.r_n$  – разряд двоичной последовательности,  $n$  – размерность последовательности;
- $TFM=[k_1, k_2, \dots, k_m]$  – потоковый объект представляет собой частотно-временную матрицу. Состоит из  $m$  полей, где  $m$  – размер линейно-частотной матрицы. Линейно-частотная матрица размера  $m \times m$  может содержать значения ноль или единицу, причем в одном столбце матрицы может содержаться лишь одна единица, поэтому такую матрицу удобно кодировать в виде массива, элементы которого представляю собой номер строки где указана единица.

Таким образом, множество потоковых объектов модели примет следующий вид:

$$L = \{D_{er}(t), S(t), S'(t), U(t), Y(t), N(t), PRS, TFM\} \quad (27)$$

Далее рассмотрим множество узловых объектов модели. Для решения поставленных задач были выделены следующие узловые объекты:

1. Источник сообщения;
2. Оценка уровня помеховой обстановки;
3. Генератор частотно-временной матрицы;
4. Генератор псевдо-случайной последовательности;
5. Формирование комбинированного канального сигнала;
6. Канал связи;
7. Генератор помех;
8. Демодулятор;
9. Декодер канала;
10. Декодер источника;
11. Получатель сообщения.



Фактически, перечень узловых объектов представляет собой модули системы передачи информации, а также технологические операции, необходимые для формирования комбинированного канального сигнала. Рассмотрим подробнее структурные характеристики узловых объектов на примере источника сообщений, который в соответствии с принятыми обозначениями имеет вид:

$$ИС = [\emptyset, S(t); f(\emptyset)S(t); \emptyset] \quad (28)$$

Из выражения (28) видно, что в системно-объектной модели источник сообщения представлен в виде генератора передаваемого сообщения. Данный узловой объект не имеет входных связей, а в качестве выхода выступает потоковый объект  $S(t)$ .

Связав все перечисленные выше узловые объекты между собой посредством потоковых объектов, получим системно-объектную модель, графоаналитическое представление которой показано на рисунке 2.

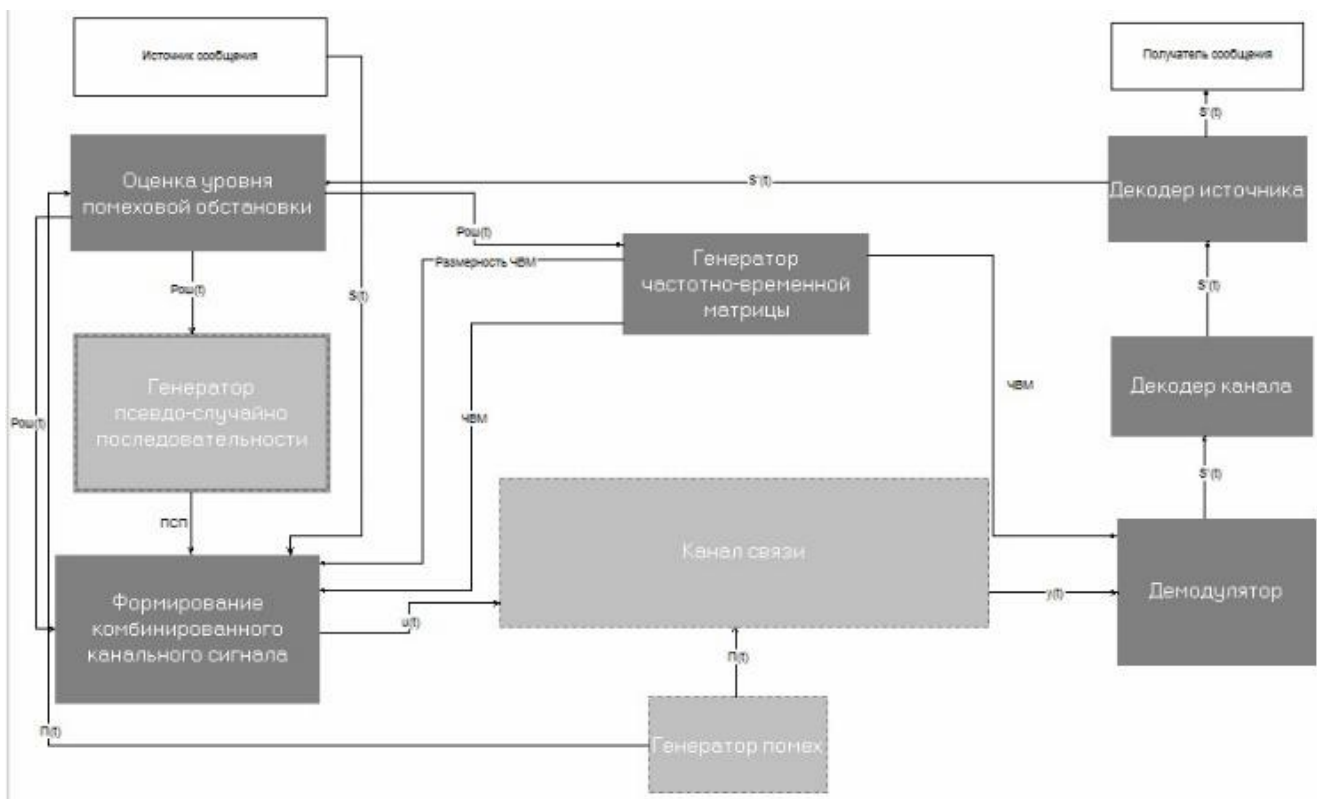


Рис. 2. Системно-объектная модель системы формирования комбинированного канального сигнала

Fig. 2. System-object model of the combined channel signal generation system

Далее, с целью, моделирование процессов преобразования входных потоковых объектов в выходные необходимо описать методы узловых объектов с помощью специального языка описания функциональных узлов. Пример алгоритма реализации метода узлового объекта «Генератор псевдослучайной последовательности» показан на рисунке 3.

Разработанная имитационная системно-объектная модель позволяет исследовать различные сигнально-кодовые конструкции с целью увеличения их помехоустойчивости.

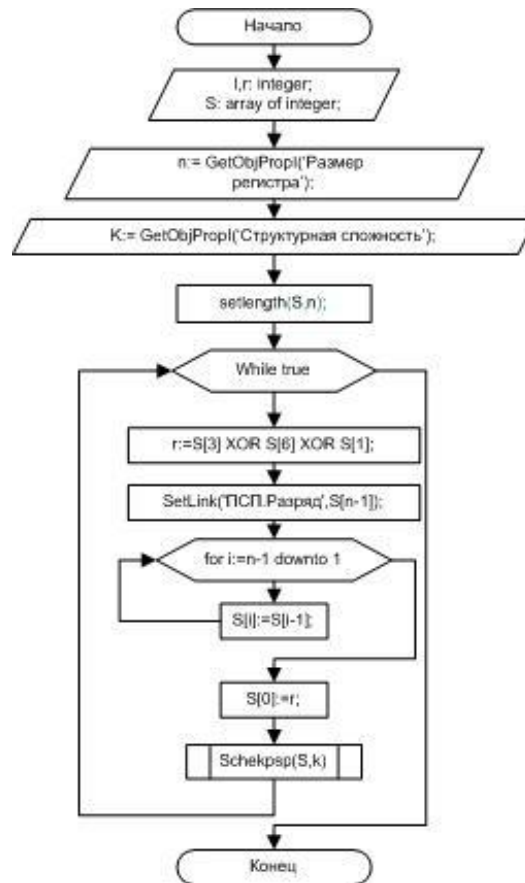


Рис. 3. Алгоритм функционирования метода узлового объекта  
Fig. 3. Algorithm of functioning of the node object method

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше структурные элементы исчисления систем как функциональных объектов формируют фундамент для дальнейших исследований, в частности – разработке элементарных операций на множествах узловых и потоковых объектов. Это позволит разработать алгоритмы качественной оптимизации системно-объектных моделей (приведения в соответствие общесистемным принципам и закономерностям), их верификации, что, в свою очередь, позволит автоматизировать процедуры системно-объектного моделирования.

### Список литературы

1. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. и др. Теория систем и системный анализ: учебник. Под ред. С.И. Маторина. – Москва; Берлин: Директмедиа Паблишинг. 2020. 509 с.
2. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцева Н.О. Имитационное моделирование с использованием системно-объектного подхода // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 6 (60). С. 91-104.
3. Abadi Martin and Luca Cardelli A Theory of Objects. – New York: Springer-Verlag, 1996. 397 p.
4. Matorin, S.I., Zhikharev, A.G. Calculation of the function objects as the systems formal theory basis // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. vol. 679. p. 182-191.
5. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Белов А.С. Системно-объектное моделирование технологических операций формирования комбинированного канального сигнала // Научный результат. Информационные технологии. 2019. Т.4. №4. С. 55-65.

### References

1. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A., etc. Systems theory and system analysis: textbook. Edited by S.I. Matorin. - Moscow; Berlin: Directmedia Publishing. 2020. 509 p.
2. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zaitseva N.O. Simulation modeling using a system-object approach // Applied Informatics. 2015. Vol. 10. No. 6 (60). pp. 91-104.
3. Abadi Martin and Luca Cardelli A Theory of Objects. – New York: Springer-Verlag, 1996. 397 p.
4. Matorin, S.I., Zhikharev, A.G. Calculation of the function objects as the systems format theory basic // Advance-es in Intelligent Systems and Computing. 2018. vol. 679. p. 182-191.
5. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Belov A.S. System-object modeling of technological operations of combined channel signal formation // Scientific result. Information technology. 2019. Vol.4. No. 4. pp. 55-65.

**Жихарев Александр Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

**Маматов Роман Александрович**, старший инспектор отделения организации службы ОМОН, Управление Росгвардии по Белгородской области

**Губкин Алексей Владимирович**, магистрант направления подготовки Машиностроение

**Игнатенко Павел Владимирович**, магистрант направления подготовки Машиностроение

**Zhikharev Alexander Gennadievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software

**Mamatov Roman Aleksandrovich**, Senior Inspector of the Department of Organization of the OMON Service, Rosgvardia Directorate for the Belgorod Region

**Gubkin Alexey Vladimirovich**, master's degree in the field of training Mechanical engineering

**Ignatenko Pavel Vladimirovich**, master's degree in the field of training Mechanical engineering