

УДК 681.324(031)

## МЕТОД ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ PFDD-ДИАГРАММ IDEF3-ТЕХНОЛОГИИ

Г. С. Бритов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** представить разработанный метод формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии моделирования технологических процессов в различных объектах, в частности, в системах технического диагностирования, отличающийся от известных методов, основанных на использовании конкретных примеров, тем, что применяются строгие математические понятия общего вида. **Методы:** использована теория бинарных отношений, позволившая понятным и удобным образом описать процесс технологического моделирования по IDEF3-технологии. **Результаты:** разработан метод формального описания диаграмм сценариев технологических процессов (PFDD-диаграмм), используемых в стандартной IDEF3-технологии. Суть метода в том, что с помощью инструментов теории бинарных отношений строятся все необходимые понятия IDEF3-технологии. Благодаря этому процесс технологического моделирования описывается в общем виде на основе предложенных математических формул, которые определяют понятие технологической модели, построенной из также формально определенных PFDD-диаграмм. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют быстро и достаточно просто понять принципы IDEF3-технологии и применить ее для своих конкретных примеров. В статье это сделано для систем технического диагностирования.

**Ключевые слова** — технологический процесс, IDEF3-технология, PFDD-диаграмма, технологическая модель, четырехместное отношение, проекция отношения, сечение отношения, дерево декомпозиции, дерево узлов.

### Введение

Стандарт IDEF3 является составной частью комплекса IDEF и решает задачи технологического моделирования различных процессов, которое подразумевает создание сценариев и описания последовательности операций каждого моделируемого процесса [1, 2]. Для разработки технологических сценариев предназначена IDEF3-технология, которая успешно реализована на базе CASE-средства BPWin [3, 4].

IDEF3-технология используется для описания последовательностей и логики взаимодействия операций и событий в моделируемом процессе. Она обеспечивает разработчика принципами структурированного подхода и графическим языком для наглядного представления событий и действий моделируемого процесса.

Для описания последовательности операций технологического процесса в IDEF3-технологии определены PFDD-диаграммы (*Process Flow Description Diagrams*). Они представляют собой диаграммы потокового описания процесса. Во всех работах, посвященных IDEF3-технологии, PFDD-диаграммы описываются с помощью примеров. Поэтому для понимания принципов их построения сначала необходимо разобраться в тонкостях предлагаемых примеров. С другой стороны, PFDD-диаграммы строятся именно для этого [5, 6].

Целью статьи является разработка метода формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии. Аналогичный метод был разработан для формализованного описания диаграмм функционального моделирования IDEF0-технологии [7].

### Формальное определение PFDD-диаграмм

Для того чтобы получить формальное определение PFDD-диаграммы, зададим три множества:

- 1)  $W$  — множество единиц работы или операций;
- 2)  $C$  — множество связей между ними;
- 3)  $R$  — множество ссылок, определяющих исполнителей и ресурсы процесса.

Множество связей состоит из двух подмножеств:

$$C = C_s \cup C_f,$$

где  $C_s$  — множество связей, определяющих последовательность следования одной операции за другой;  $C_f$  — множество связей, показывающих переход потока от одной операции к другой. Следует отметить, что потоки могут быть материальными, сигнальными, финансовыми, людскими и т. д. Такую технологическую модель будем называть потоковой. А при использовании связей типа последовательности — последовательностной технологической моделью. Однако могут быть и смешанные технологические модели, содержащие и потоковые, и последовательностные связи.

Теперь можно дать формальное определение конкретной PFDD-диаграммы как четырехместного отношения [8]:

$$\tau_j = C \times W \times C \times R.$$

Элемент диаграммы представляет собой четверку вида:

— для последовательностной модели

$$\tau_{ji} = (C_{sk}, W_i, C_{sr}, R_m);$$

— для потоковой модели

$$\tau_{ji} = (C_{fk}, W_i, C_{fr}, R_m).$$

Оба этих элемента представлены в условных обозначениях стандарта IDEF3 (рис. 1).

Множество PFDD-диаграмм образует технологическую модель

$$\tau = \{\tau_j\} = C \times W \times C \times R.$$

Для технологической модели с помощью проекций отношения можно выполнить структуризацию связей:

- входные связи  $Pr_1\tau = C_{вх} \subset C$ ;
- выходные связи  $Pr_3\tau = C_{вых} \subset C$ ;
- внутренние связи  $C_{вн} = C_{вх} \cap C_{вых}$ .

Для технологической модели с помощью сечений отношения можно получить полную информацию, например, о конкретной операции:

$$Sc_{W_i} = C_{вх} \times C_{вых} \times R.$$

Здесь для данной операции описаны ее входы, выходы и исполнители.

Технологическая модель как множество упорядочена с помощью бинарного отношения

$$\rho = \tau \times \tau.$$

Описывающий это отношение граф можно назвать деревом декомпозиции, так как он имеет вершину — контекстную диаграмму и ветви — диаграммы декомпозиции. Представить дерево декомпозиции целесообразно с помощью сечений [9]:

$Pr_1\rho$	$\tau_0$	$\tau_1$
$\tau/\rho$	$\{\tau_1\}$	$\{\tau_2, \tau_3\}$

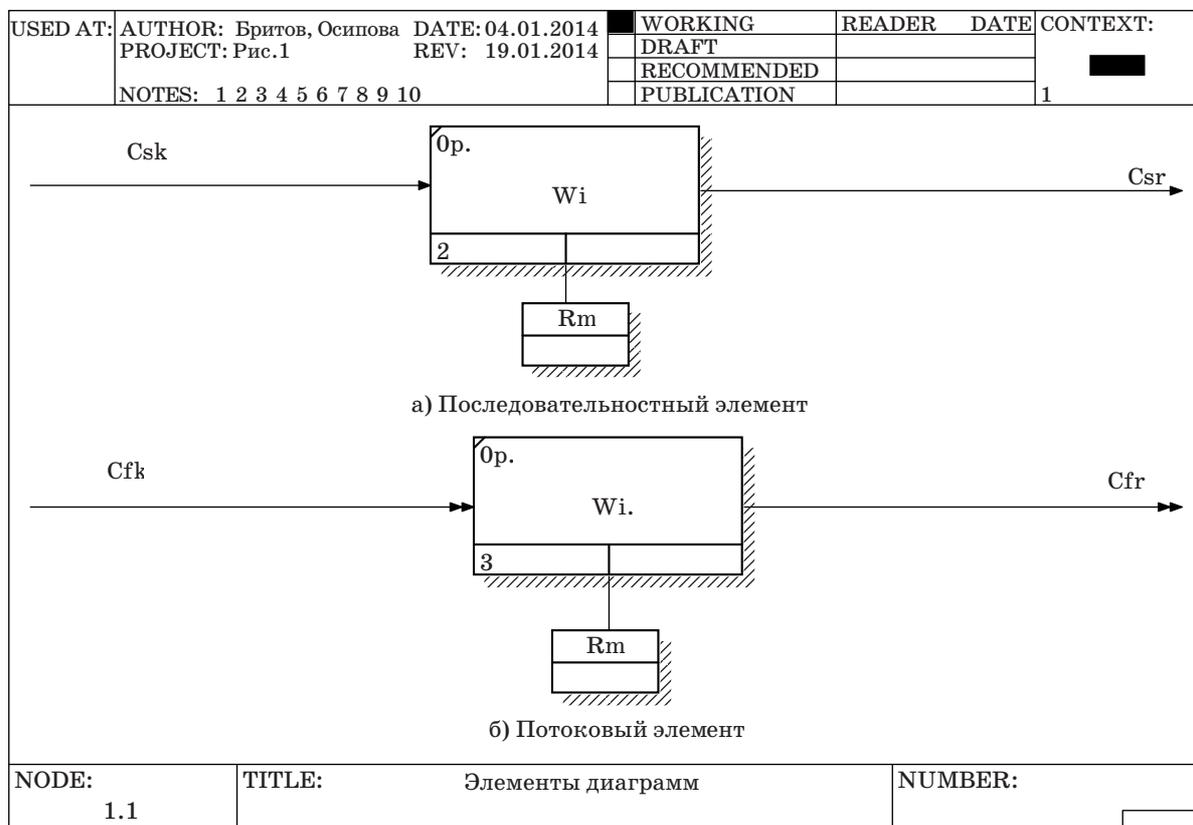
Контекстная диаграмма  $\tau_0$  связана с диаграммой  $\tau_1$  второго уровня декомпозиции, а она порождает две диаграммы  $\tau_2, \tau_3$  третьего уровня.

Стандарт IDEF3 определяет и реализует в CASE-средстве *BPWin* более информативное дерево узлов для бинарного отношения  $\sigma = W \times W$ .

Сечения дерева узлов могут иметь следующий вид:

$Pr_1\sigma$	$W_0$	$W_1$	$W_2$
$W/\sigma$	$\{W_1, W_2\}$	$\{W_3, W_4\}$	$\{W_5, W_6\}$

Здесь дерево узлов является бинарным графом-деревом, в котором каждая операция декомпозируется на две операции нижнего уровня. Несомненно, наблюдать за декомпозицией операций полезнее, чем за декомпозицией диаграмм.



■ Рис. 1. Элементы PFDD-диаграммы

**Виды PFDD-диаграмм**

Вид PFDD-диаграммы зависит от характера моделируемого технологического процесса. Предложенное описание PFDD-диаграммы позволяет формально рассмотреть различные виды диаграмм.

Самым простым технологическим процессом является цепочка операций. На рис. 2 показан пример цепочки из трех операций.

Отношение последовательностной цепочки задается четверками вида

$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (C_{s1}, W_2, C_{s2}, R_2), (C_{s2}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потоковой цепочки задается четверками вида

$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (C_{f1}, W_2, C_{f2}, R_2), (C_{f2}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для цепочек выполняется условие

$$\exists W_i, W_j \in W \text{ Pr}_3 Sc_{W_i} \tau_1 = \text{Pr}_1 Sc_{W_j} \tau_1.$$

Для примера, показанного на рис. 2, а), получим

$$\text{Pr}_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; \text{Pr}_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s2}.$$

Это означает, что выход операции  $W_2$  является входом операции  $W_3$ . Если бы цепочка операций была длиннее, то указанных условий было бы больше.

В технологических процессах обычно осуществляются разветвления. Они связаны с необходимостью выполнять после конкретной операции одну или другую операцию в зависимости от ситуации. Стандарт IDEF3 определяет условные обозначения для разветвлений типа перекресток. Типы перекрестков-разветвлений хорошо описаны в работе [4]. На рис. 3 показаны два типа разветвлений.

Отношение последовательностного O-разветвления задается четверками вида

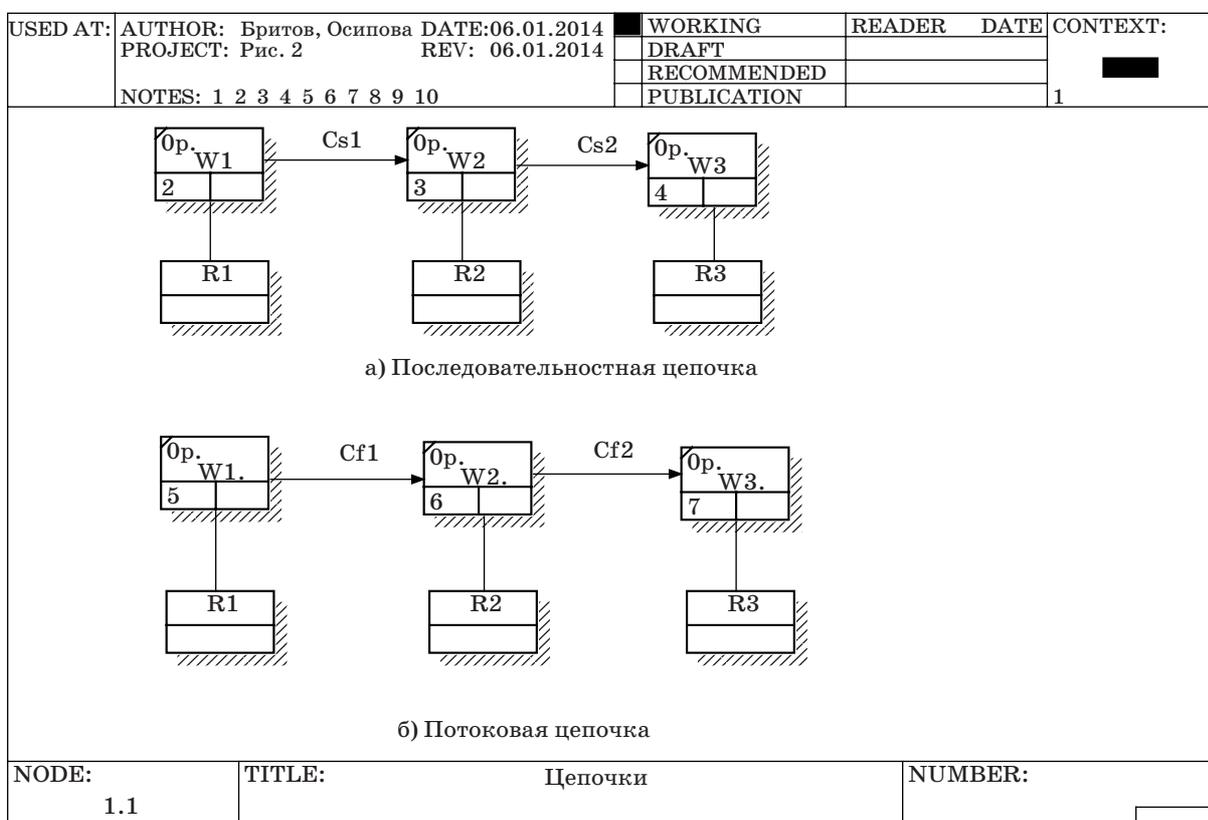
$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (C_{s2}, W_2, \emptyset, R_2), (C_{s3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потокового &-разветвления задается четверками вида

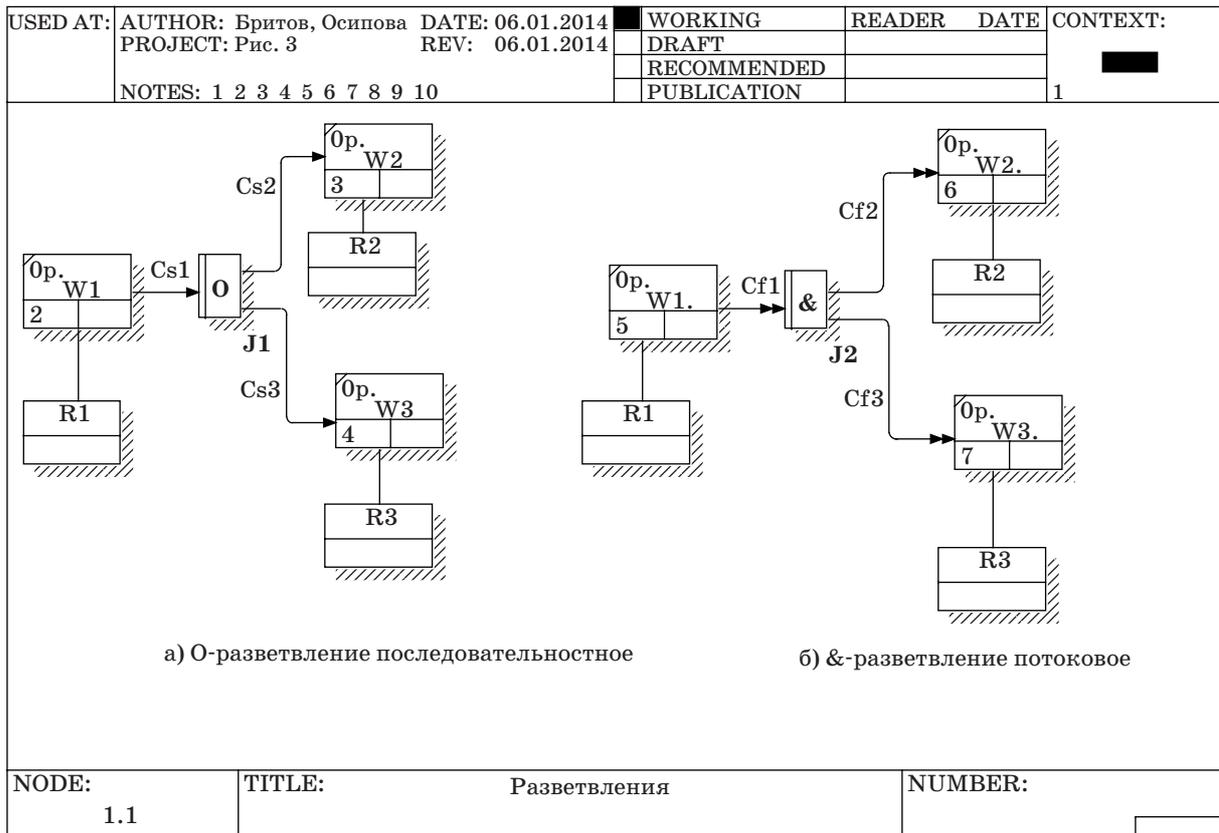
$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (C_{f2}, W_2, \emptyset, R_2), (C_{f3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для разветвлений выполняется условие

$$\exists W_i, W_j, W_k : \text{Pr}_3 Sc_{W_i} \tau_1 = \text{Pr}_1 Sc_{W_j} \tau_1 \cup \text{Pr}_1 Sc_{W_k} \tau_1.$$



■ Рис. 2. Технологические процессы типа цепочки



■ Рис. 3. Разветвленные технологические процессы

Для примера, показанного на рис. 3, а), получим

$$\begin{aligned} Pr_3 Sc_{W_1} \tau_1 = C_{s1}; Pr_1 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; \\ Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s3}; C_{s1} = C_{s2} \cup C_{s3}. \end{aligned}$$

Это означает, что выход операции  $W_1$  является объединением входов операций  $W_2$  и  $W_3$ . Другими словами, выход операции  $W_1$  разветвляется на два входа соответствующих операций. Очевидно, что разветвлений может быть больше.

В технологических процессах возможны слияния. Они связаны с необходимостью выполнять после нескольких конкретных операций одну следующую операцию. Стандарт IDEF3 определяет условные обозначения для слияний типа перекресток. Типы перекрестков-слияний представлены в работе [4]. На рис. 4 показаны два типа слияний.

Отношение последовательного O-слияния задается четверками вида

$$\tau_1 = \{(\emptyset, W_1, C_{s1}, R_1), (\emptyset, W_2, C_{s2}, R_2), (C_{s3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Отношение потокового &-слияния задается четверками вида

$$\tau_2 = \{(\emptyset, W_1, C_{f1}, R_1), (\emptyset, W_2, C_{f2}, R_2), (C_{f3}, W_3, \emptyset, R_3)\}.$$

Нетрудно убедиться, что для слияний выполняется условие

$$\exists W_i, W_j, W_k : Pr_1 Sc_{W_i} \tau_1 = Pr_3 Sc_{W_j} \tau_1 \cup Pr_3 Sc_{W_k} \tau_1.$$

Для примера, показанного на рис. 4, а), получим

$$\begin{aligned} Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 = C_{s3}; Pr_3 Sc_{W_1} \tau_1 = C_{s1}; \\ Pr_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{s2}; C_{s3} = C_{s1} \cup C_{s2}. \end{aligned}$$

Это означает, что вход операции  $W_3$  является объединением выходов операций  $W_1$  и  $W_2$ . Другими словами, вход операции  $W_3$  является слиянием двух выходов соответствующих операций. Очевидно, что таких слияний может быть больше.

В технологических процессах возможны «узкие места». Они могут быть связаны с появлением обратных связей. Стандарт IDEF3 определяет условное обозначение для разветвления типа X-перекресток [4]. С его помощью моделируется обратная связь (рис. 5).

Из диаграммы, показанной на рис. 5, следует, что условия существования обратной связи соответствуют одновременному выполнению условий существования X-разветвления и O-слияния для операций, участвующих в обратной связи.



Для примера, показанного на рис. 5, получим

$$\begin{aligned} Pr_1 Sc_{W_3} \tau_1 &= C_{f2}; Pr_3 Sc_{W_2} \tau_1 = C_{f1}; \\ Pr_3 Sc_{W_3} \tau_1 &= C_{f3}; Pr_1 Sc_{W_4} \tau_1 = C_{f4}; \\ C_{f3} &= C_{f4} \cup C_{s2}, C_{f2} = C_{f1} \cup C_{s2}. \end{aligned}$$

Это означает, что выход операции  $W_3$  является объединением входа операции  $W_4$  и выхода  $C_{s2}$ , а вход операции  $W_3$  является объединением выхода операции  $W_2$  и выхода  $C_{s2}$ . Другими словами, выход операции  $W_3$  разветвляется на вход операции  $W_4$  и выход  $C_{s2}$ , а на входе операции  $W_3$  происходит слияние выхода операции  $W_2$  и выхода  $C_{s2}$ .

Таким образом, формальное описание PFDD-диаграмм дает возможность не только получить общее представление об этом инструменте моделирования технологических процессов, но и формально описать возможные виды процессов. Опираясь на формальное описание PFDD-диаграммы, можно выполнить вероятностный анализ исследуемого объекта [10].

**Моделирование технологических процессов в системах технического диагностирования**

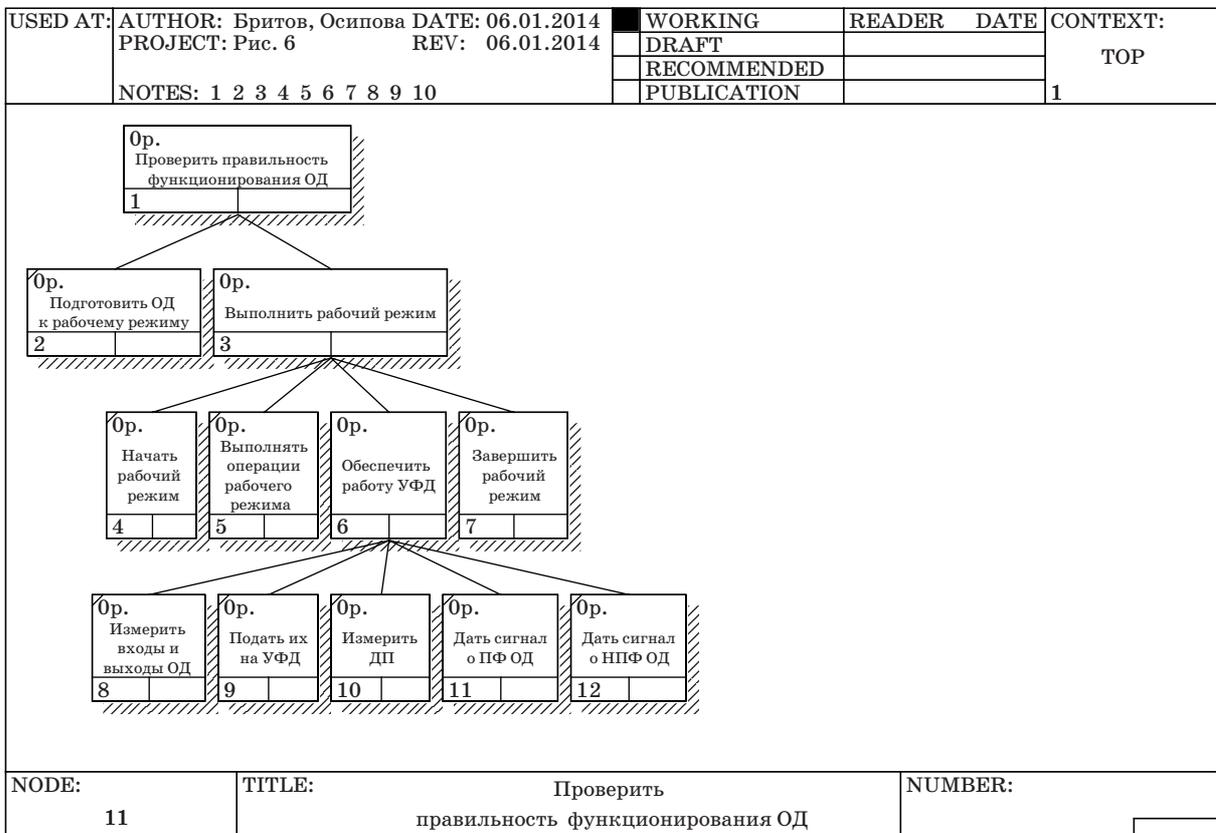
Системы технического диагностирования предназначены для определения технического состо-

яния объекта диагностирования (ОД). Они решают две задачи:

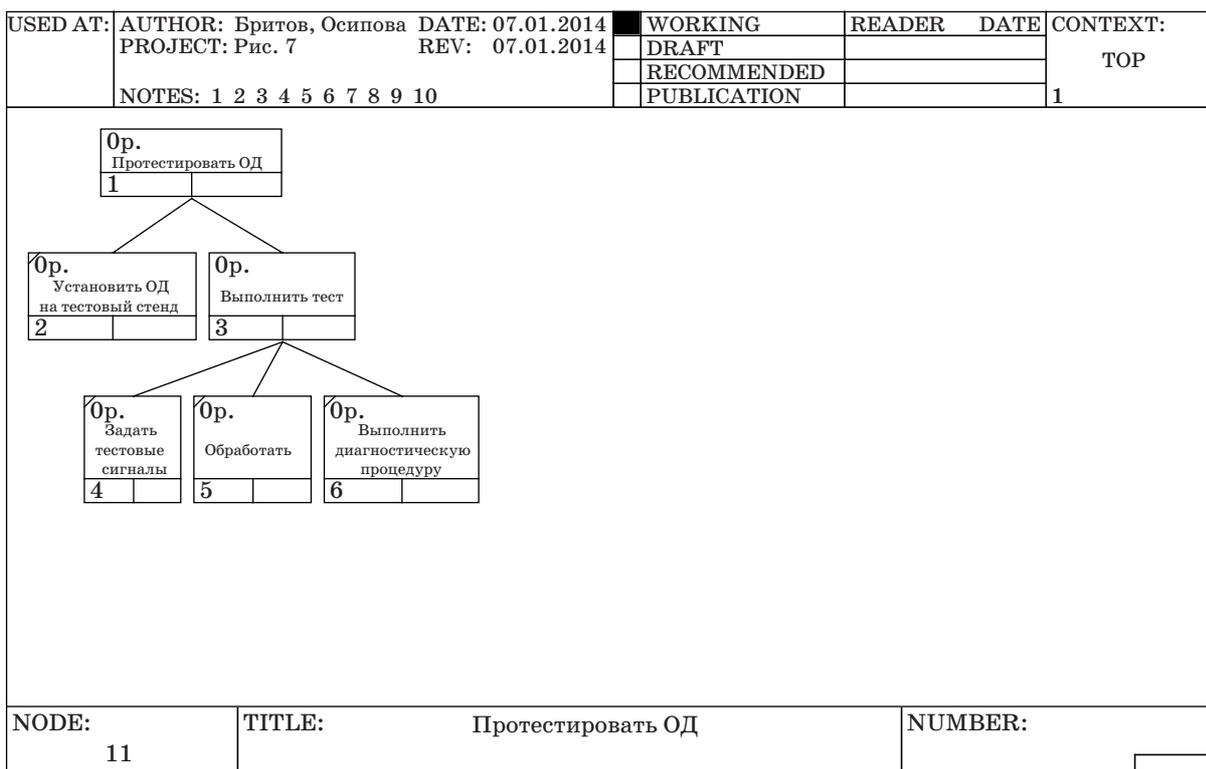
- определение правильного функционирования ОД [11, 12],
- тестирование ОД, фиксирующее его исправность или работоспособность [13].

Система технического диагностирования, решающая первую задачу, строится с использованием устройства функционального диагностирования. Его расчет для ОД вида линейной системы автоматического управления приведен в работе [14]. В рабочем режиме ОД с помощью устройства функционального диагностирования формируется диагностический признак, который позволяет определить, правильно или неправильно функционирует ОД. В процессе моделирования такой системы функционального диагностирования были построены четыре PFDD-диаграммы, образующие четырехуровневое дерево декомпозиции технологической модели системы функционального диагностирования типа цепочки. Дерево узлов технологической модели системы функционального диагностирования показано на рис. 6.

Система технического диагностирования, решающая вторую задачу, основана на расчете специального тестового режима, результаты которого должны быть известны. Другой вариант системы



■ Рис. 6. Дерево узлов системы функционального диагностирования: УФД — устройство функционального диагностирования; ДП — диагностический признак; ПФ, НПФ — правильное и неправильное функционирование



■ Рис. 7. Дерево узлов системы тестового диагностирования

тестового диагностирования связан с расчетом специального тестера, который вводит ОД в тестовый режим. Расчет такого тестера для ОД типа линейной системы управления приведен в работе [15].

Для системы тестового диагностирования была построена технологическая модель, включающая три PFDD-диаграммы. Они образуют трехуровневое дерево декомпозиции типа цепочки. Дерево узлов технологической модели системы тестового диагностирования показано на рис. 7. При построении модели полагалось, что для тестового диагностирования для ОД рассчитывается тестовый режим. Он должен быть реализован с помощью тестового стенда, на который устанавливается ОД. Тестовые сигналы подаются на ОД, обрабатываются и поступают в диагностическую процедуру. Здесь формируются результаты тестирования, определяющие, есть дефекты в ОД или их нет.

В статье не приводятся сами PFDD-диаграммы систем функционального и тестового диагностирования, так как они требуют слишком много

места. Кроме того, их подробное изучение может быть интересно небольшому числу специалистов.

### Заключение

Формальное описание PFDD-диаграмм IDEF3-технологии позволяет получить о них самое общее представление. Появляется возможность увидеть процесс технологического моделирования в общем виде. При этом нет необходимости изучать какой-нибудь пример технологического процесса для овладения IDEF3-технологией. С другой стороны, поняв принципы технологического моделирования в общем виде, можно легко и просто построить модель конкретного технологического процесса, интересного разработчику. Приведенные примеры деревьев узлов моделей технологических процессов в системах технического диагностирования показывают, как можно построить требуемые модели любой сложности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 14-08-00327, 14-08-00399.

### Литература

1. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технология. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 208 с.

2. Елиферов В. Г., Репин В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. — М.: Стандарты и качество, 2007. — 398 с.  
3. Вендров А. М. CASE-средства. Современные методы и средства проектирования информационных

систем. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 176 с.

4. Маклаков С. В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. — 432 с.
5. Федотова Д. Э., Семенов Ю. Д., Чижик К. Н. CASE-технологии. — М.: Горячая линия–Телеком, 2003. — 160 с.
6. Калянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 240 с.
7. Бритов Г. С. Методология системного моделирования // Вестник молодых ученых. 2004. № 8. С. 3–16.
8. Вагнер В. В. Теория отношений и алгебра частичных отображений // Теория полугрупп и ее приложения/ СГУ. Саратов, 1965. Вып. 1. С. 3–179.
9. Кузнецов О. П. Дискретная математика для инженера. — СПб.: Лань, 2005. — 395 с.
10. Бритов Г. С., Лупал А. В. Вероятностный анализ состояний IDEF3-моделей технологических процессов // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 21–25.
11. Безмен Г. В., Колесов Н. В. Функциональное диагностирование линейных динамических систем с использованием нечеткого анализа // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 67–74.
12. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 256 с.
13. Мироновский Л. А. Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 10. С. 22–26.
14. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 55–61.
15. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.

UDC 681.324(031)

A Method for Formal Definition of PFDD-Diagrams of IDEF3-Technology

Britov G. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, britovgs@gmail.com

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** To represent the developed method for formal definition of PFDD-Diagrams of IDEF3-Technology for modeling technological processes in various objects, in particular, in systems of technical diagnostics. The method differs from the known ones based on use of certain examples by the fact that strict mathematical concepts of standard form are applied. **Methods:** There has been used the theory of binary relations which provided easy and convenient description of the process of technical simulation according to IDEF3-Technology. **Results:** There has been developed a method for formal definition of technological process scenario diagrams (PFDD-diagrams) applied in the standard IDEF3-Technology. The essence of the method is that all necessary concepts of IDEF3-Technology are constructed with a help of the theory of binary relations. Due to this fact the process of technological modeling is described in the standard form based on the proposed mathematical formulae which define concepts of a technological model built from formally defined PFDD-diagrams. **Practical relevance:** The obtained results ensure quick and rather easy understanding of IDEF3-principles and allow using them for specific applications. The paper shows their use for systems of technical diagnostics.

**Keywords** — Technological Process, IDEF3-Technology, PFDD-Diagram, Technological Model, Quarter Relation, Projection of Relation, Section of Relations, Decomposition Tree, Nodes Tree.

References

1. Cherenykh S. V., Semenov I. O., Ruchkin V. S. *Strukturnyi analiz sistem: IDEF-tekhnologii* [Structured Analysis of Systems: IDEF-Technology]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2001. 208 p. (In Russian).
2. Eliferov V. G., Repin V. V. *Protsessnyi podkhod k upravleniiu. Modelirovanie biznes-protsessov* [Process Approach to Control. Modeling of Business Processes]. Moscow, Standarty i kachestvo Publ., 2007. 398 p. (In Russian).
3. Vendrov A. M. *CASE-sredstva. Sovremennye metody i sredstva proektirovaniia informatsionnykh sistem* [CASE-Funds. Modern Methods and Funds for Design Informational Systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1998. 176 p. (In Russian).
4. Maklakov S. V. *Sozdanie informatsionnykh sistem s AllFusion Modeling Suite* [Design Informational Systems by AllFusion Modeling Suite]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 432 p. (In Russian).
5. Fedotova D. E., Semenov U. D., Chizhik K. N. *CASE-tehnologii* [CASE-Technology]. Moscow, Goriachaja liniia–Telekom Publ., 2003. 160 p. (In Russian).
6. Kaljanov G. N. *Modelirovanie, analiz, reorganizatsiia i avtomatizatsiia biznes-protsessov* [Modeling, Analysis, Organization and Automatically Business Processes]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2006. 240 p. (In Russian).
7. Britov G. S. Methodology System Simulation. *Vestnik molodykh uchenykh*, 2004, no. 8, pp. 3–16 (In Russian).
8. Vagner V. V. Relation Theory and Algebra of Partial Reflections. *Teoriia polugrupp i ee prilozheniia*. Saratov, SGU Publ., 1965, vol. 1, pp. 3–179 (In Russian).
9. Kuznecov O. P. *Diskretnaia matematika dlia inzhenera* [Digital Mathematic for Engineer]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2005. 395 p. (In Russian).
10. Britov G. S., Lupal A. V. Probability Analysis of IDEF3 Models States of Technological Processes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no. 5, pp. 21–25 (In Russian).
11. Bezmen G. V., Kolesov N. V. Functional Diagnostics of Linear Dynamic Systems Using Fuzzy. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no. 5, pp. 67–74 (In Russian).
12. Mironovsky L. A. *Funkcional'noe diagnostirovanie dinami-cheskikh sistem* [Functional Diagnostics of Linear Dynamic Systems]. Moscow, MGU Publ., 1998. 256 p. (In Russian).
13. Mironovsky L. A. Test Checking of Transfer Functions of Stationary Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1989, no. 10, pp. 22–26 (In Russian).
14. Britov G. S., Mironovsky L. A. Automated Design of Functional Devices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2010, no. 2, pp. 55–61 (In Russian).
15. Britov G. S., Mironovsky L. A. Estimation Testing Procedure of Linear Control Systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 11. pp. 44–49 (In Russian).