



Применение теории сетей Петри в задачах разработки имитационных моделей бизнес-процессов на основе методологии IDEF3

Д.А. Петросов ©

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
г. Москва, Российская Федерация

E-mail: dapetrosov@fa.ru

Аннотация. Актуальность разработки имитационных моделей бизнес-процессов обусловлена потребностью повышения качества анализа предметной области за счет проведения вычислительных экспериментов над разработанными моделями в популярных нотациях. Для описания технологических особенностей часто используется методология IDEF3, которая относится к семейству методологий IDEF, получившей широкое распространение среди специалистов в области аналитики, моделирования и реинжиниринга бизнес-процессов как в зарубежной, так и в отечественной практике анализа и моделирования различных предметных областей. В качестве инструментальных средств создания имитационных моделей предлагается применение математического аппарата теории сетей Петри. Данное инструментальное средство обладает широким спектром расширений, которые позволяют реализовать все особенности нотации IDEF3. Для этого в исследовании предложен подход, описывающий правила создания имитационных моделей бизнес-процессов, которые позволяют выполнить моделирование всех существующих объектов нотации. Разработка программных дополнений к существующим CASE-средствам на основе предложенного подхода, позволит создавать имитационные модели бизнес-процессов непосредственно в процессе разработки моделей предметной области, а также использовать интеллектуальные методы структурно-параметрического синтеза имитационных моделей на основе элементной базы единиц работы и заданного поведения синтезируемой модели процесса. В качестве средства интеллектуального структурно-параметрического синтеза могут использоваться адаптированные к решению задачи структурно-параметрического синтеза генетические алгоритмы, работа которых также моделируется с применением теории сетей Петри, что позволяет использовать один математический аппарат в рамках всех решаемых задач создания имитационных моделей бизнес-процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование, имитационные модели, бизнес-процессы, теория сетей Петри, структурно-параметрический синтез, IDEF3, технологические процессы, CASE-средства

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-31-00127).

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Петросов Д.А. Применение теории сетей Петри в задачах разработки имитационных моделей бизнес-процессов на основе методологии IDEF3 // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 3. С. 51–63. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-51-63. EDN: TGIJWN

Application of the Theory of Petri Nets in the Development of Simulation Models of Business Processes Based on the IDEF3 Methodology

D.A. Petrosov ©

Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russian Federation

E-mail: dapetrosov@fa.ru

Abstract. The relevance of developing simulation models of business processes is due to the need to improve the quality of analysis of the subject area by conducting computational experiments on the developed models in popular notations. To describe technological features, the IDEF3 methodology is often used, which belongs to the IDEF family of methodologies, which has become widespread among specialists in the field of analytics, modeling and business process reengineering, both in foreign and domestic practice of analysis and modeling of various subject areas. The use of the mathematical apparatus of the theory of Petri nets is proposed as a tool for creating simulation models. This tool has a wide range of extensions that allow you to implement all the features of the IDEF3 notation. For this purpose, the study proposes an approach that describes the rules for creating simulation models of business processes that allow modeling of all existing notation objects. The development of software additions to existing CASE tools based on the proposed approach will make it possible to create simulation models of business processes directly in the process of developing domain models, as well as to use intelligent methods of structural-parametric synthesis of simulation models based on the elemental base of work units and the specified behavior of the synthesized model process. As a means of intelligent structural-parametric synthesis, genetic algorithms adapted to solving the problem of structural-parametric synthesis can be used, the operation of which is also modeled using the theory of Petri nets, which allows the use of one mathematical apparatus within the framework of all solved problems of creating simulation models of business processes.

Key words: mathematical modeling, simulation models, business processes, Petri net theory, structural-parametric synthesis, IDEF3, technological processes, CASE-tools

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-31-00127).

FOR CITATION: Petrosov D.A. Application of the Theory of Petri Nets in the Development of Simulation Models of Business Processes Based on the IDEF3 Methodology. *Computational Nanotechnology*. 2023. Vol. 10. No. 3. Pp. 51–63. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-3-51-63. EDN: TGIJWN

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные CASE средства обладают широким графическим и аналитическим функционалом, который позволяет не только проводить разработку моделей бизнес-процессов, но и выполнять анализ разработанных моделей. Для повышения качества анализа целесообразно дополнить функционал, представленных на рынке специализированных программных средств, дополнительными средствами имитационного моделирования. Данный подход позволит аналитику бизнес-процессов существенно повысить процесс анализа предметной области и разрабатываемых моделей бизнес-процессов [1–4].

CASE-средства, представленные на отечественном и зарубежном рынке программных средств, поддержи-

вают большое количество методологий, каждая из которых направлена на моделирование соответствующих особенностей процессов. Методология IDEF3 используется для моделирования технологических особенностей бизнес-процессов и поддерживается большим количеством CASE-средств, среди которых следует отметить: AllFusion ProcessModeler, MS Visio, онлайн-сервис draw.io и т.д. В целом перечисленные средства моделирования являются достаточно мощными инструментами, включающими в себя как графический интерфейс, так и средства анализа и оптимизации разработанных моделей. Для улучшения качества такого рода систем целесообразно добавить функционал, связанный с разработкой имитационных моделей, позволяющих разрабатывать модели предметной области непосредственно в процессе работы в графическом

редакторе. Таким образом возможно объединить функционал CASE средств и сред имитационного моделирования, что позволит аналитику решить задачу анализа с применением средств имитационного моделирования, не прибегая к использованию специализированных сред и уменьшить время на анализ предметной области [5–10].

Для решения данной задачи целесообразно использовать теорию графов, которая обладает большим количеством расширений и позволяет выполнить построение имитационных моделей. Из широкого ассортимента классов графов в рамках данного исследования предлагается использование теории сетей Петри [11–14].

Сеть Петри – двудольный направленный граф, который обладает двумя классами вершин, способными моделировать как исполнение единицы работы (возможно моделирование, как отдельными моделями, так и многоуровневыми сетями, в которых переход является моделью сети), позициями для хранения объектов, участвующих в исполнении единиц работы и меток перехода от одной единицы работы к следующей без передачи объектов [14–18].

Таким образом можно говорить о целесообразности применения данного математического аппарата для реализации имитационных моделей технологических процессов на основе методологии IDEF3.

Предложенный подход по реализации имитационных моделей на основе сетей Петри требует адаптации, созданию ряда правил по моделированию объектов нотации IDEF3

1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ В НОТАЦИИ IDEF3

Для решения задачи применения сетей Петри при создании имитационных моделей бизнес-процессов на основе IDEF3 требуется выполнить анализ особенностей данной нотации, а также определить правила использования основных компонентов на основе которых строится модель. В отличие от методологии IDEF0, рассматриваемый подход моделирования технологических особенностей бизнес-процесса, обладает собственной семантикой и синтаксисом, что требует предварительного разбора перед разработкой подхода, направленного на моделирование с применением теории сетей Петри, а также отметим возможность декомпозиции процессов в рамках одной модели на вложенные уровни, что тоже требует внимания при создании имитационных моделей.

Методология IDEF3 может быть использована при моделировании технологических особенностей процесса (Process Flow Description, PFD) с учетом описания каждой единицы работы и детализации каждого этапа технологического этапа, а также используется для описания переходов состояния объектов в (Object State Transition Description, OSTD), в котором указы-

вается как существующие состояния объектов, так и промежуточные состояния. В рамках данного исследования будет рассмотрен PFD подход, позволяющий моделировать все этапы технологического процесса, состоящего из:

- блоков действий или единиц работы;
- стрелок взаимосвязей;
- логических перекрестков;
- объектов ссылок.

Блоки действий обладают входами и выходами в отличие от методологии IDEF0 в IDEF3 нет требований об обязательном наличии: входов, выходов, управления и механизмов, но при этом в качестве входов могут использоваться как обычный переход от одного действия к другому, так и поток объектов. Данное отличие иллюстрируется в качестве различных видов стрелок. Примеры использования стрелок и временной шкалы исполнения показаны на рис. 1.

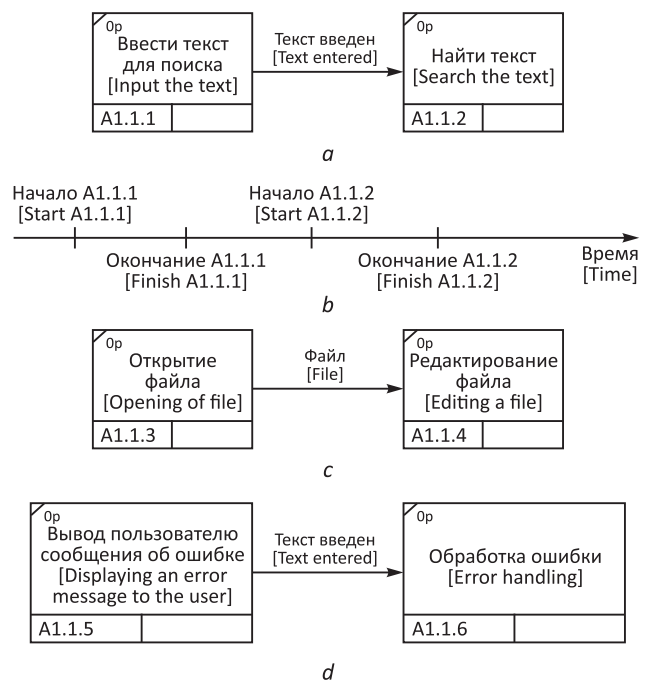


Рис. 1. Примеры соединений в методологии IDEF3 и временной шкалы исполнения единиц работы:

a – пример временного предшествования A1.1.1 перед A1.1.2;
b – пример временной шкалы; c – пример объектной связи между A1.1.3 и A1.1.4; d – пример нечеткой связи между A1.1.5 и A1.1.6




Fig. 1. Examples of connections in IDEF3 methodology and unit of work execution timeline:

a – example of temporal precedence of A1.1.1 before A1.1.2;
b – timeline example; c – example of an object relationship between A1.1.3 and A1.1.4; d – example of a fuzzy relationship between A1.1.5 and A1.1.6

Общепринятые стрелки нотации продемонстрированы в табл. 1.

Кроме отличий по типам соединения в методологии IDEF3 реализован функционал отображения временной шкалы исполнения единиц работы (см. рис. 1), что способствует лучшему пониманию представленной разрабатываемой модели бизнес-процесса.

Изображение и назначение стрелок в нотации IDEF3
[Representation and purpose of arrows in IDEF3 notation]

Изображение [Image]	Название [Title]	Назначение [Appointment]
	Временное предшествование [Temporary precedence]	Применяется при моделировании перехода от единицы работы-источника к работе-цели. Означает, что работа-источник должна закончиться перед началом выполнения работы-цели [It is used when modeling the transition from a source work unit to a target work. Means that the source work must end before the start of the target work]
	Поток объектов [Object Flow]	Применяется при потребности в моделировании передаваемых объектов, когда результатом выполнения является некий объект [It is used when there is a need for modeling of transmitted objects, when the result of execution is an object]
	Нечеткое отношение [Fuzzy relation]	Применяется при отсутствии возможности описать связь по предшествованию или по потоку объектов. Для уточнения всегда требует подписи. Может использоваться при отображении задержки по исполнению или пояснении при параллельно исполняемых действиях [They will be applied if it is not possible to describe the relationship by the antecedent or by the flow of objects. For clarification, it always requires a signature. It can be used when displaying a delay in execution or explaining when actions are executed in parallel]






Также следует отметить, что в данной методологии уделено внимание возможности разветвлению процесса. Для этого в нотацию введены логические перекрестки, позволяющие моделировать:

- логическое И (синхронное и асинхронное);
- логическое ИЛИ (синхронное и асинхронное);
- исключающее ИЛИ.

Изображение логических перекрестков, принятых в методологии IDEF3 показаны в табл. 2.

Таблица 2

Изображение логических перекрестков
в нотации IDEF3
[Representation junctions in IDEF3 notation]

Изображение логического перекрестка [Image of a logical intersection]	Наименование [Name]
	Асинхронное И [Asynchronous AND]
	Синхронное И [Synchronous AND]
	Асинхронное ИЛИ [Asynchronous OR]
	Синхронное ИЛИ [Synchronous OR]
	Исключающее ИЛИ [Exclusive OR]

Применение логических перекрестков в данной методологии требует соблюдения определенных требований:

- асинхронное разветвляющее логическое И позволяет запустить на исполнение несколько (все) процессов;
- синхронное разветвляющее логическое И позволяет запустить на исполнение несколько (все) процессов одновременно;
- асинхронное собирающее логическое И позволяет перейти к следующей единице работы после окончания всех ранее запущенных процессов;
- синхронное собирающее логическое И позволяет перейти к следующей единице работы после окончания всех ранее запущенных процессов одновременно;
- асинхронное разветвляющее логическое ИЛИ позволяет запустить на исполнение один или несколько процессов;
- синхронное разветвляющее логическое ИЛИ позволяет запустить на исполнение один или несколько процессов одновременно;
- асинхронное собирающее логическое ИЛИ позволяет перейти к следующей единице работы после окончания одного или нескольких ранее запущенных процессов;
- синхронное собирающее логическое ИЛИ позволяет перейти к следующей единице работы после окончания одного или нескольких ранее запущенных процессов одновременно;
- исключающее ИЛИ бывает только асинхронным разветвляющим, позволяет запустить одну из нескольких единиц работы;
- исключающее ИЛИ собирающее, позволяет перейти к следующей единице работы после окончания одной из ранее запущенных единиц работы;
- если при моделировании процессов использованы логические перекрестки для разветвления, то требуется использовать логический перекресток или единица работы для объединения данного разветвления.

Кроме указанных ранее компонентов методологии существует еще один компонент – объект ссылок.

Объект ссылки в рамках методологии IDEF3 отображает некоторую концепцию, данные или объекты, которые не поддаются описанию с помощью единицы работы или перекрестка. При этом объект ссылок должен быть связан с единицами работы или логическими перекрестками представленными ранее стрелками. Также целесообразно использование данного компонента при моделировании переходящих в нижний уровень декомпозиции объектов, что позволит обеспечить лучшее понимание представленной модели. Типы объектов ссылок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Типы объектов ссылок [Link object types]

Тип объекта ссылки [Link object type]	Цель описания [Purpose of the description]
Объект [Object]	Участие объекта или потока объектов в модели [Participation of an object or a stream of objects in the model]
Ссылка [Link]	Описание цикличности действия, аналогично оператору GOTO [Description of the cyclicity of the action, similar to the GOTO operator]
Единица действия [Unit of action]	Описывает единицу действия, которая может повторяться несколько раз без создания цикла [Describes a unit of action that can be repeated several times without creating a loop]
Заметка [Note]	Документирование важной информации, применяется в качестве заметки, несущей текстовую информацию [Documenting important information, used as a note carrying textual information]
Уточнение [Correction]	Используется для подробного описания работы логического перекрестка [Used for a detailed description of the operation of a logical intersection]

Таким образом получено описание основных компонентов методологии IDEF3 и правил их применения, которыми пользуются аналитики при моделировании технологических особенностей бизнес-процессов. На основе данных правил требуется разработать подход созданию имитационных моделей на основе сетей Петри.

2. ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НОТАЦИИ IDEF3

Сети Петри являются достаточно мощным инструментальным средством имитационного моделирования, которое получило большое количество расширений в рамках своего развития.

В состав данного математического аппарата входят следующие элементы:

- P – множество позиций, используемых для хранения меток;
- T – множество переходов, моделирующих действие над метками и устанавливающих правила обработки меток;
- L – множество дуг, моделирующих соединение в рамках имитационной модели;
- M_0 – начальное распределение меток по позициям в сети.

В общем виде модель сети Петри можно представить в следующем виде:

$$PN = \langle P, T, L, M_0 \rangle, \quad (1)$$

2.1. Моделирование объектов нотации IDEF3 с использованием сетей Петри

В целом модель бизнес-процесса на основе методологии IDEF3 можно представить в следующем виде:

$$Mod_{IDEF3} = \langle UOW, JUN, REF, Arrow \rangle, \quad (2)$$

где UOW – множество единиц работы,

$$UOW = \{UOW_1, UOW_2, \dots, UOW_n\}; \quad (3)$$

JUN – множество логических перекрестков,

$$JUN = \{JUN_1, JUN_2, \dots, JUN_j\}; \quad (4)$$

REF – множество объектов ссылок,

$$REF = \{REF_1, REF_2, \dots, REF_k\}; \quad (5)$$

$Arrow$ – множество объектов ссылок,

$$Arrow = \{ \langle Type, N, IN, OUT \rangle_1, \langle Type, N, IN, OUT \rangle_2, \dots, \langle Type, N, IN, OUT \rangle_i \}; \quad (6)$$

$Type$ – множество типов стрелок,

$$Type = \{Type_{time}, Type_{obj}, Type_{free}\}; \quad (7)$$

IN – номер UOW в который входит стрелка;

OUT – номер UOW в который выходит стрелка;

N – количество объектов, которое перемещается по данному соединению (в случае $Type_{obj}$ или $Type_{free}$ значение N равно 0).

При использовании сетей Петри каждый объект модели должен быть представлен в виде определенной модели. Тогда

$$PN_{IDEF3} = \langle PN_{UOW}, PN_{JUN}, PN_{REF}, PN_{Arrow} \rangle, \quad (8)$$

где PN_{IDEF3} – модель бизнес-процесса на основе методологии IDEF3;

PN_{UOW} – множество моделей единиц работы на основе сетей Петри,

$$PN_{UOW} = \{PNU_1, PNU_2, \dots, PNU_n\}; \quad (9)$$

PN_{JUN} – множество моделей перекрестков на основе сетей Петри,

$$PN_{JUN} = \{PNJ_1, PNJ_2, \dots, PNJ_n\}; \quad (10)$$

PN_{REF} – множество моделей объектов ссылок на основе сетей Петри,

$$PN_{REF} = \{PNR_1, PNR_2, \dots, PNR_k\}; \quad (11)$$

PN_{Arrow} – множество моделей разных типов стрелок на основе сетей Петри.

$$PN_{Arrow} = \{PNA_1, PNA_2, \dots, PNA_i\}; \quad (12)$$

Рассмотрим подход к моделированию объектов нотации сетями Петри.

При моделировании UOW следует разработать сеть Петри, которая отображает особенности единицы работы. Для этого нужно выделить количество позиций входа моделей в соответствии с количеством входных стрелок, промежуточные позиции и переходы, описывающие UOW, а также выходные позиции (рис. 2).

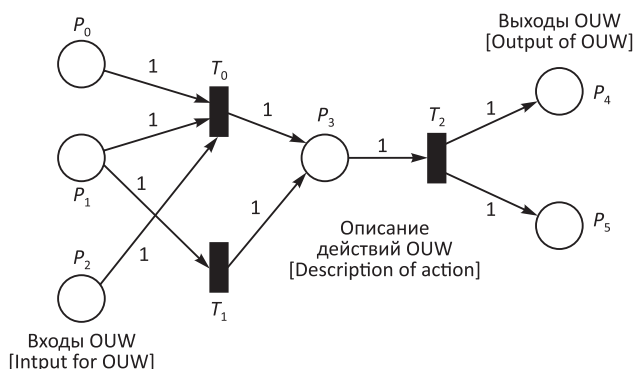


Рис. 2. Примеры моделирования UOW (PNU)

Fig. 2. Examples of model UOW (PNU)

Во входные позиции: P_0, P_1, P_2 размещаются метки, позволяющие запустить модель UOW.

Промежуточный слой позиции P_3 , переходов T_0, T_1 и T_2 моделируют технологические особенности UOW.

Позиции P_4 и P_5 используются для сохранения результатов исполнения UOW моделируют результаты выполнения UOW.

Количество входов в модели UOW соответствует количеству стрелок, требуемых для запуска данной единицы работы, а количество выходов соответствует количеству результатов исполнения.

Рассмотрим возможность моделирования логических перекрестков с применением сетей Петри.

В соответствии с приведенным перечнем перекрестков для каждого типа требуется разработать примеры моделей на основе сетей Петри, с учетом того, что данные перекрестки могут обрабатывать как слияние процессов, так и их разветвление.

На рис. 3 показан пример синхронного логического перекрестка И.

Логика работы предложенной модели следующая. Позиции P_0, P_1, P_2 используются для хранения меток, моделирующих потоки объектов, или ожидания меток-сигналов об окончании предшествующих UOW. Так как данный перекресток подразумевает синхронный

вид окончания UOW для дальнейшего запуска, следовательно, используется позиция P_8 для сбора трех меток (количество меток соответствует количеству UOW, которые должны закончиться одновременно, в примере говорится о трех UOW), о чем говорит вес дуги, соединяющий P_8 и T_4 . При потребности вес данной дуги может быть изменен в соответствии с моделью бизнес-процесса. Позиция P_3 используется в качестве выхода модели логического перекрестка, наличие метки в данной позиции позволяет запустить последующие UOW.

На рис. 4 показана разработанная модель логического перекрестка асинхронного И.

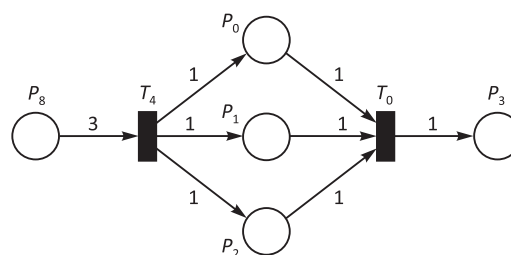


Рис. 3. Модель логического перекрестка синхронного И (слияние)

Fig. 3. Model of junction of synchronous AND

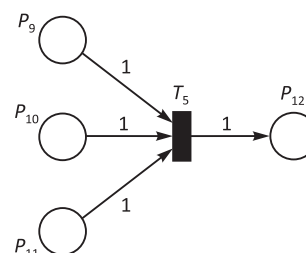


Рис. 4. Модель логического перекрестка асинхронного И (слияние)

Fig. 4. Model of junction of asynchronous AND

Так как работы, проведенные до данного перекрестка не должны быть окончены одновременно, в соответствии с логикой нотации IDEF3, в предложенной модели не используется позиция для сбора (позиция P_8 в прошлой модели). Позиции P_9, P_{10} и P_{11} используются для меток-сигналов или меток-ресурсов от предшествующих UOW. Перекресток T_5 срабатывает только при наличии меток во всех входящих в него позициях. Предложенные модели позволяют работать с требуемым количеством потоков объектов, для этого могут использоваться веса дуг, вес дуги позволяет моделировать количество объектов, которые требуется передать в следующую UOW или Referent.

На рис. 5 показана предложенная модель логического перекрестка синхронного ИЛИ.

Для моделирования данного вида перекрестка используются ингибиторные дуги, которые, в отличие от обычных дуг, позволяют срабатывать переходам при отсутствии меток. Позиции P_{14}, P_{15}, P_{16} моделируют

Петросов Д.А.

хранилище результатов UOW предшествующих данному перекрестку в модели бизнес-процесса. Каждый из перекрестков $T_7, T_8, T_9, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}$ обладает своим правилом срабатывания за счет использования ингибиторных дуг. Рассмотрим в качестве примера правила работы перекрестков T_{14} и T_9 .

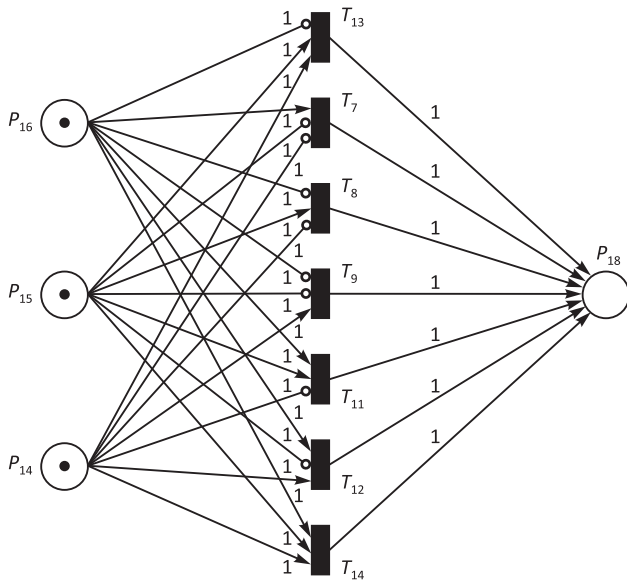


Рис. 5. Модель логического перекрестка синхронного ИЛИ (слияние)

Fig. 5. Model of junction of synchronous OR

T_{14} может сработать при условии наличия меток во всех позициях P_{16}, P_{15} и P_{14} .

T_9 может сработать при отсутствии меток в P_{16} и P_{15} , но при наличии не менее одной метки в позиции P_{14} .

Следующая модель логического перекрестка, которую требовалось разработать – модель асинхронного ИЛИ. На рис. 6 показана предложенная модель.

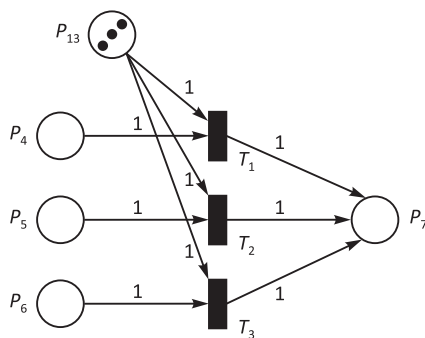


Рис. 6. Модель логического перекрестка асинхронного ИЛИ (слияние)

Fig. 6. Model of junction of asynchronous OR

Модель состоит из позиций хранения результатов работы P_4, P_5 и P_6 , в позиции P_{13} хранятся метки, которые позволяют асинхронно отработать перекресткам T_1, T_2, T_3 , а позиция P_7 сохраняет результаты отработки перекрестков. Количество меток в позиции P_{13} позво-

ляет определить количество срабатывающих переходов при логике перекрестка ИЛИ.

Следующая модель на основе сетей Петри представляет исключающее ИЛИ и показана на рис. 7.

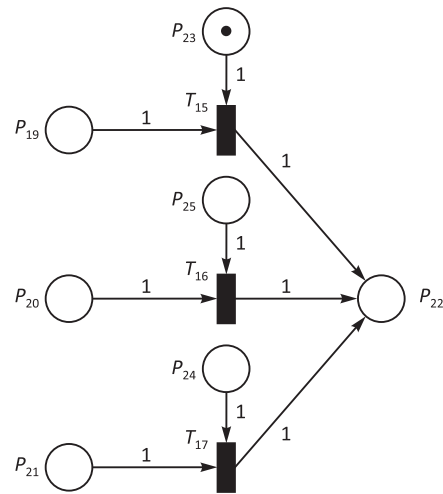


Рис. 7. Модель исключающего ИЛИ (слияние)

Fig. 7. Model of junction of synchronous XOR

В соответствии с логикой работы перекрестка типа XOR к дальнейшему применению могут допускаться только результаты работы одной UOW из всех входящих в логический перекресток. Входами для модели при слиянии являются позиции: P_{19}, P_{20} и P_{21} . В модели предложено использование позиций контроля: P_{23}, P_{25} и P_{24} . В перечисленных позициях может находиться только одна метка, которая позволит запустит один переход из следующих переходов: T_{15}, T_{16} и T_{17} . Активный переход сохранит результат только одной предшествующей логическому перекрестку UOW в позиции P_{22} .

Таким образом были предложены модели логических перекрестков, направленных на слияние результатов UOW, предшествующих перекресткам. Для моделирования сценария разветвления бизнес-процесса следует выполнить дополнительное моделирование, так как предложенные модели не могут быть использованы для решения задачи разветвления.

На рис. 8 представлена модель логического перекрестка синхронного И, применяемая при разветвлении бизнес-процессов в методологии IDEF3.

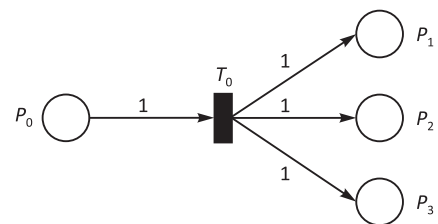


Рис. 8. Модель синхронного И (разветвление)

Fig. 8. Model of junction of synchronous AND

По правилам работы данного вида перекрестка все процессы должны быть запущены одновременно. Соответственно, в позицию P_0 помещается метка, которая активирует переход T_0 , далее метки распространяются в позиции P_1 , P_2 и P_3 , которые являются выходом перекрестка или входами для моделей UOW.

На рис. 9 показана модель асинхронного И, используемая при разветвлении бизнес-процессов. Для реализации представленной модели использовались ингибиторные дуги, которые позволили описать правила работы переходов.

В позиции P_{14} размещается метка с предшествующей UOW, количество меток в данной позиции соответствует количеству запускаемых процессов.

Так как процессы запускаются асинхронно, то следует ограничить возможность повторного запуска процесса, для этого используются ингибиторные дуги.

Таким образом переход T_7 может сработать при условии отсутствия метки (если данная UOW еще не запускалась данным перекрестком) в позиции P_{15} .

Такие же правила используются на переходах T_8 и T_9 , это позволяет выполнить моделирование логики работы разветвляющего асинхронного И.

На рис. 10 показана модель разветвляющего асинхронного ИЛИ.

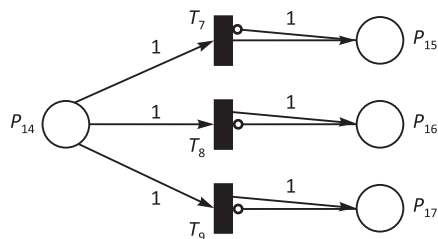


Рис. 9. Модель асинхронного И (разветвление)

Fig. 9. Model of junction of synchronous AND

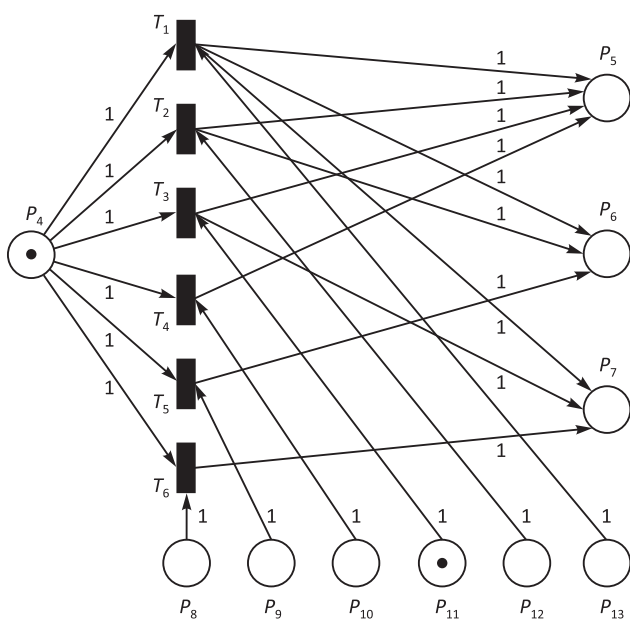


Рис. 10. Модель асинхронного ИЛИ (разветвление)

Fig. 10. Model of Junction of synchronous OR

При моделировании предложено использование не только входа перекрестка P_4 и выходов P_5 , P_6 и P_7 , но и позиций управления P_8 , P_9 , P_{10} , P_{11} , P_{12} и P_{13} , наличие меток в позициях управления позволяют разветвить процессы по требуемым UOW.

На рис. 11 показана модель разветвляющего синхронного ИЛИ. При моделировании данного вида перекрестка также использовался подход, основанный на ингибиторных дугах при формировании правил работы переходов.

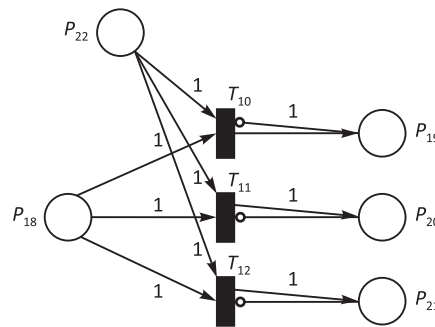


Рис. 11. Модель синхронного ИЛИ (разветвление)

Fig. 11. Model of junction of synchronous OR

Входом для данного перекрестка является позиция P_{18} , P_{22} является позицией контроля, позволяющей запустить нужное количество переходов для активации требуемых UOW в зависимости от количества расположенных в ней меток. Позиции P_{19} , P_{20} и P_{21} используются для моделирования выходов перекрестка или входов UOW, последующих за перекрестком.

На рис. 12 отображена работа модели для разветвляющего перекрестка «Исключающего ИЛИ».

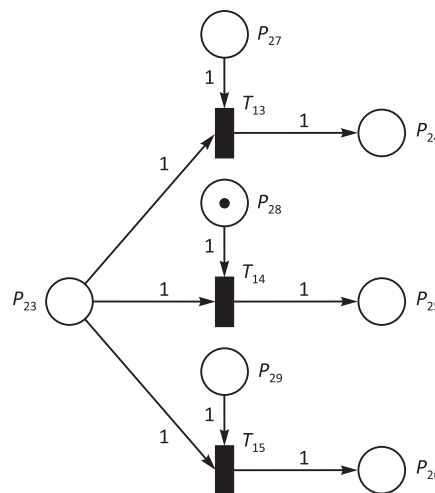


Рис. 12. Модель исключающего ИЛИ (разветвление)

Fig. 12. Model of Junction of synchronous XOR

Работа данной модели соответствует работе модели разветвления, однако в ней изменены входы и выходы. В качестве входа при разветвлении используется P_{23} , а в качестве выходов P_{26} , P_{25} и P_{24} .

Петросов Д.А.

Кроме перекрестков и UOW следует уделить внимание использованию объектов ссылок и стрелок.

При моделировании данных компонентов нотации IDEF3 целесообразно использовать позиции с требуемым количеством меток (Referent) и дуги с весом (для моделирования стрелок). При моделировании потоков объектов вес дуги должен соответствовать количеству передаваемых объектов, а количество меток в позициях Referent также должно соответствовать количеству объектов из внешних ссылок (рис. 13, в показанном примере во внешней ссылке хранится пять объектов, которые передаются в UOW через дугу с весом пять).

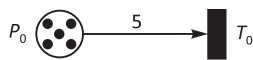


Рис. 13. Пример моделирования источника внешних объектов и стрелки для передачи потока объектов

Fig. 13. An example of modeling a source of external objects and an arrow to convey a stream of objects

Таким образом рассмотрены все компоненты методологии IDEF3 на основе которых можно провести разработку имитационных моделей бизнес-процессов с применением теории сетей Петри.

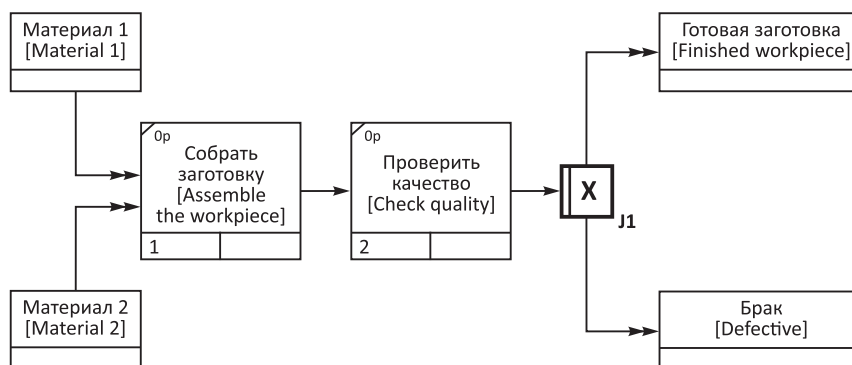


Рис. 14. Пример модели бизнес-процесса на основе методологии IDEF3

Fig. 14. An example of a business process model based on the IDEF3 methodology

Для разработанной модели бизнес-процесса требуется разработать имитационную модель с применением предложенного подхода и моделей на основе сетей Петри.

На рис. 15 показана имитационная модель, построенная в соответствии с моделью бизнес-процесса.

При разработке данной модели использованы подходы, предложенные в рамках данного исследования. В состав модели входят: 11 позиций и 8 переходов, которые кроме графического представления можно представить и в матричном виде (рис. 16).

При анализе полученной модели можно сказать, что она является «неправильной», то есть при построении дерева достижимых маркировок (рис. 17) можно оценить, что существуют моменты времени, при которых может быть активирован не только один переход.

3. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Рассмотрим пример моделирования бизнес-процесса с применением теории сетей Петри.

На рис. 14 показана модель процесса производства заготовки. В данной модели используются следующие компоненты:

1. Referents:

- материал 1;
- материал 2;
- готовая заготовка;
- брак.

2. UOWs:

- собрать заготовку;
- проверить качество.

3. Junctions:

- одно исключающее ИЛИ.

4. Arrows:

- один временной переход;
- четыре поток объектов.

Однако стоит отметить, что достижимые маркировки имеют всего два вида, которые отображают попадание заготовки либо в «Готовая заготовка», либо в «Брак», что полностью соответствует логике бизнес-процесса, построенного на основе методологии IDEF3. На наличие разветвления в дереве достижимых маркировок также повлияло использование логического перекрестка исключающее ИЛИ, но данный факт не нарушил логику модели и использованного математического аппарата, что позволяет говорить о надежности применяемого инструментального средства при решении поставленных задач.

Рассмотрим работу представленной модели.

Позиции P_0 и P_1 служат для хранения меток, моделирующих материалы, на основе которых должна быть выполнена UOW по формированию заготовки.

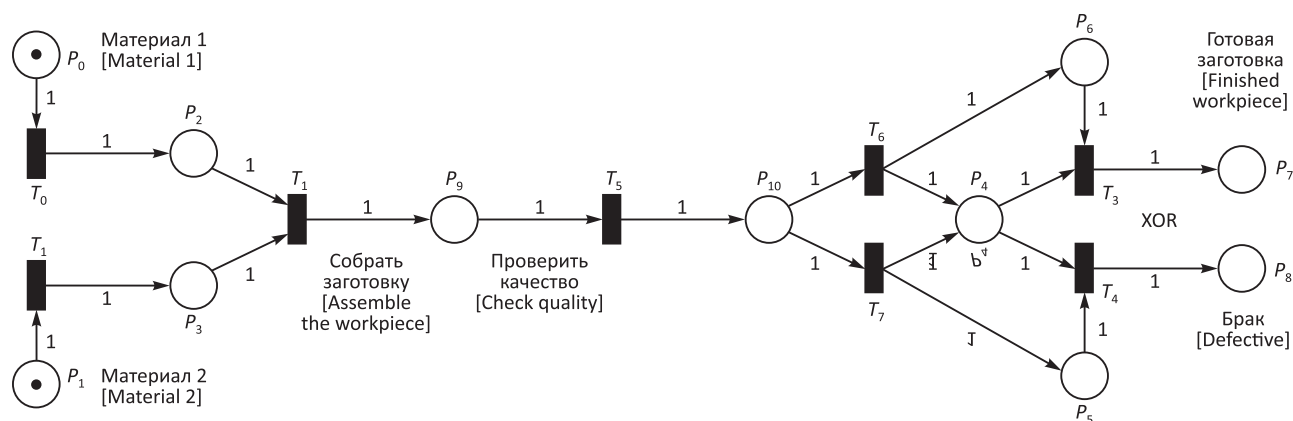


Рис. 15. Модель на основе сети Петри

Fig. 15. An example of a business process model based on the IDEF3 methodology

Forwards incidence matrix I^+									
	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
P_0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P_1	0	0	0	0	0	0	0	0	
P_2	1	0	0	0	0	0	0	0	
P_3	0	1	0	0	0	0	0	0	
P_4	0	0	0	0	0	0	1	1	
P_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P_6	0	0	0	0	0	0	1	0	
P_7	0	0	0	1	0	0	0	0	
P_8	0	0	0	0	1	0	0	0	
P_9	0	0	1	0	0	0	0	0	
P_{10}	0	0	0	0	0	1	0	0	

Backwards incidence matrix I^-									
	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
P_0	1	0	0	0	0	0	0	0	
P_1	0	1	0	0	0	0	0	0	
P_2	0	0	1	0	0	0	0	0	
P_3	0	0	1	0	0	0	0	0	
P_4	0	0	0	1	1	0	0	0	
P_5	0	0	0	0	1	0	0	0	
P_6	0	0	0	1	0	0	0	0	
P_7	0	0	0	0	0	0	0	0	
P_8	0	0	0	0	0	0	0	0	
P_9	0	0	0	0	0	1	0	0	
P_{10}	0	0	0	0	0	0	1	1	

Combined incidence matrix I									
	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
P_0	-1	0	0	0	0	0	0	0	
P_1	0	-1	0	0	0	0	0	0	
P_2	1	0	-1	0	0	0	0	0	
P_3	0	1	-1	0	0	0	0	0	
P_4	0	0	0	-1	-1	0	1	1	
P_5	0	0	0	0	-1	0	0	1	
P_6	0	0	0	-1	0	0	1	0	
P_7	0	0	0	1	0	0	0	0	
P_8	0	0	0	0	1	0	0	0	
P_9	0	0	1	0	0	-1	0	0	
P_{10}	0	0	0	0	0	1	-1	-1	

Marking

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
Initial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Current	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 16. Представление разработанной имитационной модели в матричном виде

Fig. 16. Representation of the developed simulation model in matrix form

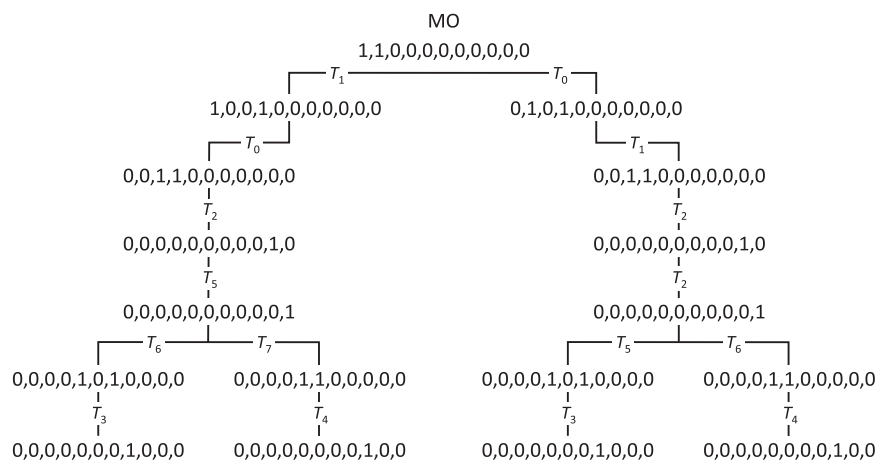


Рис. 17. Дерево достижимых маркировок разработанной модели на основе сетей Петри

Fig. 17. Tree of reachable markings of the developed model based on Petri nets

Данные метки переходят в позиции P_2 и P_3 и активируют переход T_2 в котором и выполняется сборка заготовки. Полученная в результате выполнения UOW заготовка, моделируемая меткой, сохраняется в позиции P_9 . Наличие метки в позиции P_9 активирует переход T_5 , который является UOW связанной с контролем качества полученной заготовкой. Так как данная единица работы подразумевает разветвление, то моделирование данного компонента на заканчивается использованием перехода. Для реализации возможности работы логического перекрестка исключающего ИЛИ, в модели UOW использованы правила, по которым в случае наличия брака метка отправляется в позицию P_6 , если заготовка выполнена правильно, то метка отправляется в позицию P_6 .

Данные позиции являются частью модели логического перекрестка XOR и позволяют активизировать требуемый переход T_3 или T_4 для перевода заготовки или в «Брак», или в «Готовые заготовки». Таким образом разработанная имитационная модель соответствует модели на основе методологии IDEF3. Отметим, что дерево достижимых маркировок может соответствовать временной шкале, которая используется в рассматриваемой нотации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования была проведена работа, связанная с применением теории сетей Петри в задачах моделирования компонентов методологии IDEF3, а также возможности создания полноценных

имитационных моделей технологических процессов на основе данной нотации.

В ходе исследования был проведен анализ состава нотации и основных компонентов с учетом их особенностей. На основе проведенного анализа были предложены подходы к моделированию данных компонентов с применением теории сетей Петри. на основе предложенного подхода проведено моделирование бизнес-процесса, что показало состоятельность данного подхода.

Расширения сетей Петри позволяют моделировать все дискретные и непрерывные процессы, которые могут протекать в бизнес-процессах. Также сети могут использовать временные характеристики и моделировать вложенность, то есть декомпозицию процессов на требуемый уровень.

Также можно отметить, что на основе сетей Петри возможна реализация эволюционных процедур, которые позволяют решать задачи интеллектуального структурно-параметрического синтеза с применением средств параллельного программирования для повышения быстродействия данной процедуры. К такого рода эволюционным алгоритмам могут быть отнесены генетические алгоритмы, в которых предложенный подход может использоваться при кодировании генотипов в бинарном виде.

Использование возможностей сетей Петри, таких как имитационное моделирование, деревья достижимых маркировок и т.д. позволят повысить качество выполнения задач анализа бизнес-процессов, а также повысить функциональные возможности современных CASE-средств.

Литература

1. Лобанова И.А., Тайлакова А.С., Уразовская Т.А. Использование метаописания при изучении визуальной нотации IDEF3 // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 11-и ч. / под ред. А.С. Казьминой. Новосибирск, 2022. С. 152–155.
2. Моисеева А.А., Достовалов Д.Н., Вакорин М.П. Моделирование процесса решения задачи открытого цехового планирования методом имитации отжига в нотациях IDEF0 и IDEF3 // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. В 9 ч. Новосибирск, 2020. С. 221–224.
3. Бобров А.И., Кончаков С.А., Сибиряков М.В. Применение методологии IDEF3 для формализации процессов ведения аварийно-спасательных работ на объектах метрополитена // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 3 ч. М., 2020. С. 498–501.
4. Нерода Е.В. Применение IDEF3-методологии на примере процесса выбора поставщика при судоремонтных работах // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сб. науч. статей 4-й Всероссийской научной конференции. Курск, 2021. С. 323–325.
5. Холодков В.С. Проектирование модуля получения и обработки XML-данных в составе конвертера моделей IDEF0/

References

1. Lobanova I.A., Tailakova A.S., Urazovskaya T.A. Using meta-description when studying IDEF3 visual notation. In: Science. Technologies. Innovation. Collection of scientific papers of the XVI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists. In 11 parts. A.S. Kazmina (ed.). Novosibirsk, 2022. Pp. 152–155.
2. Moiseeva A.A., Dostovalov D.N., Vakorin M.P. Modeling the process of solving the problem of open shop planning using the simulated annealing method in IDEF0 AND IDEF3 notations. In: Science. Technologies. Innovation. Collection of scientific works. In 9 parts. Novosibirsk, 2020. Pp. 221–224.
3. Bobrov A.I., Konchakov S.A., Sibiryakov M.V. Application of the IDEF3 methodology to formalize the processes of conducting emergency rescue operations at metro facilities. In: Civil defense on guard of peace and security. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day. In 3 parts. Moscow, 2020. Pp. 498–501.
4. Neroda E.V. Application of IDEF3 methodology using the example of the process of selecting a supplier during ship repair work. In: Problems and prospects for the development of Russia: A youth perspective on the future. Collection of scientific articles of the 4th All-Russian Scientific Conference. Kursk, 2021. Pp. 323–325.

- IDEF3 в диаграммы языка UML // Решение. 2018. Т. 1. С. 235–236.
6. Холодков В.С., Бейбалаев А.М. Конвертер моделей IDEF0/IDEF3 в диаграммы деятельности языка UML: архитектура проекта в соответствии с паттерном проектирования MVVM // Вестник молодежной науки России. 2019. № 1. С. 44.
7. Соловьева Е.И. Методы моделирования бизнес-процессов в организациях // Современные тенденции развития в области экономики и управления: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2018. С. 197–202.
8. Куркин А.В., Сила М.А. Подготовка базы знаний. Проектирование системы хранения и обработки заявок развивающегося IT продукта // Неделя науки Санкт-Петербургского гос. морского техн. ун-та. 2021. № 1-1. С. 45–51
9. Пителинский К.В., Столяров О.Ю. Анализ взаимодействия материальных, информационных, финансовых потоков с целью увеличения эффективности маркетинговой деятельности логистической компании в сегменте малого и среднего бизнеса // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. IV Международной научно-практической конференции. В 2 ч. 2018. С. 81–87.
10. Семикин Д.В., Кулагина И.И. Подходы к изучению динамики бизнес-процессов посредством математического моделирования // Научный вестник Волгоградского филиала РАНХиГС. Серия: Экономика. 2018. № 1. С. 97–102.
11. Исраилова С.Т., Муханова А.А., Исмаилова А.А. Основные аспекты имитационного моделирования бизнес-процессов предприятия с помощью сетей Петри и агентного моделирования // Новости науки Казахстана. 2021. № 1 (148). С. 1–8.
12. Мешкова В.А. Анализ и моделирование бизнес-процессов с использованием сетей Петри // Тенденции развития современной науки: сб. тр. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Липецкого гос. техн. ун-та. В 2 ч. Липецк, 2021. С. 97–100.
13. Мельник Г.В., Скицко В.И. Моделирование логистических бизнес-процессов с использованием раскрашенных сетей Петри // Актуальные проблемы экономики. 2015. Т. 168. № 6. С. 429–443.
14. Петросов Д.А. Моделирование бизнес-процессов с применением методов интеллектуального структурно-параметрического синтеза на основе эволюционных процедур // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов: сб. матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. М., 2022. С. 24–27.
15. Каленкова А.А. Синтез высокоуровневых моделей бизнес-процессов. НИР: грант № 15-37-21103. Российский фонд фундаментальных исследований. 2015. 224 с.
16. Калянов Г.Н. О теории бизнес-процессов // Программная инженерия. 2018. Т. 9. № 3. С. 99–108.
17. Марголин М.С. Структура имитационных программных средств, предназначенных для моделирования и анализа нечетких бизнес-процессов // Вестник научных конференций. 2017. № 10-4 (26). С. 64–73.
18. Шершаков С.А. «Vtmine for visio»: инструмент графического моделирования в области process mining // Моделирование и анализ информационных систем. 2020. Т. 27. № 2. С. 194–217.
5. Kholodkov V.S. Designing a module for receiving and processing XML data as part of the IDEF0/IDEF3 model converter into UML language diagrams. *Solution*. 2018. Vol. 1. Pp. 235–236. (In Rus.)
6. Kholodkov V.S., Beibalaev A.M. Converter of IDEF0/IDEF3 models into UML language activity diagrams: Project architecture in accordance with the MVVM design pattern. *Bulletin of Russian Youth Science*. 2019. No. 1. P. 44. (In Rus.)
7. Solovyova E.I. Methods for modeling business processes in organizations. In: Modern trends in development in the field of economics and management. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2018. Pp. 197–202. (In Russ.)
8. Kurkin A.V., Sila M.A. Preparing a knowledge base. Design of a system for storing and processing applications for a developing IT product. *Science Week of the St. Petersburg State Maritime Technical University*. 2021. No. 1-1. Pp. 45–51. (In Rus.)
9. Pitelinsky K.V., Stolyarov O.Yu. Analysis of the interaction of material, information, financial flows in order to increase the efficiency of marketing activities of a logistics company in the small and medium-sized business segment. In: Modern scientific research: Current issues, achievements and innovations. Collection of articles of the IV International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. 2018. Pp. 81–87.
10. Semikin D.V., Kulagina I.I. Approaches to studying the dynamics of business processes through mathematical modeling. *Scientific Bulletin of the Volgograd Branch of RANEPa. Series: Economics*. 2018. No. 1. Pp. 97–102. (In Rus.)
11. Israilova S.T., Mukhanova A.A., Ismailova A.A. Main aspects of simulation modeling of enterprise business processes using Petri nets and agent-based modeling. *Science news of Kazakhstan*. 2021. No. 1 (148). Pp. 1–8. (In Rus.)
12. Meshkova V.A. Analysis and modeling of business processes using Petri nets. In: Trends in the development of modern science. Collection of proceedings of the Scientific and Practical Conference of Students and Graduate Students of the Lipetsk State Technical University. In 11 parts. Lipetsk, 2021. Pp. 97–100.
13. Melnik G.V., Skitsko V.I. Modeling of logistics business processes using colored Petri nets. *Current Problems of Economics*. 2015. Vol. 168. No. 6. Pp. 429–443. (In Rus.)
14. Petrosov D.A. Modeling of business processes using methods of intellectual structural-parametric synthesis based on evolutionary procedures. In: Current problems of society, economics and law in the context of global challenges. Collection of materials of the XI International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2022. Pp. 24–27.
15. Kalenkova A.A. Synthesis of high-level models of business processes. Research work: Grant No. 15-37-21103. Russian Foundation for Basic Research. 2015. 224 p.
16. Kalyanov G.N. On the theory of business processes. *Software Engineering*. 2018. Vol. 9. No. 3. Pp. 99–108. (In Rus.)
17. Margolin M.S. Structure of simulation software designed for modeling and analysis of fuzzy business processes. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2017. No. 10-4 (26). Pp. 64–73. (In Rus.)
18. Shershakov S.A. “Vtmine for visio”: A graphical modeling tool in the field of process mining. *Modeling and Analysis of Information Systems*. 2020. Vol. 27. No. 2. Pp. 194–217 (In Rus.)

Петросов Д.А.

Статья проверена программой Антиплагиат. Оригинальность – 82,69%

Р е ц е н з е н т: *Гринева Н.В.*, кандидат экономических наук, доцент; доцент департамента анализа данных и машинного обучения; Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Статья поступила в редакцию 25.08.2023, принята к публикации 26.09.2023

The article was received on 25.08.2023, accepted for publication 26.09.2023

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Петросов Давид Арегович, кандидат технических наук, доцент; доцент департамента анализа данных и машинного обучения; Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; Москва, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-8214-052X; E-mail: dapetrosov@fa.ru

ABOUT THE AUTHOR

David A. Petrosov, Candidate of Engineering, Associate Professor; associate professor at the Department of Data Analysis and Machine Learning; Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-8214-052X; E-mail: dapetrosov@fa.ru