

УДК 519.876.5+681.518.5+656.259.9

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДА ОТ IDEFO-ДИАГРАММЫ К GPSS-МОДЕЛИ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

**БЕЛИШКИНА Татьяна Алексеевна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: belishkina@mail.ru  
**КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: at-tanya@mail.ru  
**ЛЫКОВ Андрей Александрович**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: bastdrew@mail.ru  
**МАРКОВ Дмитрий Спиридонович**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: MDS1945@yandex.ru  
**МИКАДО Елена Николаевна**, заведующий лабораторией; e-mail: mikadowork@yandex.ru  
**СОКОЛОВ Вадим Борисович**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: SVB9@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

Целью статьи является изложение результатов формализации описания и разработки формализованного перехода от статической функциональной IDEFO-модели к динамической, имитационной модели жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Для программной реализации имитационных моделей традиционно используется инструментальное средство GPSS World. Предложена концепция представления формализмов IDEFO-диаграммы по математической схеме массового обслуживания. Основными положениями концепции являются объект-заявка, тип которой определяется видом объектов, а механизм — обслуживающим устройством. Свойства этих заявок и обслуживающих устройств записываются в строки матрицы паспортов; связи в соответствии с IDEFO-диаграммой указываются записью индексов блока-функции последовательно в строке данного блока-функции. Возможность реализации функции блока-функции оценивается булевой функцией. Аргументами этой функции являются признак управления, требуемые ресурсы, состояние обслуживающих устройств. Проверка функции блока-функции осуществляется булевой функцией мониторинга времени занятия блока-функции. Для реализации данной концепции определены средства GPSS World: непрерывная и дискретная функции, транзакты, одноканальные устройства, логические ключи, матрица  $MX\$PASPO1$ , список пользователей, булевы переменные. Универсальная GPSS-модель, настроенная на конкретную IDEFO-диаграмму на уровне исходных данных, разработана на основе косвенной адресации указанных средств. При этом она позволяет не изменять текст программы.

Разработанная GPSS-программа формализует возможность и целесообразность перехода от IDEFO-диаграммы к GPSS-модели жизненного цикла систем железнодорожной автоматики.

**Ключевые слова:** IDEFO-диаграмма, жизненный цикл, системы железнодорожной автоматики и телемеханики, математические схемы массового обслуживания, имитационная GPSS-модель, косвенная адресация, имитационная модель, системы массового обслуживания.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-155-165

## ▼ Введение

Поскольку, как известно, системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) — это сложные системы, то они обладают следующими свойствами [1]:

- объект управления совместно с СЖАТ образует сложный автоматизированный технологический комплекс, включающий станции, перегоны, сортировочные горки, круги диспетчерской централизации;

- осуществление множества технологических процессов;
- выполнение функций с контролем обеспечения условий безопасности движения поездов;
- реализация СЖАТ в виде сложных аппаратно-программных комплексов;
- реализация функций технологических процессов программными средствами;
- защита от опасных отказов аппаратных, аппаратно-программных и программных средств систем;

- иерархическая структура СЖАТ;
- человеко-машинные системы со сложным интерфейсом;
- распределение функций по уровням иерархии, а также между техническими средствами и человеком-оператором;
- функционирование в реальном масштабе времени;
- распределенное расположение устройств и подсистем (постовое и напольное технологическое оборудование);
- сложные взаимосвязи между различными объектами в системе управления (перегон, станция, переезд, сортировочная горка, подвижные объекты);
- большое количество разнородных элементов со сложными связями;
- долгосрочность функционирования;
- наличие большого количества нормативных документов различного статуса (иногда противоречивых);
- необходимость системы технической эксплуатации, обеспечивающей поддержку исправного и (или) работоспособного состояния систем на протяжении всего периода технической эксплуатации, хранения и транспортирования;
- сложный, многоэтапный, длительный по времени жизненный цикл (ЖЦ) СЖАТ;
- воздействия внешней среды, включая климатические, электромагнитные, механические, электрохимические.

Приведенные свойства СЖАТ определяют сложность и многоэтапность их ЖЦ. ЖЦ СЖАТ — это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов — от формирования концепции безопасности и исходных требований к устройству или СЖАТ до вывода из эксплуатации и утилизации.

ЖЦ СЖАТ включает следующие основные процессы [1]:

1. Разработку эксплуатационно-технических требований.
2. Разработку концепции безопасности и соответствующих документов.
3. Разработку аппаратно-программных решений и конструкторско-технической документации в виде альбомов типовых решений.
4. Доказательство безопасности принятых технических, программных решений, и сертификация на безопасность.
5. Тиражирование — проектирование аппаратно-программных средств СЖАТ для конкретных объектов железнодорожного транспорта и их изготовление по заказным спецификациям проекта.
6. Транспортирование и хранение оборудования и материалов на объекте внедрения СЖАТ.
7. Выполнение по проекту строительных, монтажных и пусконаладочных работ на объекте, проведение соответствующих испытаний и ввод в эксплуатацию.
8. Технологическая, техническая эксплуатация и модернизация в процессе эксплуатации.
9. Корректировку технической документации по результатам тиражирования, технологической и технической эксплуатации, модернизации.
10. Прекращение тиражирования и выполнение процедур вывода СЖАТ из эксплуатации и утилизацию на конкретных объектах.

Анализ приведенных составляющих ЖЦ СЖАТ позволяет выделить три взаимосвязанных, но довольно самостоятельных процесса:

1. ЖЦ разработки (этапы 1, 2, 3, 4), который заканчивается как этап (но не заканчивается никогда) комплектом технической документации, например альбомы типовых решений, сертификацией на безопасность.
2. ЖЦ конкретного экземпляра системы (этапы 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14): тиражирование для конкретных объектов (проектирование, изготовление, транспортирование и хранение, строительство, пусконаладочные работы, испытания, ввод в эксплуатацию), технологическая и техническая эксплуатация, модификация и модернизация на основании мониторинга СЖАТ, прекращение тиражирования и утилизация.
3. ЖЦ технической документации (этапы 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13) (например, альбомы типовых решений) на вид системы,

например, ЭЦ-ЕМ. Доработка и корректировка по результатам тиражирования; технологической, технической эксплуатации и модернизации на конкретных объектах; при появлении новых идей, технических и программных средств и решений.

Наглядное представление структуры ЖЦ СЖАТ сформировано на основе введенных положений и приведено на рис. 1. Данная схема не является моделью в концепции ГОСТ Р 54504-2011, СТО РЖД 1.02.030-2010 УРРАН, ГОСТ Р ИСО 15704-2022, но может помочь определиться с выбором модели ЖЦ СЖАТ. Следует отметить, что выбор адекватной и эффективной модели является важнейшей проблемой организации, контроля и управления ЖЦ СЖАТ.

Известны следующие модели ЖЦ информационных систем, применимых в том числе для СЖАТ:

- каскадная;
- инкрементная;
- итерационная;
- спиральная;
- V-образная.

Они нашли наибольшее применение для детально формализованных и регламентированных в нормативной документации процессов ЖЦ сложных программных комплексов, включая процедуры верификации/валидации как отдельных этапов ЖЦ, так и программного продукта в целом.

V-образная модель с итеративными циклами выбрана в качестве модели ЖЦ железнодорожной техники<sup>1</sup>. Однако данная модель обладает существенными недостатками для моделирования ЖЦ СЖАТ:

- отсутствие средств координированного представления фактически трех вложенных ЖЦ для СЖАТ одного типа;
- сложность поддержки параллельных процессов;
- сложность представления большого количества разнородных участников на различных этапах ЖЦ СЖАТ;

- невозможность внесения динамических изменений в требования на разных этапах ЖЦ;
- невозможность перехода к динамической модели процессов с целью оценки операционных характеристик ЖЦ СЖАТ;
- отсутствие средств представления оценок времени выполнения процессов ЖЦ;
- отсутствие действий по мониторингу качества выполнения процессов ЖЦ.

Приведенные положения позволяют сделать вывод о целесообразности дополнения V-образной модели ЖЦ моделями, построенными на основе инструментов, позволяющих преодолеть указанные недостатки V-модели. По мнению авторов, такими инструментами являются рассматриваемые как единое средство синтеза модели, функциональные *IDEFO*-диаграммы<sup>2</sup> и имитационные модели (ИМ) [2–4] ЖЦ СЖАТ.

#### Основные положения

Инструментальное средство функционального моделирования [2, 5, 6] *IDEFO* имеет следующие преимущества как средства описания ЖЦ СЖАТ:

- формализованное описание в виде последовательно-параллельно выполняемых функций и процессов, составляющих ЖЦ СЖАТ;
- полнота описания выполнения функций и их связей за счет наличия формализмов блока-функции (БФ):
  - идентификатор БФ;
  - объект;
  - вход;
  - управление;
  - идентификатор выполняемой функции;
  - механизм;
  - ресурсы;
  - мониторинг качества выполнения функции;
  - выход [2, 3, 5];
- описание моделируемых процессов обеспечивает эргономичность коммуникаций участников ЖЦ СЖАТ;

<sup>1</sup> ГОСТ Р 54504-2011 «Безопасность, функциональная политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта».

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО 10303-1 «Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными».

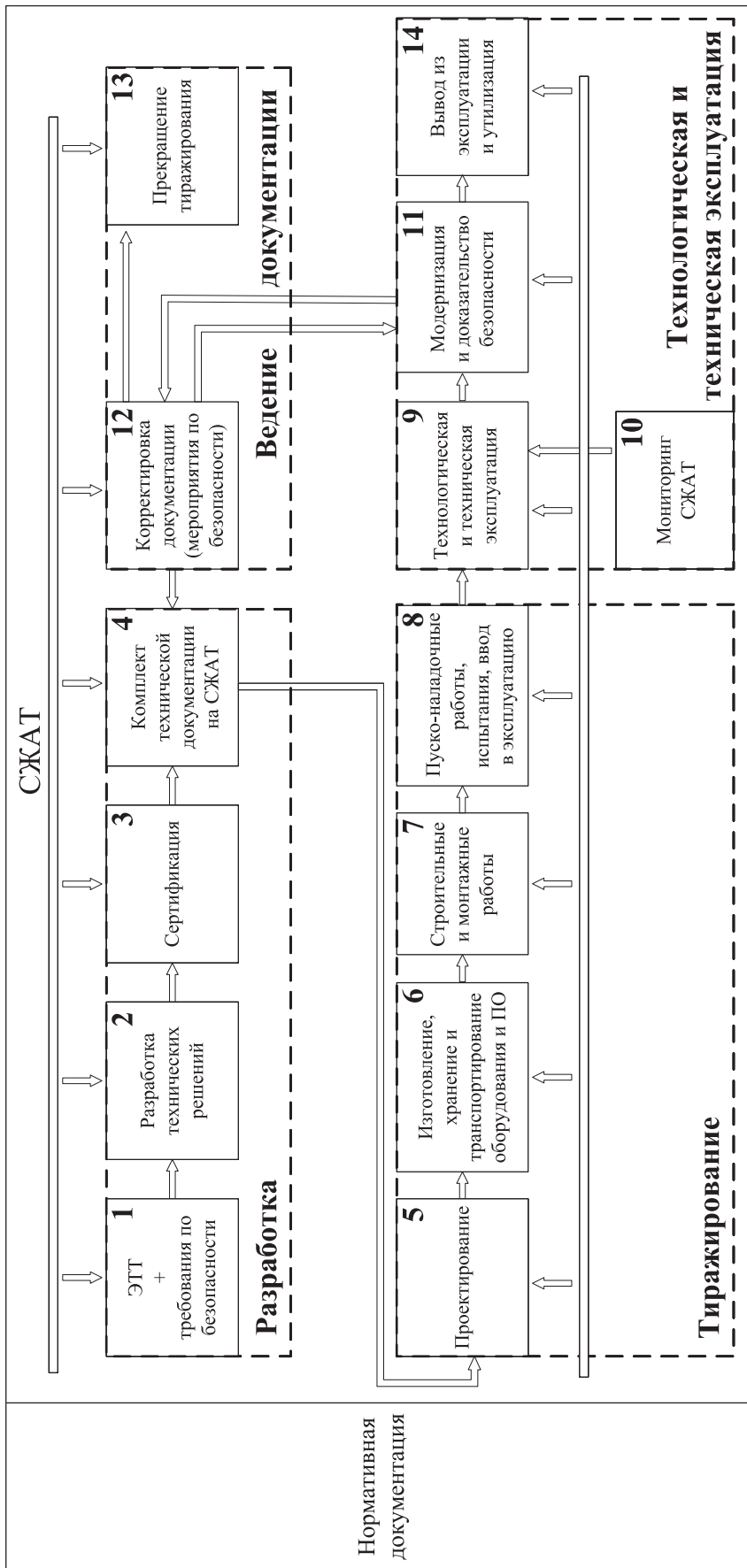


Рис. 1. Структура ЖЦ СЖАТ

- описание иерархических процессов с обеспечением заданного уровня детализации;
- жесткие правила и формализмы *IDEFO*-диаграмм увеличивают достоверность и адекватность функционального моделирования.

Достоинства *IDEFO*-диаграмм, наличие нормативной базы и многолетний опыт применения для функционального моделирования различных бизнес- и производственных процессов позволяют сделать вывод о целесообразности их применения для многоуровневого и детального описания ЖЦ СЖАТ с целью контроля и управления. Однако очевидна необходимость количественной оценки операционных характеристик ЖЦ, что требует преобразования статической *IDEFO*-диаграмм в динамическую, имитационную модель [7–9] сложнейших процессов ЖЦ СЖАТ.

Таким образом, синтез единого инструментального средства моделирования предполагает в качестве главной задачи решение формализованного перехода от статических *IDEFO*-диаграмм к ИМ [10–12] ЖЦ СЖАТ. Описание ЖЦ СЖАТ в соответствии с приведенными во введении положениями с использованием *IDEFO*-диаграмм представляется менее сложной проблемой и целесообразно после принципиального решения предыдущей задачи.

Тогда целью данной работы является демонстрация возможности формализованного перехода от *IDEFO*-диаграмм к ИМ ЖЦ СЖАТ.

*IDEFO*-диаграмма в виде последовательности, связанных стрелками-дугами БФ (рис. 2), описывающими с необходимой конкретизацией функциональную структуру моделируемой системы и (или) выполняемого процесса над объектом.

Под объектами моделирования понимаются:

- устройства;
- кабельные сети;
- системы энергообеспечения;
- подсистемы системы ЖАТ;
- комплекты технических документов.

Формализм БФ включает:

- трехзначный числовой идентификатор, присваиваемый каждому  $BF_i$  с учетом уровня иерархии (первая цифра), ин-

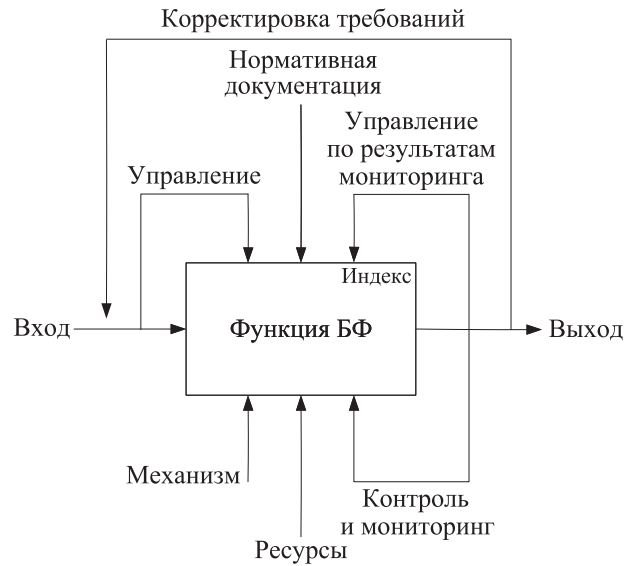


Рис. 2. *IDEFO*-диаграмма ЖЦ СЖАТ

декса *IDEFO*-диаграммы данного уровня (вторая цифра), индекса конкретного БФ (третья цифра);

- семантику БФ;
- механизм, выполняющий функцию данного БФ;
- ресурсы для выполнения функции механизмом;
- управление (нормативные документы, приказы, задания, сигналы готовности к выполнению следующего блока и т. п.);
- мониторинг качества выполнения функции (верификация/валидация);
- решение по результатам мониторинга о переходе к следующему БФ или корректировке требований и повторному выполнению данного БФ;
- вход БФ — поступление объекта на выполнение функции механизмом с учетом сигналов управления, состояния механизма, наличия ресурсов. Поступления либо со входа системы, либо с предыдущего БФ;
- выход — переход объекта по результатам мониторинга качества выполнения функции к следующему БФ или готового объекта из системы. Содержание формализмов зависит от конкретных моделируемых этапов и процессов ЖЦ СЖАТ, несущественно для решаемой задачи и не рассматривается в данной работе.



### Концепция перехода от *IDEF0*-к *GPSS*-модели ЖЦ СЖАТ

1. Предлагается осуществлять переход от статической *IDEF0*-диаграммы к динамической *GPSS*-модели [7, 11] с помощью математической схемы массового обслуживания (МСМО).

2. Соотношения понятий *IDEF0*-диаграмм МСМО можно сформулировать следующим образом:

- объектами моделирования, над которыми выполняется функция  $B\Phi_j$ , являются заявки-объекты  $O_j, j = 1, J$  разного типа;
- каждый из объектов обладает набором характеристик, включая вид заявки-объекта  $O_j$ , а также должен иметь набор параметров, соответствующих характеристикам объекта. В этом случае определяющим параметром является тип заявки  $J$ ;
- МСМО определяются вероятностно-временные характеристики потока  $O_j$   $F(\tau_o)$  и интенсивности  $\lambda_j$  поступления в моделируемую систему заявок  $j$ -го типа, чтобы обеспечить переход к динамической *GPSS*-модели;
- за механизмы  $B\Phi_i$  принимают обслуживающие устройства различного вида  $u_i, i = 1, I$ ;
- для возможности перехода к динамической *GPSS*-модели определяются вероятностно-временные характеристики  $F(\tau_{ui})$  обслуживания заявок  $j$ -го типа  $i$ -м устройством  $u_i$ ;
- управление — специальные активности, которые могут поступать в БФ в виде заявок управлений  $V_j$  или параллельно с заявками  $O_j$ ;
- активности формируют признак наличия управления для данного БФ;
- наличие признака поступления в БФ сигнала управления  $V_j$ , требуемых ресурсов для выполнения функции, состояние обслуживающих устройств проверяются булевыми функциями  $BV_i$ ;
- наличие ресурсов для выполнения функции БФ — элемент памяти с текущим значением объема ресурса;
- поступление и расход ресурсов — ведение элементов памяти либо стохастическим

образом, либо специальной моделью управления запасами.

3. Динамическая модель *IDEF0* как МСМО реализует асинхронный дискретно-событийный процесс выполнения функций  $B\Phi_i$  над заявками  $O_j$ . Основными событиями являются:

- поступление в модель  $B\Phi_i$  заявки  $V_j$  и формирование признака наличия управления;
- поступление заявки  $O_j$  на вход модели  $B\Phi_i$ ;
- занятие обслуживающего устройства  $u_i$  заявкой  $O_j$ ;
- выполнение обслуживания  $O_j$ ;
- окончание обслуживания заявки  $O_j$  обслуживающим устройством  $u_i$ ;
- освобождение обслуживающего устройства  $u_i$ ;
- выполнение процедур мониторинга времени обслуживания;
- передача  $O_j$  на выход  $B\Phi_i$ .

4. Каждому типу заявки  $j$  ставится в соответствие строка матрицы-вектора, в столбце которой записан индекс  $i$  БФ на входе *IDEF0*-диаграммы.

5. Каждому  $B\Phi_i$  присписывается паспорт, содержащий следующую информацию:

- идентификатор данного БФ;
- идентификатор БФ-последователя;
- вероятностно-временные характеристики поступления заявок на вход БФ;
- возобновления ресурса;
- выполнения функции механизмом;
- наличие ресурса.

6. Паспорта  $B\Phi_i$  объединяются в матрицу паспортов, номера строк которой соответствуют индексам  $i$  БФ, что позволяет организовать в модели МСМО связи между  $B\Phi_i$  по обработке заявок  $O_j$  в соответствии с моделируемой *IDEF0*-диаграммой.

7. В *GPSS*-модели последовательность  $B\Phi_i$  *IDEF0*-диаграммы ЖЦ СЖАТ представляется как многофазная, многоканальная система массового обслуживания (СМО). В процессе выполнения последовательно-параллельной обработки потока заявок  $O_j$  обслуживающими устройствами  $B\Phi_i$  производится проверка булевыми функциями наличия признака поступления заявок  $V_j$  и требуемых для выполнения функции ресурсов.

В предложенной концепции используются следующие средства *GPSS World* [7, 13]:

1. Заявки  $O_j$  и  $V_j$  представляются объектами динамической *GPSS*-модели — транзактами  $TO_j$  и  $TV_j$  соответственно.

2. На вход управления подается динамический объект *GPSS* — транзакт  $TV_j$ .

3. Транзакт  $TV_j$  включает логический ключ  $LK(i)$  в качестве признака наличия сигнала управления на  $i$ -й БФ.

4. На вход  $БФ_i$  вводится транзакт  $TO_j$ , который с проверкой поступления сигнала управления (включен  $LK(i)$ , наличия ресурсов, свободности обслуживающего устройства  $u_i$ , передается на его вход.

5. Проверка условий занятия обслуживающего устройства  $u_i$  (модель механизма) выполняется булевыми переменными  $BV\$BFB(i)$ .

6. Задание времени выполнения функции в механизме выполняется на основе нормативных документов, экспертных оценок, тестовых обследований, всевозможных корректировок по качеству технической документации, наличию и достаточности ресурсов, доступности механизма по загрузке БФ.

7. Входящий в систему поток транзактов  $TO_j$  должен синхронизироваться с поступлением транзактов  $TV_j$ .

8. Генерация потока транзактов  $TO_j$  должна выполняться управляемым генератором, построенным на основе операторов *GENERATE*, *ADVANCE* и *SPLIT*.

9. При невозможности занятия механизма  $БФ_i$  по результатам проверки  $BV\$BFB(i)$  транзакт  $TO_j$  оператором *LINK* направляется в список пользователя  $SPP\$BFS(i)$ . Изъятие  $TO_j$  из  $SPP\$BFS(i)$  на выполнение функции механизмом реализуется оператором *UNLINK* при выполнении условий возможности занятия механизма.

10. Ввод  $TO_j$  в модель механизма  $u_i$  должен выполняться с проверкой оператором *TEST* булевой переменной *GPSS*, аргументами которой являются признак наличия сигнала управления, состояния механизма, наличия ресурсов.

11. Выход транзакта  $TO_j$  из  $БФ_i$  выполняется по результатам мониторинга (верификация/валидация) выполнения функции по

нормативному времени. Проверка удовлетворения требованиям нормативной документации выполняется оператором *TEST*, который оценивает значение булевой переменной  $BV\$BFB(i)$  по соответствию параметров  $TO_j$  требованиям НД. При выполнении требований  $TO_j$  переходит к следующему БФ. В противном случае возвращается на вход модели механизма  $u_i$  на частичный повтор выполнения функции с уменьшенным временем (доработка объекта) либо переходит к следующему БФ с регистрацией в параметр *P\$MTR* превышения нормативного времени выполнения функции.

12. Модель механизма может строиться на основе следующих подходов:

- использование одноканального устройства и операторов *SEIZE*, *RELEASE*, *ADVANCE*;
- использование памяти и оператора *ENTER*, *LEAVE*, *ADVANCE*;
- использование логических ключей и операторов *LOGIC*, *GATE*, *ADVANCE*.

В данной работе в качестве модели механизма использовано одноканальное устройство.

13. Связи БФ с входами *IDEF0*-диаграммы реализуются матрицей-вектором  $MX\$TYPINDBF$ , строки которой нумеруются по типу заявки  $j$ , а в столбцах записаны индексы  $i$  БФ.

14. Связи между БФ реализуются матрицей паспортов  $MX\$PASP01$ , по строкам которой на уровне исходных данных записываются данные паспортов по индексам БФ.

15. Все используемые объекты *GPSS World* при обращении в *GPSS*-программе должны использовать косвенную адресацию.

16. Времена поступления  $TO_j$  и  $TV_j$  в систему, выполнения функции БФ и нормативного значения задаются на уровне исходных данных в качестве элементов матрицы паспортов  $MX\$PASP01$ .

В соответствии с концепцией в комплексе с выбранными средствами *GPSS World* разработана демонстрационная *GPSS*-модель, подтвердившая целесообразность и возможность динамического моделирования *IDEF0*-диаграмм ЖЦ СЖАТ.

GPSS-модель IDEFO-диаграммы

typ1 equ 1	
typ1 function rn10,d2; .5,11/1,11	тип $j TO_j$ по значениям $\lambda_j$
Typindbf equ 2	
Typindbf matrix ,20,2; initial mx2(11,1),1;	соотношения $J$ и $I$ $I$ по входу для $J$
pas01 equ 1	
pas01 matrix ,10,10; initial mx1(1,1),1; initial mx1(1,2),2; initial mx1(1,3),50; initial mx1(1,4),40; initial mx1(1,5),60; initial mx1(1,6),20; initial mx1(1,7),1; initial mx1(1,8),100; initial mx1(1,9),20; initial mx1(1,10),1; generate 1,,1;	матрица паспортов БФ индекс данного БФ индекс БФ последователя среднее время выполнения функции БФ модификатор времени $\Phi$ среднее время мониторинга модификатор времени $M$ наличие ресурса среднее время поступления ресурса модификатор времени $P$ разрешение генерации $TO_j$ генерация транзактов время между $TO_j$ наличие разрешения на $TO_j$
dval advance 100,20; test e mx1(1,10),1; split 1,dval; assign 1,fn\$typ1; assign 1,fn1; assign 1,mx2(11,1); assign 1,mx*1(*1,1);	для обращения к $mx1(1,1)$ тип заявки $j$ индекс БФ по $J$ БФ-последователь по входу разделение на $TO_j$ и $TV_j$
pos1 split 1,sigU; advance 2 transfer ,sig1	
bupr01 equ 1	
bupr01 bvariable ls*1'and'mx*1(*1,7)'e'1;	условия выполнения функции БФ расчет времени обслуживания
mon variable c1-p100;	
neud equ 1	
neud table p102,5,10,15;	таблица результатов мониторинга
sigU logic s *1; terminate generate mx1(1,8),mx1(1,9); assign 1,1; assign 1,mx*1(*1,1); msavevalue *1,*1,7,1; terminate	признак поступления транзакта $TV_j$  поступление ресурса для обращения к $mx1(1,1)$ БФ-последователь по входу поступил ресурс
sig1 assign 100,c1; savevalue 100,*100; test e bv*1,1; gate nu p1,polz; seize *1; advance mx*1(*1,3),mx*1(*1,4); release *1;	начало выполнения функции БФ тест времени моделирования возможности выполнения функции БФ проверка свободности устройства *1 занятие механизма БФ время выполнения функции БФ освобождение механизма



```

msavevalue *1,*1,7,0;
assign      101,(c1-p100);
unlink      p1,pos1,1;
test 1      *101,mx*1(1,5),MMN;
savevalue  103+,1;
logic r     *1;
transfer    ,sig2;
ttt         terminate 1
MMN         savevalue 104+,1;
           logic r     *1;
           assign      102,(p101-mx*1(1,5));
           tabulate    *1;
sig2        assign      1,mx1(*1,2);
           terminate 1
           transfer    ,pos1
           terminate 1
polz        link p1,fifo;
    
```

израсходован ресурс  
 время обслуживания механизмом  
 вывод  $TO_j$  из списка пользователя  
 мониторинг выполнения функции БФ  
 удовлетворительные обслуживания  
 снятие признака наличия управления  
 переход к БФ-последователю

неудовлетворительные обслуживания  
 снят признак управления  
 результат мониторинга  
 гистограмма результата мониторинга  
 идентификатор следующего БФ

ввод  $TO_j$  в список пользователя p1

### Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. Предложено формализовать модель ЖЦ СЖАТ с использованием функциональных *IDEF0*-диаграмм. С этой целью расширен функционал БФ за счет добавления функции мониторинга (верификации и валидации) результатов выполнения функции БФ над  $O_j$ .

2. Выделено три взаимосвязанных процесса в ЖЦ СЖАТ: разработка и сертификация на безопасность; тиражирование для конкретных объектов и модернизация; ведение технической документации.

3. Предложено выполнить переход от статической функциональной *IDEF0*-диаграммы к динамической *GPSS*-модели процессов ЖЦ СЖАТ на основе МСМО.

4. Установлено соответствие понятийных аппаратов *IDEF0*-диаграмм МСМО.

5. Разработана концепция формализации перехода от *IDEF0*-диаграмм к *GPSS*-модели.

6. Определены инструментальные средства *GPSS World* для моделирования ЖЦ СЖАТ по *IDEF0*-диаграммам.

7. Применение косвенной адресации объектов *GPSS* позволяет моделировать одной *GPSS*-программой *IDEF0*-диаграмму, содержащую любое количество БФ, задавая характеристики модели на уровне исходных данных.

8. Формализовано понятие матрицы паспортов *MX\$PASPOI*: строки матрицы идентифици-

руются по типу заявок, а в столбцы по типу  $O_j$ , заносятся данные о характеристиках заявки, механизме и связях с другими БФ ( $j$ -я строка — паспорт *БФ<sub>j</sub>*) статической *IDEF0*-диаграммы.

9. Разработана демонстрационная *GPSS*-программа, подтвердившая правильность разработанной и принятой концепции перехода от статической *IDEF0*-диаграммы к динамической *GPSS*-модели.

Предполагается развитие *GPSS*-модели *IDEF0* по следующим направлениям:

1. Расширение характеристик объектов и БФ, представляемых в матрице паспортов *MX\$PASPO*, например, объем работ по выполнению функций БФ по объекту  $j$ -го типа, вид обслуживающего устройства для моделирования механизма каждого БФ, количество и виды ресурсов, необходимых для выполнения функции БФ, и т. п.

2. Применение регрессионных моделей для задания временных параметров выполнения функций в зависимости от объема работ, производительности механизма, наличия и объема ресурсов и т. п.

3. Разработка алгоритмов автоматизированного перехода от *IDEF0*-диаграмм к *GPSS*-модели.

4. Разработка библиотеки моделей механизмов БФ как обслуживающих устройств в рамках МСМО в среде *GPSS World* с учетом подразделений, участвующих в выполнении

различных этапов ЖЦ СЖАТ, и их оснащенности техническими, методическими средствами и нормативно-технической документацией.

5. Определение множества операционных характеристик (технических, технологических, процедурных, экономических, юридических) оценки ЖЦ СЖАТ, подмножество которых связано с динамическими процессами ЖЦ, может оцениваться с использованием GPSS-модели. ▲

### Библиографический список

1. Константинова Т.Ю., Лыков А.А., Марков Д.С. и др. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 2. С. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204. EDN HYPJQU.
2. РД IDEF 0-2000. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ // Прикладная логистика. М.: Госстандарт России, 2000. 61 с.
3. Бистерфельд О.А. Методология функционального моделирования IDEF0: учеб.-метод. пособие. Рязань: Рязанский гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2008. 44 [2] с.
4. Veis Šerifi., Predrag Dašić, Ratimir Jecmenica, et al (2009). Functional and Information Modeling of Production Using IDEF Methods. *Strojniški vestnik*, 55 (2): 131–140.
5. Зараменских Е.П. Управление жизненным циклом информационных систем: учебник и практикум / 1-е изд. М.: Юрайт, 2019. 431 с. ISBN: 978-5-9916-9200-7. EDN WLZOJI.
6. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183. December 21. <https://pcoding.ru/gost/idef0en.pdf>
7. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем: учеб. пособие. М.: ДМК Пресс, 2007. 320 с. ISBN: 5-94074-219-X. EDN RAZBMT.
8. Law A.M. How to build valid and credible simulation models // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec, 2008. P. 39–47.
9. Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. пособие. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2018. 283 с. ISBN: 978-5-9558-0595-5. EDN RRBMCR.
10. Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. Верификация и валидация моделирования в производстве и логистике. *Simul. Примечания Eur.*, 2009, 19. С. 21–29.
11. Марков Д. С., Булавский П.Е. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания // Известия ПГУПС. 2010. № 4. С. 63–74. [Электронный ресурс]. URL: <https://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2015-2/10.20295-1815-588X-2015-2-99-105.pdf>
12. Марков Д.С., Лыков А.А. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. №1 (30). С. 24–30.
13. Марков Д.С., Булавский П. Е. Иерархическая многоматричная формализация имитационной модели электронного документооборота технической документации // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. ПГУПС. СПб., 2013. С. 52–60.
14. Белишкина Т.А., Константинова Т.Ю., Лыков А.А. и др. Логико-временная формализация имитационных моделей систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2023. № 4. С. 368–376. DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376>.
15. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World. Казань: Мастер лайн, 2002. 383 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 2. P. 155–165  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-155-165

### Formalization of transition from *IDEFO*-diagram to the *GPSS*-model of life cycle stages of railway automation and remote control systems

#### Information about authors

**Belishkina T. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor.  
E-mail: belishkina@mail.ru

**Konstantinova T. Yu.**, PhD in Engineering, Associate Professor.  
E-mail: at-tanya@mail.ru

**Lykov A. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: bastdrew@mail.ru

**Markov D. S.**, PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: MDS1945@yandex.ru

**Mikado E. N.**, Head of Laboratory. E-mail: mikadowork@yandex.ru

**Sokolov V. B.**, PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: SVB9@yandex.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and remote control on Railways

**Abstract.** The purpose of the article is to present the results of formalizing the description and developing a formalized transition from a static functional *IDEFO*-model to a dynamic, simulation model of the life cycle of railway automation and remote control systems. The *GPSS World* tool is traditionally used for software implementation of simulation models. A concept for representing *IDEFO*-diagram formalisms using a mathematical queuing scheme is proposed. The main provisions of the concept are: an object-application, the type of which is determined by the type of objects, and the mechanism is determined by the servicing device. The properties of these applications and serving devices are recorded in the rows of the passport matrix; connections in accordance with the *IDEFO*-diagram are indicated by recording the indices of the block-function sequentially in the row of the given block-function. The possibility of realizing the block-function function is evaluated by a Boolean function. The arguments of this function are: control sign, required resources, state of service devices. The block-function function is checked by the Boolean function of monitoring the time of block-function occupation. To realize this concept the following *GPSS World* tools are defined: continuous and discrete functions, transactions, single-channel devices, logical keys, *MXSPASPO1* matrix, user list, Boolean variables. A universal *GPSS*-model, tuned to a specific *IDEFO*-diagram at the source data level, is developed based on indirect addressing of the specified tools. At the same time, it allows not to change the program text.

The developed *GPSS*-program formalizes the possibility and feasibility of the transition from the *IDEFO*-diagram to the *GPSS*-model of life cycle of railway automation systems.

**Keywords:** *IDEFO*-diagram, life cycle, railway automation and remote control systems, mathematical queuing schemes, *GPSS* simulation model, indirect addressing, simulation model, queuing systems.

#### References

1. Konstantinova T. Yu., Lykov A. A., Markov D. S. i dr. Tekhnologiya imitacionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki // Avtomatika na transporte. 2023. T. 9, № 2. S. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204. EDN HYPJQU. (In Russian)
2. RD IDEF 0-2000. Metodologiya funkcional'nogo modelirovaniya IDEF0. Rukovodnyashchij dokument // Prikladnaya logistika. M.: Gosstandart Rossii, 2000. 61 s. (In Russian)
3. Bisterfel'd O. A. Metodologiya funkcional'nogo modelirovaniya IDEF0: ucheb.-metod. posobie. Ryazan': Ryazanskij gos. un-t imeni S. A. Esenina, 2008. 44 [2] s. (In Russian)
4. Veis Šerifi, Predrag Dašić, Ratomir Jecmenica, et al (2009). Functional and Information Modeling of Production Using IDEF Methods. Strojniški vestnik, 55 (2): 131–140.
5. Zaramenskikh E. P. Upravlenie zhiznennym ciklom informacionnyh sistem: Uchebnik i praktikum / 1-e izd. M.: Yurajt, 2019. 431 s. ISBN: 978-5-9916-9200-7. EDN WLZOJI. (In Russian)
6. Integration DEFINITION for function modeling (IDEFO). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183. December 21. <https://pcoding.ru/gost/idef0en.pdf>
7. Kudryavcev E. M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem: ucheb. posobie. M.: DMK Press, 2007. 320 s. ISBN 5-94074-219-X. EDN RAZBMT. (In Russian)
8. Law A. M. How to build valid and credible simulation models // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec, 2008. P. 39–47.
9. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. Imitacionnye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS STUDIO: ucheb. posobie. M.: Nauchno-izdatel'skij centr INFRA-M, 2018. 283 s. ISBN 978-5-9558-0595-5. EDN RRB-MCR. (In Russian)
10. Rabe M., Spieckermann S., & Wenzel S (2009). Verifikacija i validacija modelirovaniya v proizvodstve i logistike. Simul. Primechanija Eur., 19, 21–29.
11. Markov D. S., Bulavskij P. E. Matrichnyj metod formalizacii imitacionnyh modelej slozhnyh sistem massovogo obsluzhivaniya // Izvestiya PGUPS. 2010. № 4. S. 63–74. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2015-2/10.20295-1815-588X-2015-2-99-105.pdf> (In Russian)
12. Markov D. S., Lykov A. A. Metod formalizacii imitacionnyh modelej tekhnologicheskikh processov v hozjajstve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2012. №1 (30). S. 24–30. (In Russian)
13. Markov D. S., Bulavskij P. E. Ierarhicheskaya mnogomatrichnaya formalizacija imitacionnoj modeli elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentacii // Aktual'nye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. PGUPS. SPb., 2013. S. 52–60. (In Russian)
14. Belishkina T. A., Konstantinova T. Yu., Lykov A. A. i dr. Logiko-vremennaya formalizacija imitacionnyh modelej sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki // Avtomatika na transporte. 2023. № 4. S. 368–376. DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376>. (In Russian)
15. Devyatkov V. V. Rukovodstvo pol'zovatelya po GPSS World. Kazan': Master lajn, 2002. 383 s. (In Russian)