

## Особенности функционального моделирования сложных иерархических систем при различных способах организации управления исследуемыми процессами с целью выбора рациональной структуры системы

Н.В. Долгов<sup>1</sup>, В.А. Ильин<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Военный институт дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург, 195112, Россия

### Ссылка для цитирования

Долгов Н.В., Ильин В.А. Особенности функционального моделирования сложных иерархических систем при различных способах организации управления исследуемыми процессами с целью выбора рациональной структуры системы // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 4. С. 532–538. doi: 10.15827/0236-235X.148.532-538

### Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.7

Поступила в редакцию: 03.05.2024

После доработки: 27.06.2024

Принята к публикации: 05.08.2024

**Аннотация.** В представленном исследовании выполнен общий анализ функционального моделирования сложных иерархически организованных систем. В таких системах отдельные процессы разных уровней иерархии взаимодействуют друг с другом непосредственно, кроме функции управления соответствующей иерархии при различных способах организации управления. В статье рассмотрены сложные системы двухуровневой иерархии управления при централизованном, децентрализованном и сетцентрическом способах управления системами нижнего уровня иерархии. Также проанализированы несколько вариантов организации построения абстрактных иерархических процессов, представленных в нотации технологии IDEF0, и управления этими процессами. Данные процессы являются функциональными моделями сложных систем при различных способах управления. В ходе интерпретации функциональных моделей сложных систем при различных способах управления сформированы матрицы связей функций моделируемых процессов. Предложены математические зависимости для определения эффективности процесса функциональных моделей сложных систем при различных способах управления. Выполнен анализ функциональных моделей сложных систем и выявлена наиболее эффективная из них. Также доказано, что возрастание числа процедурных функций функциональных моделей ведет к уменьшению эффективности процессов, а увеличение прямых и обратных функциональных связей функциональных моделей – к ее увеличению.

**Ключевые слова:** функциональная модель, сложные иерархические системы, способы управления, эффективность функциональной модели, анализ, иерархия управления, технологии IDEF0

**Введение.** Постоянное усложнение систем, искусственных организационно-технических систем в первую очередь, создаваемых человеком в разных областях деятельности, привело не только к осознанию необходимости предвидеть результаты длительных и дорогостоящих работ по созданию таких систем, но и к поиску инструментария для этого. Поиск шел в направлении наработки способности увидеть и оценить функционирование разрабатываемой системы раньше, чем она будет создана физически.

Целью создания любой системы является ее функционирование. Характер функционирования системы в пределах ее морфологических возможностей определяется управлением работой системы. Именно особенности функционирования системы определяют и ее морфологию, и ее материально-информационные потоки.

Известно, что функциональная модель есть графическое представление функционирования систем и объектов [1]. Функциональная модель может использоваться как для анализа процессов протекающих в существующих си-

стемах, так и при проектировании новых систем для синтеза их структур [2]. Следует отметить, что анализ функциональных моделей в настоящее время выполняется на качественном уровне путем анализа структуры связей между отдельными функциями моделируемого процесса, сравнения различных структур процесса и процессов между собой. Незначительное количество имеющихся источников и документов по методологии функционального моделирования не приводят методов аналитического количественного анализа функциональных моделей и процессов ими описываемых, а приведенные источники относятся к базовым, что, в свою очередь, подчеркивает актуальность статьи, ее новизну и практическую значимость.

Функциональную модель, представленную в нотации технологии IDEF0 [2], можно рассматривать как оргграф и, следовательно, анализировать с помощью матрицы смежностей функций процесса между собой [3].

Эффективность процесса ( $E_n$ ) определяется как среднее арифметическое четырех коэффициентов: масштабного коэффициента процес-

са ( $K_m$ ), оценивающего количество функций в процессе; коэффициента связанности функций процесса ( $K_c$ ), оценивающего коммуникативность функций в процессе; коэффициента равномерности распределения функций в процессе ( $K_p$ ); коэффициента изолированности функций, определяющего общее число несвязанных функций, функций, не имеющих входов или выходов ( $K_u$ ) [3].

Сложные иерархические системы имеют многоуровневое взаимодействие между ее элементами. Система более высокого уровня выдвигает цель системе более низкого уровня, которая, в свою очередь, выступает как средство для реализации этой цели. Для функционирования системы эти цели и средства их реализации должны быть согласованы между собой [4].

Рассмотрим способы управления сложными системами [5]:

*Централизованный* способ управления обеспечивает использование всех функций и связей между отдельными функциями моделируемого процесса, при использовании единой функции управления на всех уровнях иерархии.

*Децентрализованное* управление предусматривает автономные действия отдельных функций без единого управления.

*Сетецентрическое управление* представляет собой матричный информационно-управляющий процесс, в основе которого лежит глобальная информационная взаимосвязь всех функций, интегрированных в единое информационное пространство.

Для сетецентрических систем характерна не только вертикальная интеграция между ее процессами, но и широко развитая сеть горизонтальных связей на одном и том же уровне управления между разнородными процессами системы, которые являются источниками и потребителями циркулирующей в системе информации.

Такие системы характеризуются принципами открытости, самоорганизации, слабой иерархии в контуре принятия решений и способностью порождать цели внутри себя [1].

При анализе сложных систем управления промоделируем каждый из способов более подробно. Моделирование процессов сложных систем выполним с использованием метода функционального моделирования [6–8].

Процесс действий сложных систем при *централизованном способе управления* представлен на рисунке 1 в нотации технологии IDEF0. Процесс включает в себя шесть процедурных функций (A1...A6), выполняющих, например,

обработку информации, и одну специфическую функцию управления процессом (A0), связанные между собой прямыми и обратными функциональными связями. Процесс имеет два входа из внешней среды (может быть из другого процесса – Out1, Out2) и два выхода во внешнюю среду (во внешние процессы – In1, In2). Как видим, входы из внешней среды осуществляется через функцию A1, A4, обеспечивающую обработку входной информации и ее передачу другим функциям. Выходы во внешнюю среду осуществляется функциями A3, A6, которые, решают основные задачи процесса, остальные функции выполняют обеспечивающие задачи [9]. Следует заметить, что количество входов и выходов в общем случае может быть любым и определяется только структурой исследуемого процесса [3].

Интерпретируя функциональную модель как оргграф, сформируем матрицу связей функций моделируемого процесса (табл. 1). В матрице по строкам единицами и нулями записаны входы в функции, по столбцам соответственно получаем выходы из функций. Суммы входов по строкам и выходов по столбцам позволяют ранжировать функции по степени важности в исследуемом процессе. Общая сумма входов и выходов дает возможность сравнивать структуры одного процесса и разные процессы по их сложности [3].

Таблица 1

**Матрица связей функциональной модели действий сложных систем при централизованном способе управления**

Table 1

**Relationship matrix of functional model of complex systems actions under centralized control method**

	Out1-2	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	In1-2	$\Sigma in$
Out1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Out2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
A0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	6
A1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	3
A2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
A3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
A4	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
A5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
A6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
In1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
In2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$\Sigma out$	0	1	2	2	4	4	2	4	0	19

По матрице связей выполним расчет коэффициентов и эффективности процесса.

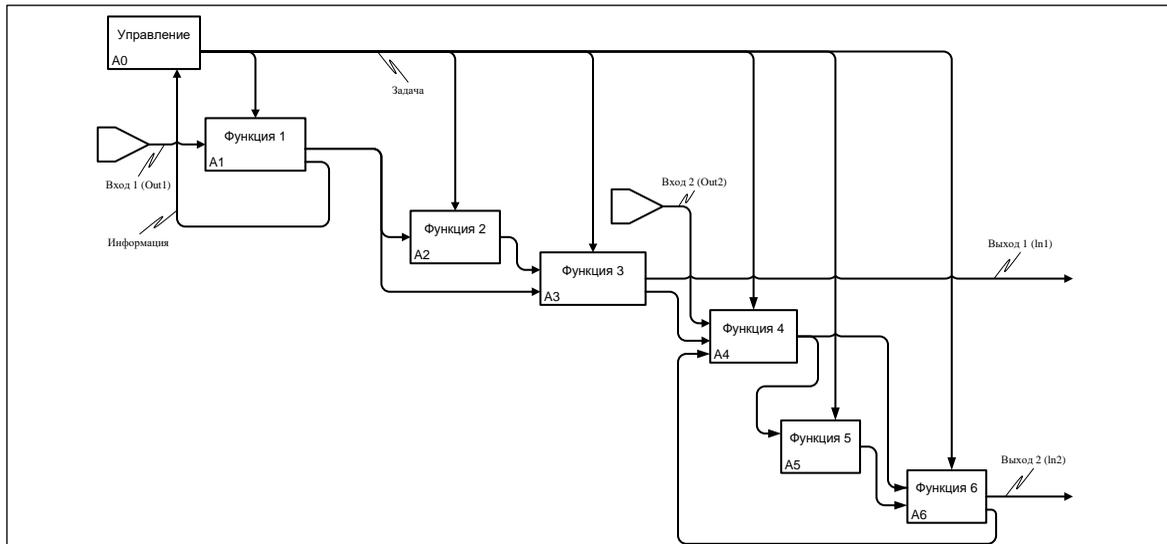


Рис. 1. Функциональная модель сложных систем при централизованном способе управления в нотации IDEF0

Fig. 1. Functional model of complex systems with centralized control method in IDEF0 notation

Масштабный коэффициент процесса. Общее количество функций  $f_{\Sigma} = 6$ , тогда

$$K_m = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{f_{\Sigma}}\right)} = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{6}\right)} = 1 - e^{-0,6666} = 0,4865.$$

Коэффициент связанности функций процесса.

Общее число связей, то есть число единиц в матрице  $S_{\Sigma} = 19$ , тогда

$$K_c = e^{-\left[1 - \frac{S_{\Sigma}}{f_{\Sigma}(f_{\Sigma}-1)}\right]} = e^{-\left[1 - \frac{19}{6(6-1)}\right]} = e^{-0,3666} = 0,693.$$

Коэффициент равномерности распределения функций в процессе.

Среднее число входных связей  $\overline{in} = 8$ ; среднее число выходных связей  $\overline{out} = 12$ :

$$K_p = e^{-\frac{\sum |in-out|}{2S_{\Sigma}}} = e^{-\frac{|19-8|-|19-12|}{2*19}} = e^{-0,1052} = 0,9.$$

Коэффициент изолированности функций.

Число пустых строк  $n_{стр} = 0$ , число пустых столбцов  $n_{стол} = 4$ , тогда

$$K_u = e^{-\frac{n_{стр} + n_{стол}}{2f_{\Sigma}}} = e^{-\frac{0+4}{2*6}} = e^{-0,3333} = 0,7165.$$

Эффективность процесса:

$$\mathcal{E}_n = \frac{K_m + K_c + K_p + K_u}{4} = \frac{0,4865 + 0,693 + 0,9 + 0,7165}{4} = 0,699.$$

Процесс действий сложных систем при децентрализованном способе управления пред-

ставлен на рисунке 2 в нотации технологии IDEF0. Он включает в себя шесть процедурных функций (A1...A6), выполняющих обработку информации, связанных между собой прямыми и обратными функциональными связями. Остальные действия выполняются так же, как и при централизованном способе управления.

Интерпретируя функциональную модель как оргграф, сформируем матрицу связей функций моделируемого процесса (табл. 2).

Таблица 2

Матрица связей функциональной модели действий сложных систем при децентрализованном способе управления

Table 2

Relationship matrix of the complex systems' functional model of actions under decentralized control method

	Out1-2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	In1-2	$\Sigma in$
Out1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Out2	0	0	0	0	1	0	0	0	1
A1	0	0	1	1	0	0	0	0	2
A2	0	0	0	1	0	0	0	0	1
A3	0	0	0	0	1	0	0	0	1
A4	0	0	0	0	0	1	1	0	2
A5	0	0	0	0	0	0	1	0	1
A6	0	0	0	0	1	0	0	0	1
In1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
In2	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$\Sigma out$	0	1	1	3	3	1	3	0	12

По матрице связей (табл. 2) выполним расчет коэффициентов и эффективности процесса.

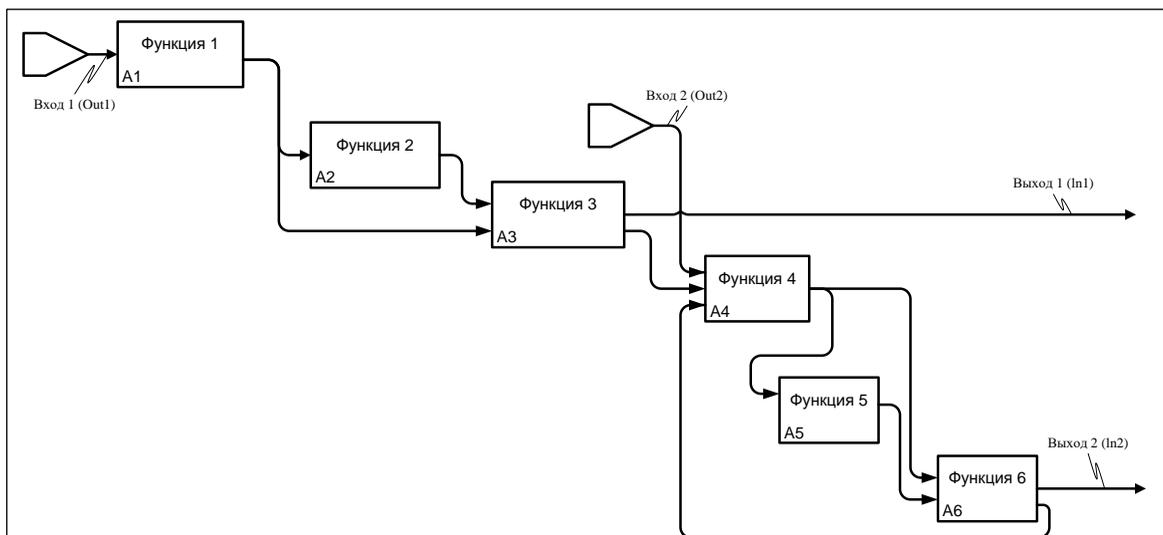


Рис. 2. Функциональная модель сложных систем при децентрализованном способе управления в нотации IDEF0

Fig. 2. Functional model of complex systems with decentralized control method in IDEF0 notation

Масштабный коэффициент процесса.

Общее количество функций  $f_{\Sigma} = 6$ , тогда

$$K_m = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{f_{\Sigma}}\right)} = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{6}\right)} = 1 - e^{-0.6666} = 0,4865.$$

Коэффициент связанности функций процесса.

Общее число связей, то есть число единиц в матрице  $S_{\Sigma} = 12$ , тогда

$$K_c = e^{-\left[1 - \frac{S_{\Sigma}}{f_{\Sigma}(f_{\Sigma}-1)}\right]} = e^{-\left[1 - \frac{12}{6(6-1)}\right]} = e^{-0.6} = 0,5488.$$

Коэффициент равномерности распределения функций в процессе.

Среднее число входных связей  $\bar{in} = 2$ ; среднее число выходных связей  $\bar{out} = 6$ :

$$K_p = e^{-\frac{\sum_f |\Sigma in - \bar{in}| - \sum_f |\Sigma out - \bar{out}|}{2 \cdot S_{\Sigma}}} = e^{-\frac{|12-2| - |12-6|}{2 \cdot 12}} = e^{-0.1666} = 0,8464.$$

Коэффициент изолированности функций.

Число пустых строк  $n_{стр} = 0$ , число пустых столбцов  $n_{стол} = 4$ , тогда

$$K_u = e^{-\frac{n_{стр} + n_{стол}}{2 \cdot f_{\Sigma}}} = e^{-\frac{0+4}{2 \cdot 6}} = e^{-0.3333} = 0,7165.$$

Эффективность процесса:

$$\mathcal{E}_n = \frac{K_m + K_c + K_p + K_u}{4} = \frac{0,4865 + 0,5488 + 0,8464 + 0,7165}{4} = 0,6496.$$

Процесс действий сложных систем при сетцентрическом способе управления представлен на рисунке 3 в нотации технологии IDEF0.

Процесс включает в себя шесть процедурных функций (A1...A6), выполняющих, например, обработку информации, связанных между собой прямыми и обратными функциональными связями. Остальные действия выполняются так же, как и при централизованном способе управления.

Интерпретируя функциональную модель как орграф, сформируем матрицу связей функций моделируемого процесса, представленную в таблице 3.

Таблица 3

Матрица связей функциональной модели действий сложных систем при сетцентрическом способе управления  
Table 3  
Relationship matrix of the complex systems' functional model of actions under the network-centric management method

	Out1-2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	In1-2	$\Sigma in$
Out1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Out2	0	0	0	0	1	0	0	0	1
A1	0	0	1	1	0	0	0	0	2
A2	0	1	0	1	0	0	0	0	2
A3	0	1	1	0	1	0	0	0	3
A4	0	1	0	0	0	1	1	0	3
A5	0	1	0	0	1	0	1	0	3
A6	0	1	0	0	1	1	0	0	3
In1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
In2	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$\Sigma out$	0	6	2	3	4	2	3	0	20

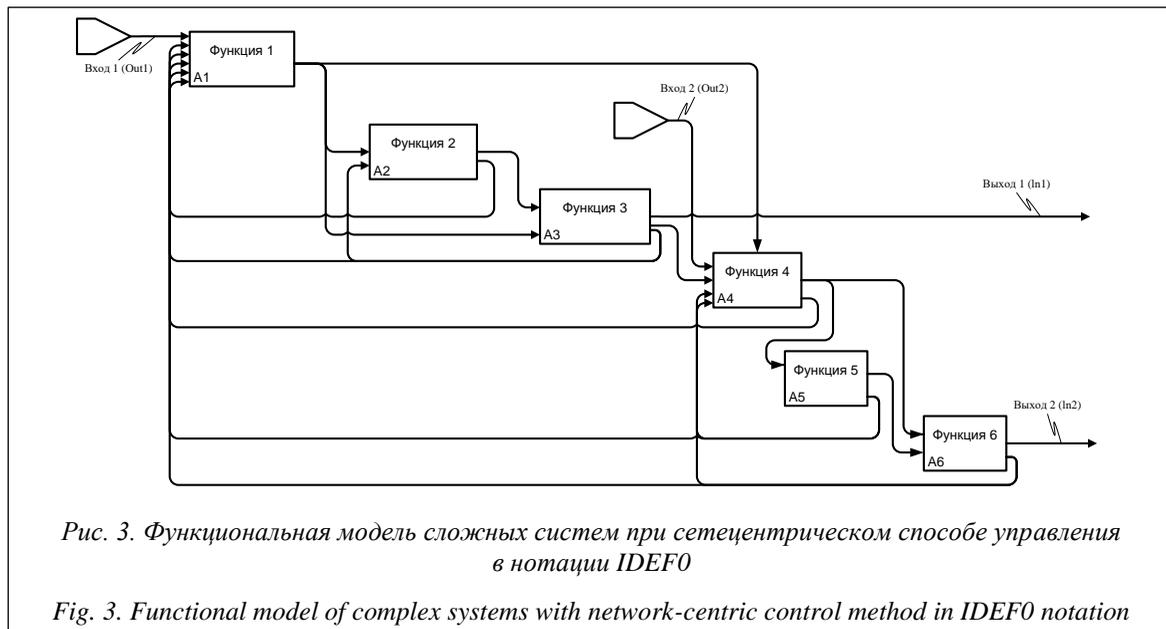


Рис. 3. Функциональная модель сложных систем при сетцецентрическом способе управления в нотации IDEF0

Fig. 3. Functional model of complex systems with network-centric control method in IDEF0 notation

По матрице связей (табл. 3) выполним расчет коэффициентов и эффективности процесса.

*Масштабный коэффициент процесса.*  
Общее количество функций  $f_{\Sigma} = 6$ , тогда

$$K_m = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{f_{\Sigma}}\right)} = 1 - e^{-\left(1 - \frac{2}{6}\right)} = 1 - e^{-0,6666} = 0,4865.$$

*Коэффициент связанности функций процесса.*

Общее число связей, то есть число единиц в матрице  $S_{\Sigma} = 20$ , тогда

$$K_c = e^{-\left[1 - \frac{S_{\Sigma}}{f_{\Sigma}(f_{\Sigma}-1)}\right]} = e^{-\left[1 - \frac{20}{6(6-1)}\right]} = e^{-0,3333} = 0,7165.$$

*Коэффициент равномерности распределения функций в процессе.*

Среднее число входных связей  $\overline{in} = 10$ ; среднее число выходных связей  $\overline{out} = 14$ :

$$K_p = e^{-\frac{\sum_f |\sum in - \overline{in}| + \sum_f |\sum out - \overline{out}|}{2S_{\Sigma}}} = e^{-\frac{|20-10| + |20-14|}{2*20}} = e^{-0,1} = 0,9048.$$

*Коэффициент изолированности функций.*

Число пустых строк  $n_{стр} = 0$ , число пустых столбцов  $n_{стол} = 4$ , тогда

$$K_u = e^{-\frac{n_{стр} + n_{стол}}{2f_{\Sigma}}} = e^{-\frac{0+4}{2*6}} = e^{-0,3333} = 0,7165.$$

*Эффективность процесса:*

$$\mathcal{E}_n = \frac{K_m + K_c + K_p + K_u}{4} = \frac{0,4865 + 0,7165 + 0,9048 + 0,7165}{4} = 0,7061.$$

Расчет эффективности процессов функциональных моделей действий сложных систем в данном примере при различных способах управления при одинаковом числе функций позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным является сетцецентрический способ управления.

### Заключение

В статье выполнен общий анализ функционального моделирования сложных систем при различных способах управления и выполнен расчет эффективности способов.

Предложенный метод позволяет количественно оценить эффективность систем и выбрать наиболее рациональную организацию процессов управления и функционирования сложных систем.

Также доказано, что возрастание числа процедурных функций функциональных моделей ведет к уменьшению эффективности процессов, а увеличение прямых и обратных функциональных связей функциональных моделей способствует ее увеличению.

### Список литературы

1. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с.
2. Дубейковский В.И. Практика функционального моделирования с AllFusion Process Modeler. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 464 с.

3. Ильин В.А., Янча С.П. Методы анализа функциональных моделей // Программные продукты и системы. 2009. Т. 22. № 4. С. 32–34.
4. Шпак В.Ф., Директоров Н.Ф., Мирошников В.И. и др. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ. СПб: Элмор, 2005. 827 с.
5. Ильин В.А., Козлов И.Л. К проблеме автоматизации управления силами и средствами, функциональное моделирование // Автоматизация процессов управления. 2009. № 4. С. 53–57.
6. Тебекин А. В. Методология функционального моделирования сложных технических систем модульного типа // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 2. С. 3–12.
7. Тебекин А.В., Тебекин П.А., Егорова А.А. Технологические трансформации XXI века как индуцирующий вектор перехода к новому качеству производства // Теоретическая экономика. 2021. № 1. С. 42–53.
8. Тебекин А.В., Петров В.С. Использование методологии моделирования IDEF при формировании структурно-параметрической модели реализации технологий обеспечения эффективного развития промышленных предприятий в условиях постиндустриальной экономики // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 43–49.
9. Харари Ф. Теория графов; [пер. с англ.]. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 296 с.

Software &amp; Systems

doi: 10.15827/0236-235X.148.532-538

2024, 37(4), pp. 532–538

### Features of functional modeling of complex hierarchical systems with different ways of organizing the control of the study processes for the purpose of selecting a rational system structure

Nikolay V. Dolgov<sup>1</sup>, Viktor A. Ilin<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Military Institute of Continuing Professional Education of the VUNTS Navy "Naval Academy", St. Petersburg, 195112, Russian Federation

#### For citation

Dolgov, N.V., Ilin, V.A. (2024) 'Features of functional modeling of complex hierarchical systems with different ways of organizing the control of the study processes for the purpose of selecting a rational system structure', *Software & Systems*, 37(4), pp. 532–538 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.148.532-538

#### Article info

Received: 03.05.2024

After revision: 27.06.2024

Accepted: 05.08.2024

**Abstract.** The paper presents a general analysis of functional modeling of complex hierarchically organized systems. In such systems, individual processes of hierarchy levels interact with each other directly, except for the control function of the corresponding hierarchy at different ways of control organization. The paper considers complex systems of two-level hierarchy of control at centralized, decentralized and network-centric ways of controlling the lower level systems of the hierarchy. The authors also analyzed several options for organizing the construction of abstract hierarchical processes represented in the notation of IDEF0 technology and management of these processes. These processes are functional models of complex systems at different methods of control. During the interpretation of complex systems functional models at different methods of control, the authors formed the function relationship matrices of the modeled processes. The authors proposed mathematical dependencies for determining the process efficiency of complex systems functional models under different methods of control. They analyzed the functional models of complex systems and identified the most efficient one. They also proved that increasing the number of procedural functions of functional models leads to a decrease in process efficiency. However, increasing the forward and backward functional relationships of functional models leads to an increase in the efficiency of processes.

**Keywords** functional model, complex hierarchically systems, ways of control, efficiency of a functional model, analysis, control hierarchy, IDEF0 technologies

#### References

1. Cheremnykh, S.V., Semenov, I.O., Ruchkin, V.S. (2006) *Modeling and Analysis of Systems. IDEF Technologies*. Moscow, 191 p. (in Russ.).
2. Dubeykovskiy, V.I. (2004) *Practice Functional Modeling with AllFusion Process Modeler*. Moscow, 464 p. (in Russ.).
3. Ilin, V.A., Yancha, S.P. (2009) 'Methods analysis of functional models', *Software & Systems*, 22(4), pp. 32–34 (in Russ.).
4. Shpak, V.F., Direktorov, N.F., Miroshnikov, V.I. (2005) *Information Technologies in the Navy Force Management System*. St. Petersburg, 827 p. (in Russ.).

5. Пыин V.A., Kozlov I.L. 2009. On the problem of automation of control of forces and means, functional modeling', *Automation of Control Processes*, 4(18), pp. 53–57.
6. Tebekin, A.V. (2021) 'Methodology for functional modeling of complex technical systems of modular type', *J. of Tech. Research*, 7(2), pp. 3–12 (in Russ.).
7. Tebekin, A.V., Tebekin, P.A., Egorova, A.A. (2021) 'Technological transformations of the 21st century as an inducing vector of transition to a new quality of production', *Theoretical Economics*, (1), pp. 42–53 (in Russ.).
8. Tebekin, A.V., Petrov, V.S. (2017) 'Using the modeling methodology IDEF in the formation of structural-parametric model for the implementation of technology ensure the efficient development of industrial enterprises in the condition of postindustrial economy', *Transport Business of Russia*, (4), pp. 43–49 (in Russ.).
9. Harari, F. (1972) *Graph Theory*. Basic Books Publ., 274 p. (Russ. ed.: (2009) Moscow, 296 p.).

**Авторы**

**Долгов Николай Валерьевич**<sup>1</sup>,

адъюнкт, d\_n\_v92@mail.ru

**Ильин Виктор Алексеевич**<sup>1</sup>, д.в.н.,

профессор, профессор кафедры,

vikil.45@yandex.ru

**Authors**

**Nikolay V. Dolgov**<sup>1</sup>, Adjunct,

d\_n\_v92@mail.ru

**Viktor A. Ilin**<sup>1</sup>, Dr.Sci. (Military Sciences),

Professor, Professor of the Department,

vikil.45@yandex.ru

<sup>1</sup> Военный институт дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург, 195112, Россия

<sup>1</sup> Military Institute of Continuing Professional Education of the VUNTS Navy "Naval Academy", St. Petersburg, 195112, Russian Federation