



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 005:658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ IDEF3

Ивахненко А.Г.¹, Аникеева О.В.², Исламова О.В.³, Разумова А.И.¹, Гуляев К.А.¹

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² Федеральное казенное предприятие «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия

³ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При графическом описании процессов системы менеджмента качества (СМК) достаточно широкое применение нашла методология IDEF. При этом предпочтение отдается нотации IDEF0 по сравнению с нотацией IDEF3. Сами эти методологии и соответствующие им нотации не включают в себя средства для преобразования графических моделей в математические модели. Имеются подходы для определения вероятностей выполнения работ, входящих в сеть взаимосвязанных и взаимодействующих процессов для нотации IDEF0. Нотация IDEF3 поддерживает более детальное описание взаимодействия работ в процессах за счет прямого использования логических условий с учетом временных показателей и является перспективной для создания математических моделей на ее основе. **Цель работы и методы исследования.** В статье выполнен анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК на основе их графических IDEF3-моделей. Были использованы основные положения теории вероятностей и приемы исследования структурных схем надежности технических систем. **Новизна. Результаты.** Предложен подход к прямому преобразованию структурных схем взаимодействующих процессов на основе графических IDEF3-моделей в выражения для определения вероятностей и времени выполнения всей сети процессов. Применение этого подхода реализовано на трех абстрактных примерах, содержащих основные элементы таких графических моделей. Численные расчеты подтвердили возможность учета обратных связей в сети процессов, присущих всем действующим СМК на основе цикла Шухарта-Деминга. **Практическая значимость.** Созданный подход позволяет использовать накопленные знания о взаимосвязях процессов, отраженных только в графических схемах для назначения требований к качеству (вероятности успешного выполнения) и длительности к каждой работе, входящей в процесс, исходя из его принятой структуры. Этот подход может найти применение для анализа схем процессов СМК на основе непосредственного вычисления параметров вероятности и времени при определении источников повышения их результативности и эффективности.

Ключевые слова: процессы СМК, графические модели IDEF3, математические модели, вероятность, время выполнения

© Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А., 2024

Для цитирования

Параметрический анализ структурных моделей взаимодействующих процессов на основе IDEF3 / Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 131-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PARAMETRIC ANALYSIS OF STRUCTURAL MODELS OF INTERACTING PROCESSES BASED ON IDEF3

Ivakhnenko A.G.¹, Anikeeva O.V.², Islamova O.V.³, Razumova A.I.¹, Gulyaev K.A.¹

¹ Southwest State University, Kursk, Russia

² Federal State-Owned Enterprise Kursk Biofactory – Company BИOK, Kursk, Russia

³ Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The IDEF methodology has been widely used in the graphical description of the processes of the quality management system (QMS). In this case, preference is given for the IDEF0 notation over the IDEF3 notation. These methodologies and their corresponding notations do not include tools for converting graphical models into mathematical ones. There are approaches to determining the probabilities of the activity being performed that are part of a network of interconnected and interacting processes for the IDEF0 notation. The IDEF3 notation supports a more detailed description of the interaction of the activity in processes through the direct use of logical conditions taking into account time indicators, and this is promising for creating mathematical models based on it. **Objective and Methods Applied.** The article analyzes the probability and execution time parameters of interrelated and interacting QMS processes based on their IDEF3 graphical models. The authors used main provisions of probability theory and techniques for studying structural charts of reliability of technical systems. **Originality. Results.** The article proposes an approach to the direct transformation of structural charts of interacting processes based on IDEF3 graphical models into expressions for determining the probabilities and execution time of the entire process network. This approach is applied for three abstract examples containing the main elements of such graphical models. Numerical calculations have confirmed the possibility of taking into account feedbacks in the network of processes characteristic of all operating QMS based on the Shewhart-Deming cycle. **Practical Relevance.** The created approach uses accumulated knowledge about the interrelations between processes, reflected in graphical charts only to assign quality requirements (probability of successful completion) and duration to every activity included in the process, based on its accepted structure. This approach can be used to analyze the charts of QMS processes based on the direct calculation of probability and time parameters in determining the sources of increasing their effectiveness and efficiency.

Keywords: QMS processes, IDEF3 graphical models, mathematical models, probability, execution time

For citation

Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I., Gulyaev K.A. Parametric Analysis of Structural Models of Interacting Processes Based on IDEF3. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 131-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>

Введение

При создании и совершенствовании систем менеджмента качества (СМК) предприятий и организаций используют разные методы и инструменты. Общим для них является то, что они поддерживают реализацию принципов системного и процессного подходов [1]. Для отражения деятельности предприятия как системы взаимосвязанных и взаимодействующих процессов используют различные нотации. Широкое применение получили методологии IDEF, включающие в себя несколько средств графического представления и анализа процессов [2]. Из всех средств методологии IDEF наиболее часто применяют методологию функционального моделирования IDEF0. Гораздо меньшее распространение получила методология документирования процессов IDEF3. Общей чертой этих методологий является то, что сами они не включают в свой состав средств для преобразования графических моделей в математические модели. Это не позволяет применять их непосредственно для

обоснования выбора из различных вариантов решений, поддерживающих различные направления совершенствования СМК. Важность применения математических моделей для такого совершенствования несомненна при цифровой трансформации предприятий [3, 4], например для решения задач практической стандартизации [5] и других задач. Тем не менее большой объем информации, содержащийся в графических моделях IDEF0 и IDEF3 о процессах СМК, их взаимосвязях и взаимодействии, является основой для разработки способов их использования при разработке соответствующих математических моделей.

В работе [6] было указано на схожесть моделей IDEF0 и моделей структурных схем надежности сложных технических систем [7], на основе которой были представлены зависимости для оценки вероятности безотказной работы. Основным недостатком представленного подхода в [6] является предположение о линейном развитии процессов от начального этапа до конечного этапа, без учета обратных связей, характерных для СМК, реализующих цикл Шухарта-Деминга.

Использование графических моделей IDEF0 для расчета рисков рассмотрено в работах [8, 9] на основе прямого перехода от функциональных блоков моделей к уравнениям вероятности выполнения функций этих блоков с учетом прямых и обратных связей между ними. Предложенный в этих работах подход является оригинальным и существенно дополняет набор известных методов риск-менеджмента [10].

В диаграммах IDEF3 в отличие от диаграмм IDEF0 существуют переходы с разными логическими условиями, подобными тем, что используются при расчетах структурной надежности технических систем [10], но дополненных учетом времени их срабатывания. Некоторые возможности использования графических диаграмм IDEF3 для построения математических моделей процессов рассмотрены в работах [11, 12]. В работе [10] вероятностный анализ состояний рассмотрен только для потоковых технологических процессов, в котором внимание уделено срабатыванию асинхронного соединения «ИЛИ», а не выполнению работ как элементов процесса. Потоковые модели технологических процессов также рассмотрены в [12], где была определена проводимость цепочки работ. Основное внимание в этой работе уделено поиску «узких» мест в потоковых технологических процессах, но выполнен учет обратной связи, но только для одной работы, замкнутой саму на себя.

На основе вышеизложенного перспективным представляется использование графических диаграмм IDEF3 для построения математических моделей взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК для определения вероятности и времени их выполнения.

Целью работы является анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК на основе их графических IDEF3-моделей.

Материалы и методы исследования

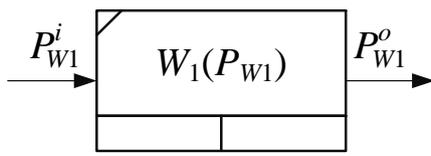
Для достижения поставленной цели будем использовать метод описания Process Flow Description (PFD), реализующий описание процессов, с указанием того, что происходит на каждом этапе, графическое представление которого осуществляется через Process Flow Description Diagrams (PFDD) – диаграммы Описания Последовательности Этапов Процесса. В IDEF3-моделях отсутствуют ограничения на количество блоков на диаграмме. Рассмотрим основные блоки PFDD и их параметры вероятности и времени.

Блок работы (действия) имеет только один вход и один выход, что позволяет соотнести вероятность выхода с вероятностью входа и вероятностью выполнения самой работы. Характеристики этого блока представлены в табл. 1.

Полагая, что $P_{W1}^i = 1$, получим, что вероятность на выходе из блока будет равна вероятности выполнения работы $P_{W1}^o = P_{W1}$, то есть характеристику собственно самого блока работы.

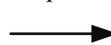
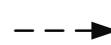
В табл. 2 представлены характеристики связей (стрелок), в которые не включена связь объектного потока, поскольку ее параметры аналогичны временному предшествованию, но она предназначена для отражения передачи объектов между работами (отчетов и т.п.). Такого рода детализация не соответствует поставленной цели данной работы.

Таблица 1. Параметры блока работы
Table 1. Parameters of the activity block

Блок работы	Вероятность	Время
	P_{W1}^o – вероятность на выходе из блока. $P_{W1}^o = P_{W1}^i P_{W1}$, где P_{W1}^i – вероятность на входе в блок; P_{W1} – вероятность выполнения работы $W1$ (при заданной длительности; в установленные сроки)	t_{W1} – длительность выполнения работы $W1$. $t_{W1} = t_{W1}^f - t_{W1}^s$, где t_{W1}^f – время завершения выполнения работы; t_{W1}^s – время начала выполнения работы

Примечание. Обозначения соответствуют: W – работа (work), i – вход (input), o – выход (output), s – начало (start), f – завершение (finish).

Таблица 2. Параметры связей
Table 2. Parameters of links

Связи	Связи между блоками	Вероятность	Время
Временное предшествование 	$P_{W1}^o \rightarrow P_{W2}^i$	$P_{W2}^i = P_{W1}^o$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f$
Нечеткое отношение 	$P_{W1}^o \dashrightarrow P_{W2}^i$	$P_{W2}^i = P_{W1}^o$, $0 \leq P_{W2}^i \leq P_{W1}^o$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \vee$ $t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W2}^f \geq t_{W1}^f$, $t_{W1}^f \geq t_{W2}^s \geq t_{W1}^s$

Для связей с нечетким отношением в том случае, если последующая работа W_2 заканчивается ранее предшествующей работы W_1 , то соответствующая вероятность лежит в диапазоне $0 \leq P_{W_2}^i \leq P_{W_1}^o$. В общем случае ее численное значение $P_{W_2}^i$ будет определяться экспертным путем. Но можно дать следующую оценку, основанную на том предположении, что вероятность $P_{W_2}^i$ при незавершенной работе W_1 и завершенной работе W_2 равномерно распределена во времени:

$$P_{W_2}^i = \frac{t_{W_1}^f - t_{W_2}^f}{t_{W_1}}. \quad (1)$$

Преимущество графических диаграмм IDEF3 состоит в наличии соединений (перекрестков), позволяющих оценивать логическую последовательность выполнения работ и учитывать время и вероятности их успешного завершения.

В табл. 3 представлены характеристики соединений. Все соединения на диаграмме должны иметь номер с префиксом J .

Таблица 3. Параметры соединений
Table 3. Parameters of junctions

Соединения	Соединения между блоками	Вероятность	Время
Асинхронное соединение «И»		$P_{J_1} = P_{W_1}^o P_{W_2}^o$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \wedge t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$, либо в другой форме $t_{W_3}^s \geq \max(t_{W_1}^f, t_{W_2}^f)$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$, $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o \wedge$ $T_{\max} \geq t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^o$
Синхронное соединение «И»		$P_{J_1} = P_{W_1}^o P_{W_2}^o$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f = t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$, $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$t_{W_2}^s = t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f$
Асинхронное соединение «ИЛИ»		$P_{J_1} = 1 - (1 - P_{W_1}^o)(1 - P_{W_2}^o)$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \wedge t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$, либо в другой форме $t_{W_3}^s \geq \min(t_{W_1}^f, t_{W_2}^f)$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_2}^i = P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o \vee$ $T_{\max} \geq t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^o$
Синхронное соединение «ИЛИ»		$P_{J_1} = 1 - (1 - P_{W_1}^o)(1 - P_{W_2}^o)$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f = t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_2}^i = P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o$	$t_{W_2}^f = t_{W_3}^f$, $T_{\max} \geq t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^o$
Соединение «эксклюзивное «ИЛИ»		$P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_2}^o \wedge P_{W_1}^i = 0$	$t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f \vee t_{W_3}^s \geq t_{W_2}^f$
		$P_{W_2}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_3}^i = 0 \vee$ $P_{W_3}^i = P_{J_1} = P_{W_1}^o \wedge P_{W_2}^i = 0$	$t_{W_2}^s \geq t_{W_1}^f \vee t_{W_3}^s \geq t_{W_1}^f$

Примечание. T_{\max} – максимальная величина времени, введена для действующих процессов и СМК вместо правильного, но формального значения времени, равного бесконечности (∞).

Примененные в табл. 3 логические знаки «ИЛИ» (V) позволяют определить параметры вероятности и времени в соответствии с графическими диаграммами, отражающими возможности различных сценариев реализации процессов.

Полученные результаты и их обсуждение

Рассмотрим возможности предложенного инструмента параметрического анализа структурных моделей взаимодействующих процессов, определенных в IDEF3, на следующих примерах, в которых перекрестки не нумерованы, чтобы не усложнять чтение диаграмм.

Пример 1. Схема процессов, представленная на рис. 1, имеет последовательную структуру с разветвлением и соединением.

В табл. 4 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов.

Результат расчета по табл. 4 представим следующими выражениями:

$$P_6 = P_0^2 P_{W1}^2 P_{W2} P_{W3} P_{W4}, \tag{2}$$

$$T \geq t_{W1} + \max(t_{W2}, t_{W3}) + t_{W4}, \tag{3}$$

где T – время завершения всех работ.

Видимым отличием от известных зависимостей для вероятностей безотказной работы, полученных с использованием структурных схем надежности [6, 7], является наличие степеней у вероятностей P_0 и P_{W1} в выражении (2), что обусловлено парностью разветвления и слияния стрелок в асинхронном соединении «И».

Пример 2. Схема процессов, представленная на рис. 2, имеет последовательную структуру с разветвлением и соединением, включающую обратную связь и нечеткое отношение.

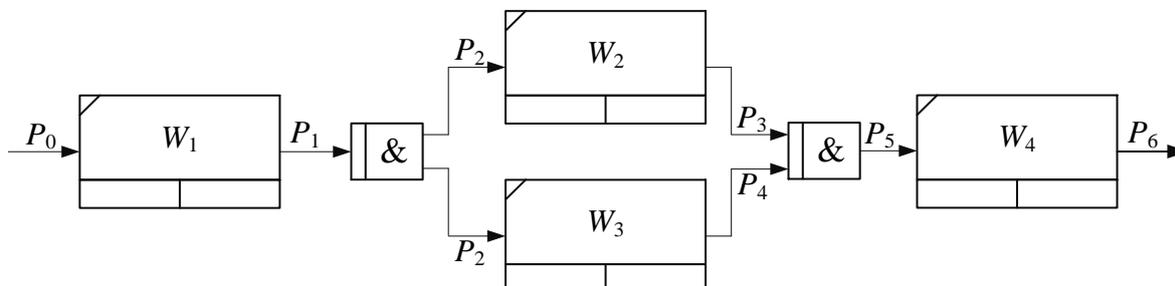


Рис. 1. Схема последовательной структуры процессов
Fig. 1. A diagram of the sequential structure of processes

Таблица 4. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 1
Table 4. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 1

№ п/п	Вероятность	Время
1	$P_1 = P_0 P_{W1}$	$t_{W1}^s = 0, t_{W1}^f = t_{W1}$
2	$P_2 = P_1$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W3}^s \geq t_{W1}^f$
3	$P_3 = P_2 P_{W2}, P_4 = P_2 P_{W3}$	$t_{W2}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W3}^s \geq t_{W1}^f, t_{W2}^f = t_{W2}^s + t_{W2}, t_{W3}^f = t_{W3}^s + t_{W3}$
4	$P_5 = P_3 P_4$	$t_{W4}^s \geq t_{W2}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W3}^f$
5	$P_6 = P_5 P_{W4}$	$t_{W4}^s \geq t_{W2}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W3}^f, t_{W4}^f = t_{W4}^s + t_{W4}$

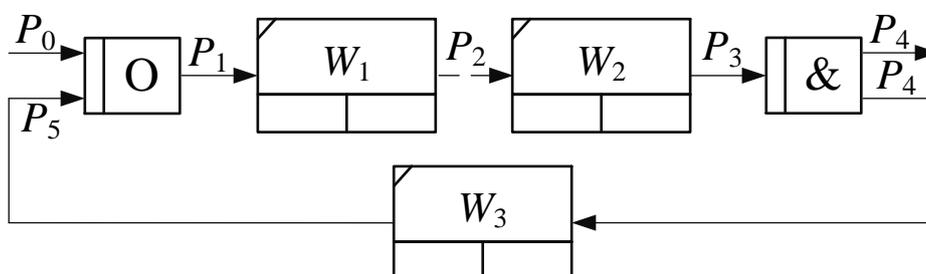


Рис. 2. Схема структуры процессов с обратной связью и нечетким отношением
Fig. 2. A diagram of the structure of processes with a feedback and a fuzzy relation

В табл. 5 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов только для первого цикла, то есть при $t_{w1}^s = 0$.

Таблица 5. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 2
Table 5. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 2

№ п/п	Вероятность	Время
1	$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5)$	$t_{w1}^s = 0$
2	$P_2 = P_1 P_{W1}$	$t_{w1}^s = 0, t_{w1}^f = t_{W1}$
3.1	$P_3 < P_2 P_{W2}$	$t_{w2}^s \geq t_{w1}^s, t_{w2}^f \geq t_{w1}^f$
3.2	$P_3 = P_2 P_{W2}$	$t_{w2}^f \geq t_{w1}^f$
4	$P_4 = P_3$	$t_{w2}^f \geq t_{w1}^s + t_{W2} \vee t_{w2}^f > t_{w1}^f$
5	$P_5 = P_4 P_{W3}$	$t_{w3}^s \geq t_{w2}^f, t_{w3}^f = t_{w3}^s + t_{W3}$

При выполнении временных условий по п.3.1 табл. 5 значения вероятностей будут подчиняться следующим соотношениям:

$$P_4 < P_{W1} P_{W2}; P_5 < P_{W1} P_{W2} P_{W3}; P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5), \quad (4)$$

а при выполнении временных условий по п. 3.2:

$$P_4 = P_{W1} P_{W2}; P_5 = P_{W1} P_{W2} P_{W3}; P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_5). \quad (5)$$

Время завершения первого цикла T_1 будет подчиняться следующим условиям:

– для зависимостей (4)

$$T_1 \geq t_{W2} + t_{W3}; \quad (6)$$

– для зависимостей (5)

$$T_1 \geq t_{W1} + t_{W2} + t_{W3}. \quad (7)$$

В этом примере показана только возможность определения параметров процессов при наличии обратной связи. В следующем примере будет рассмотрен учет обратной связи при нескольких циклах выполнения работ.

Пример 3. Более сложная схема процессов, представленная на рис. 3, имеет последовательную струк-

туру с разветвлениями и соединениями, включающую обратную связь и только связи временного предшествования.

В табл. 6 представлена последовательность расчета параметров для рассматриваемой структуры процессов только для первого цикла, как и в предыдущем примере.

Необходимость введения новых обозначений $t(P_{14})$ и $t(P_{15})$ в табл. 6 обусловлена самой структурой, приведенной на рис. 3. В отличие от предыдущих примеров здесь имеется несколько последовательных соединений.

Расчет параметров для рассматриваемой структуры процессов представлен рекурсивными соотношениями для вероятностей P_1 и P_{15} , полученными для первого цикла и последующих циклов, учитывающих наличие обратной связи:

$$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_{15}); \quad (8)$$

$$P_{15} = P_1^9 P_{W1}^3 P_{W2}^3 P_{W3}^3 P_{W4}^3 P_{W5} P_{W6} P_{W7}. \quad (9)$$

Для первого цикла в выражении (8) полагаем $P_{15} = 0$, то есть $P_1 = P_0$, и выполняем расчет вероятности P_{15} по выражению (9). Полученное значение вероятности P_{15} используем в выражении (8) для нахождения вероятности P_1 , которое применяем для определения вероятности P_{15} по выражению (9) и т.д.

Результаты моделирования рассматриваемой схемы структуры процессов на основе применения выражений (8) и (9) при различных значениях вероятностей P_0 и P_{Wi} ($i = 1, \dots, 7$) приведены в табл. 7.

Полученные результаты численного моделирования отражают влияние обратной связи с асинхронным соединением «ИЛИ» на увеличение выходной вероятности P_{15} , определяемой выражением (8). Наиболее значимое увеличение вероятности P_{15} происходит после выполнения второго цикла, что соответствует выражению (8). Из выражения (9) видно, что на само значение величины вероятности P_{15} наибольшее влияние оказывают значения вероятностей на выходе из блоков $W1, W2, W3$ и $W4$.

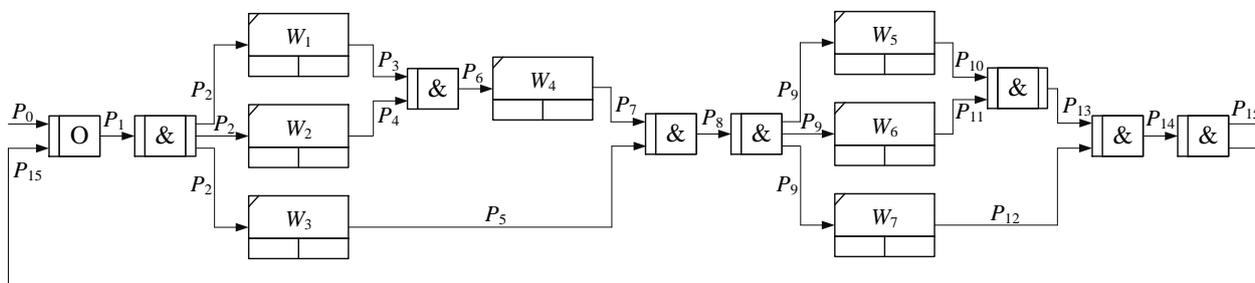


Рис. 3. Схема структуры процессов с обратной связью
Fig. 3. A diagram of the feedback process structure

Таблица 6. Расчет параметров для структуры процессов по рис. 3
 Table 6. Calculation of parameters for the process structure according to Fig. 3

№ п/п	Вероятность	Время
1	$P_1 = 1 - (1 - P_0)(1 - P_{15})$	$t_{W1}^s = 0, t_{W2}^s = 0, t_{W3}^s = 0$
2	$P_2 = P_1$	$t_{W1}^s = 0, t_{W2}^s = 0, t_{W3}^s = 0$
3	$P_3 = P_2 P_{W1}$	$t_{W1}^s = 0, t_{W1}^f = t_{W1}$
4	$P_4 = P_2 P_{W2}$	$t_{W2}^s = 0, t_{W2}^f = t_{W2}$
5	$P_5 = P_2 P_{W3}$	$t_{W3}^s = 0, t_{W3}^f = t_{W3}$
6	$P_6 = P_3 P_4$	$t_{W4}^s \geq t_{W1}^f \wedge t_{W4}^s \geq t_{W2}^f$
7	$P_7 = P_6 P_{W4}$	$t_{W4}^f = t_{W4}^s + t_{W4}$
8	$P_8 = P_5 P_7$	$t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W7}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W4}^f$
9	$P_9 = P_8$	$t_{W5}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W5}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W4}^f \wedge t_{W7}^s \geq t_{W3}^f \wedge t_{W6}^s \geq t_{W4}^f$
10	$P_{10} = P_9 P_{W5}$	$t_{W5}^f = t_{W5}^s + t_{W5}, t_{W5}^f = t_{W6}^f$
11	$P_{11} = P_9 P_{W6}$	$t_{W6}^f = t_{W6}^s + t_{W6}, t_{W5}^f = t_{W6}^f$
12	$P_{12} = P_9 P_{W7}$	$t_{W7}^f = t_{W7}^s + t_{W7}$
13	$P_{13} = P_{10} P_{11}$	$t_{W5}^f = t_{W6}^f$
14	$P_{14} = P_{12} P_{13}$	$t(P_{14}) \geq \max(t_{W5}^f = t_{W6}^f, t_{W7}^f)$
15	$P_{15} = P_{14}$	$t(P_{15}) \geq t(P_{14})$

Примечание. Здесь введены новые обозначения $t(P_{14})$ и $t(P_{15})$ – время срабатывания соединений, на выходе которых формируются вероятности P_{14} и P_{15} соответственно.

Таблица 7. Результаты моделирования для структуры процессов по рис. 3
 Table 7. Simulation results for the process structure according to Fig. 3

Шаг	$P_0 = 0,99; P_{Wi} = 0,95$		$P_0 = 0,99; P_{Wi} = 0,99$		$P_0 = 0,997; P_{Wi} = 0,997$	
	P_1	P_{15}	P_1	P_{15}	P_1	P_{15}
1	0,99	0,4232	0,99	0,7857	0,997	0,9304
2	0,9942	0,4398	0,9979	0,8436	0,9998	0,9541
3	0,9944	0,4404	0,9984	0,8480	0,9999	0,9547
4	0,9944	0,4405	0,9985	0,8484	0,9999	0,9548
5	0,9944	0,4405	0,9985	0,8484	0,9999	0,9548

Заключение

Результатом выполненного исследования является разработка нового инструмента качества, позволяющего проводить анализ параметров вероятности и времени выполнения взаимосвязанных и взаимодействующих процессов СМК по их графическим IDEF3-моделям. В отличие от распространенного представления, IDEF3-модели могут быть использованы для анализа не только технологических процессов. Разработанный инструмент качества:

1) предоставляет более широкие возможности для анализа процессов по сравнению с непосредственным применением структурных схем надежности, разработанных для технических систем;

2) позволяет учитывать обратные связи, всегда имеющиеся в действующих СМК, реализующих цикл PDCA (PDSA);

3) поддерживает назначение требований к качеству (вероятности успешного выполнения) и дли-

тельности к каждой работе, входящей в процесс, исходя из его принятой структуры;

4) может найти применение для анализа схем взаимосвязей и взаимодействия процессов СМК на основе непосредственного вычисления параметров вероятности и времени и источников повышения их результативности и эффективности.

Направлением дальнейших исследований является верификация и валидация предложенного инструмента качества по моделям процессов, опубликованным в открытой печати, а также его применение для анализа действующих СМК предприятий.

Список источников

1. Управление качеством продукции, процессов, услуг: учеб. пособие / Анিকেева О.В., Еренков О.Ю., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Курск: ЮЗГУ, 2016. 426 с.

2. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с.
3. Маликов А.А., Козловский В.Н., Васин С.А. Перспективы развития процессов управления качеством производства в условиях цифровой трансформации // СТИН. 2022. № 1. С. 48-52.
4. Запорожцев А.В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И. Ключевые аспекты создания цифрового двойника процесса системы менеджмента качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 105-116. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>.
5. Полякова М.А., Извеков Ю.А., Дрягун Э.П. Использование математических моделей в области практической стандартизации // Качество. Инновации. Образование. 2023. № 5(187). С. 69-77. DOI: 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77
6. Larson N., Kusiak A. System Reliability Methods for Analysis of Process Models // Integrated Computer-Aided Engineering. 1996, vol. 3, no. 4, pp. 279-290.
7. Хенли Дж., Кумамото Хиромицу. Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
8. Разработка подхода к расчету рисков на основе функциональной модели IDEF0 / Жилиев А.А., Ивахненко А.Г., Исламова О.В., Афанасьев П.А., Денисов Д.А., Хуштова А.Р. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №4. С. 324-327. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-324-328
9. Использование функциональной модели IDEF0 для расчёта рисков / Аникеева О.В., Жилиев А.А., Ивахненко А.Г., Исламова О.В., Козловский В.Н. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. №5 (355). С. 89-98. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-89-98
10. Картвелишвили В.М., Свиридова О.А. Риск-менеджмент. Методы оценки риска: учеб. пособие. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2017. 120 с.
11. Бритов Г.С., Лупал А.В. Вероятностный анализ состояний IDEF3-моделей технологических процессов // Информационно-управляющие системы. 2009. №5. С. 21-24.
12. Осипова Т.Ф. Анализ потоков в бизнес-процессах по IDEF3-моделям // Актуальные проблемы экономики и управления. 2015. №4(8). С. 155-162.
2. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. *Modelirovaniye i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum* [Modeling and analysis of systems. IDEF technologies: tutorial]. Moscow: Finansy i statistika, 2006, 192 p. (In Russ.)
3. Malikov A.A., Kozlovskii V.N., Vasin S.A. Prospects for the development of production quality management processes in the context of digital transformation. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2022;(1):48-52. (In Russ.)
4. Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Key aspects of creating a digital twin of the quality management system process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):105-116. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>
5. Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Dryagun E.P. Use of mathematical models in the area of practical standardization. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(5(187)):69-77. (In Russ.) DOI 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77
6. Larson N., Kusiak A. System reliability methods for analysis of process models. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 1996;3(4):279-290.
7. Henley E.J., Kumamoto H. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i otsenka riska* [Reliability engineering and risk assessment]. Translated from English by Syromyatnikov V.S., Demina G.S.; edited by Syromyatnikov V. S. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 528 p. (In Russ.)
8. Zhilyaev A.A., Ivakhnenko A.G., Islamova O.V., Afanasyev P.A., Denisov D.A., Khushtova A.R. Development of an approach to the calculation of risks on the basis of the IDEF0 functional model. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2022;(4):324-327. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-324-328
9. Anikeeva O.V., Zhilyaev A.A., Ivakhnenko A.G., Islamova O.V., Kozlovsky V.N. Using the IDEF0 functional model to calculate risks. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]. 2022;(5(355)):89-98. (In Russ.) DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-89-98
10. Kartvelishvili V.M., Sviridova O.A. *Risk-menedzhment. Metody otsenki riska: uchebnoe posobie* [Risk management. Risk assessment methods: study guide]. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics, 2017, 120 p. (In Russ.)
11. Britov G.S., Lupal A.V. Probability analysis of IDEF3 model states of technological processes. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems]. 2009;(5):21-24. (In Russ.)
12. Osipova T.F. Flow analysis in business processes by IDEF3 models. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya* [Currently Relevant Issues of Economics and Management]. 2015;(4(8)):155-162. (In Russ.)

References

1. Anikeeva O.V., Erenkov O.Yu., Ivakhnenko A.G., Storablev M.L. *Upravlenie kachestvom produktsii, protsessov, uslug: uchebnoe posobie* [Quality management of products, processes, services: study guide]. Kursk: Southwest State University, 2016, 426 p. (In Russ.)

Поступила 31.03.2024; принята к публикации 08.04.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 31/03/2024; revised 08/04/2024; published 30/09/2024

Ивахненко Александр Геннадьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

Аникеева Олеся Владимировна – кандидат технических наук, доцент, специалист по качеству, Федеральное казенное предприятие «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия.
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

Исламова Оксана Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.
Email: islamova_81@mail.ru.

Разумова Анна Ивановна – аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.
Email: belkarazym@mail.ru.

Гуляев Кирилл Андреевич – аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.
Email: gulyaev1997@mail.ru.

Alexander G. Ivakhnenko – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Professor, Southwest State University, Kursk, Russia.
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

Olesya V. Anikeeva – PhD (Eng.), Associate Professor, Quality Management Specialist, Federal State-Owned Enterprise Kursk Biofactory – Company BIOC, Kursk, Russia.
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

Oksana V. Islamova – PhD (Eng.), Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia.
Email: islamova_81@mail.ru.

Anna I. Razumova – postgraduate student, Southwest State University, Kursk, Russia.
Email: belkarazym@mail.ru.

Kirill A. Gulyaev – postgraduate student, Southwest State University, Kursk, Russia.
Email: gulyaev1997@mail.ru.