

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДА ОТ BPMN-ДИАГРАММЫ К GPSS-МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

НАБОКОВ Артем Сергеевич, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: t3man8@yandex.ru

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: bulavskiy@pgups.ru

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: MDS1945@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

В статье решается задача перехода от статического графического представления бизнес-процессов проектирования объектной технической документации систем железнодорожной автоматики и телемеханики в нотации BPMN к динамической имитационной модели в среде GPSS Studio. Для решения поставленной задачи сформирован рабочий алфавит BPMN, включающий элементы, необходимые для описания структуры, последовательности и логики выполнения проектных задач. На его основе разработана предметно-ориентированная библиотека типовых элементарных блоков, обеспечивающая реализацию соответствующих элементов бизнес-процесса в среде GPSS Studio. Определено соответствие между элементами рабочего алфавита BPMN и блоками библиотеки, что позволило сформировать целевой алфавит и установить правила преобразования исходной диаграммы. С применением разработанной библиотеки построена структурная схема имитационной модели процесса разработки графической части проектной документации станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. На основе структурной схемы автоматически генерируется программный код имитационной модели, сохраняющий логику и структуру исходной BPMN-диаграммы. Результатом исследования является методика формализованного перехода от BPMN-диаграммы к GPSS-модели процесса проектирования. Сформированная на основе структурной схемы моделирующая программа позволяет перейти к процедурам верификации и валидации, а также формирует основу для проведения имитационных экспериментов, направленных на исследование процессов проектирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, проектные организации, бизнес-процессы, техническая документация, BPMN, GPSS Studio

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-03-228-240

▼ Введение

Имитационное моделирование (ИМ) является одним из наиболее значимых и перспективных инструментов анализа сложных систем и процессов. К числу таких систем относятся проектные организации, деятельность которых направлена на выпуск проектной и рабочей документации для объектов капитального строительства, включая объекты железнодорожной инфраструктуры. Деятельность подобных организаций представляет собой совокупность бизнес-процессов (БП), от эффективности организации которых зависят сроки выпуска

проектов, качество выпускаемой документации и, как следствие, получаемая прибыль.

Применение ИМ позволяет исследовать функционирование существующих БП организаций без проведения натурных экспериментов, что особенно важно для проектных организаций, поскольку прямое экспериментирование с действующими процессами может приводить к нарушению сроков, увеличению организационных издержек и снижению управляемости проектной деятельности. ИМ обеспечивает возможность анализа существующих процессов с целью повышения их

эффективности, а также для проектирования новых БП.

Для анализа БП выполняется их формализация, с этой целью применяются различные нотации описания БП, выбор которых осуществляется исходя из функционального назначения организаций.

В исследовании [1] один из основных процессов проектирования объектной технической документации систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), а именно процесс разработки проектной документации станционных СЖАТ рассматривался как бизнес-процесс. Для его формализации использовалась методология описания бизнес-процессов *BPMN (Business Process Model and Notation)* [2–4], которая позволила визуализировать статическое представление исследуемого процесса в его текущем состоянии AS-IS, описав начальное и конечное событие, последовательность проектных задач и взаимодействия между участниками. Однако BPMN-диаграмма не является достаточным инструментом для исследования динамических характеристик процесса, поскольку не обеспечивает непосредственного определения длительности выполнения задач, оценки загрузки ресурсов, анализа образования очередей, изменения основных показателей под воздействием различных факторов. Следовательно, BPMN-диаграмму целесообразно рассматривать как исходную формализованную схему, на основе которой должна быть построена детальная программная модель БП, способствующая анализу поведения процесса во времени.

Задачи перехода от различных нотаций описания БП к ИМ решались во многих исследованиях. Например, в работе [5] представлен практический пример перехода диаграммы потока данных *DFD (Data Flow Diagram)* [6], описывающей работу отдела кадров, к ИМ в среде GPSS Studio. Основные результаты исследования демонстрируют, что GPSS Studio предоставляет перспективные инструменты для моделирования и анализа БП с целью дальнейшего развития данного подхода.

В работе [7] описан формализованный переход от статической функциональной IDEF0-диаграммы [8] к динамической ИМ жизненного цикла СЖАТ. В приведенном ис-

следовании элементы графического описания диаграммы IDEF0 интерпретированы в терминах математической схемы массового обслуживания и реализованы в среде моделирования GPSS World.

Рассмотренные научные труды служат примером перехода от различных нотаций к ИМ, доказывая практическую применимость и перспективность формализованного преобразования статического представления схем в динамические ИМ.

В исследовании [9] было обосновано применение методологии ИМ для исследования процесса проектирования ТД СЖАТ, сформирована модель-описание ИМ исследуемого процесса, в которой определены цель моделирования задачи, границы и допущения, целевые показатели эффективности, факторы, оказывающие влияние на процесс проектирования, а также представлена структура функциональных модулей модели. Следующим шагом построения модели является выбор инструментального средства ИМ. Он должен осуществляться с учетом специфики процесса проектирования ОТД СЖАТ, а также исходя из его эффективности для решения задачи перехода от BPMN-диаграмм процесса проектирования ОТД СЖАТ к динамической ИМ.

В исследовании [10] сформулирован перечень требований к инструментальным средствам, применяемым для исследования жизненного цикла (ЖЦ) СЖАТ, а именно:

- ведение модельного времени;
- наличие средств представления объектов моделируемой системы;
- ведение параллельных процессов;
- генерация случайных величин и событий;
- генерация потоков событий;
- выполнение вычислительных и логических операций в процессе моделирования;
- организация и ведение различных списковых структур;
- организация выполнения отдельных имитационных экспериментов и их серий;
- накопление и предварительная обработка результатов моделирования;
- наличие средств отладки и диагностики моделирующих программ.

Указанные требования применимы и к задаче моделирования процесса проектирования

ТД СЖАТ, поскольку данный процесс является одним из этапов ЖЦ СЖАТ, который характеризуется высокой степенью регламентации, а временные показатели являются одним из ключевых факторов выполнения технологических операций.

Для ИМ систем с указанными характеристиками в исследовании [10] предлагается применять специализированное инструментальное средство — *GPSS World* [11–13].

В настоящем же исследовании для построения ИМ и разработки перехода от BPMN-диаграмм предлагается использовать среду *GPSS Studio* [14–16]. Выбор данного средства обусловлен тем, что данная среда сохраняет возможности языка GPSS для дискретно-событийного моделирования и обладает высокими характеристиками для моделирования и анализа БП.

К преимуществам GPSS Studio, значимым для рассматриваемой задачи, также относятся:

- возможность создания предметно-ориентированных библиотек типовых элементарных блоков (ТЭБ) для построения структурной схемы;
- наличие встроенных средств синтаксического, семантического и логического контроля модели при ее сборке;
- возможность использования внешних библиотек C#, расширяющих функциональные возможности моделирующей программы;
- возможность разработки имитационного приложения, позволяющего организовать имитационное исследование процесса проектирования ОТД СЖАТ путем проведения имитационных экспериментов и их серий;
- возможность решения оптимизационных задач для предоставления наилучшего варианта реализации процесса.

Целью настоящего исследования являются разработка и описание метода формализованного перехода от статического представления процесса проектирования ОТД СЖАТ в виде BPMN-диаграмм к динамической ИМ процесса проектирования ОТД СЖАТ в среде GPSS Studio.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать и формализовать рабочий алфавит нотации BPMN, используемый для описания БП проектирования ОТД СЖАТ;
- разработать предметно-ориентированную библиотеку ТЭБ в среде GPSS Studio для реализации логики элементов рабочего алфавита BPMN;
- сформировать целевой алфавит нотации BPMN в среде GPSS Studio и установить соответствие между его элементами и элементами рабочего алфавита;
- разработать структурную схему ИМ на основе разработанной библиотеки и целевого алфавита;
- описать процесс автоматической генерации программного кода и формирование ИМ GPSS-модели на основе сформированной структурной схемы.

Структура статьи соответствует логике решения поставленных задач. В основной части пошагово рассматривается методика формализованного перехода от статического представления BPMN-диаграммы к динамической GPSS-модели в среде GPSS Studio.

Формирование и формализация рабочего алфавита нотации BPMN

Исходный алфавит нотации BPMN включает в себя совокупность графических элементов, применяемых для визуализации бизнес-процесса. Для целей исследования исходный алфавит можно описать следующим множеством:

$$\sum_{BPMN} = \{E, A, G, F, R, P, L\}, \quad (1)$$

где E — множество событий;

A — множество действий;

G — множество развилок;

F — множество потоков управления;

R — множество артефактов;

P — множество пулов;

L — множество дорожек.

Для описания БП проектирования ОТД СЖАТ используется не весь исходный алфавит, а только элементы, необходимые для отображения последовательности работ, участников процесса, условий перехода и параллельных участков. Указанная совокупность образует рабочий алфавит нотации

$$\sum_{BPMN}^J = \{e_s, e_f, a_m, a_s, a_a, g_p, g_x, f, p, l\}, \quad (2)$$

где e_s — элемент множества E , обозначающий начальное событие;

e_f — элемент множества E , обозначающий конечное событие;

a_m — элемент множества A , обозначающий задачу, выполняемую вручную;

a_s — элемент множества A , обозначающий задачу, выполняемую пользователем с помощью программного обеспечения;

a_a — элемент множества A , обозначающий автоматизированную задачу без непосредственного участия пользователя;

g_p — элемент множества G , обозначающий развилку типа «И»;

g_x — элемент множества G , обозначающий развилку типа «ИЛИ/ИЛИ»;

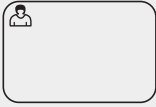
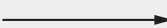
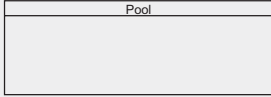
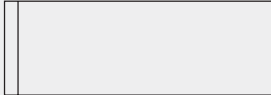
f — элемент множества F , обозначающий поток управления;

p — элемент множества P , обозначающий пул;

l — элемент множества L , обозначающий дорожку.

Графическое представление, наименования и назначение элементов рабочего алфавита BPMN приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Рабочий алфавит нотации BPMN, используемый для описания БП проектирования ОТД СЖАТ

Графическое представление	Наименование элемента	Назначение элемента
	Начальное событие, e_s	Используется для инициализации процесса
	Конечное событие, e_f	Используется для завершения процесса
	Задача, выполняемая вручную, a_m	Используется для отображения задач, выполняемых исполнителем вручную
	Задача, выполняемая пользователем с помощью программного обеспечения, a_s	Используется для отображения задач, выполняемых исполнителем с помощью программного обеспечения
	Задача, выполняемая автоматизированным способом, a_a	Используется для отображения задач, выполняемых автоматизированным способом без участия исполнителя
	Развилка типа «И», g_p	Используется для разделения потока управления на параллельные ветви и их последующей синхронизации
	Развилка типа «ИЛИ/ИЛИ», g_x	Используется для выбора одной из альтернативных ветвей потока управления, а также для объединения потоков
	Поток управления, f	Используется для задания последовательности и направления выполнения элементов процесса
	Пул, p	Используется для отображения БП и взаимодействия элементов, из которых он состоит
	Дорожка, l	Используется для отображения участника процесса

Разработка предметно-ориентированной библиотеки ТЭБ в среде GPSS Studio

Для обеспечения перехода к динамическому представлению БП элементы рабочего алфавита BPMN интерпретируются в GPSS-логике в виде ТЭБ. Для этого формируется предметно-ориентированная библиотека ТЭБ, на основе которой определяется алфавит BPMN в GPSS Studio. Элементы данного алфавита представляют собой ТЭБ, реализующие динамическую логику соответствующих элементов рабочего алфавита нотации BPMN.

Сформированная библиотека включает в себя четыре группы ТЭБ:

1. События (*Events*).

Группа состоит из двух ТЭБ: начальное событие (*StartEvent*), конечное событие (*EndEvent*). Данные блоки определяют границы моделируемого процесса, задавая момент появления объекта проектирования в модели и момент завершения его обработки.

1.1. ТЭБ *StartEvent*.

Данный ТЭБ осуществляет генерацию транзакта, который интерпретируется в модели как проектируемый объект. Сгенерированному транзакту присваиваются следующие параметры: уникальный идентификатор объекта, его основные характеристики, а также календарная дата начала проектирования. По своей структуре рассматриваемый ТЭБ имеет только выходной канал.

1.2. ТЭБ *EndEvent*.

Данный ТЭБ уничтожает транзакт, представляющий собой объект проектирования, то есть завершающий процесс разработки ТД для данного объекта. По своей структуре имеет только входной канал.

2. Задачи (*Task*).

В данную группу входят ТЭБ, имитирующие задачу разработки документации (*TaskDocDevelopment*), проверки документации (*TaskCheck*), ее доработки (*TaskRework*), согласования (*TaskApproval*), а также прочие задачи (*TaskOther*).

Общая логика работы ТЭБ группы *Task* включает проверку доступности рабочей смены, выбор исполнителя, имитацию выполнения задачи с помощью временной задержки и освобождение ресурса.

Выбор ресурса производится на основании следующих критериев: свобода сотрудника, наличие допуска к данному виду работ, наличие допуска к данному виду документа.

Если подходящий ресурс доступен, транзакт захватывает его на время выполнения задачи. Если ресурс занят, транзакт помещается в очередь ожидания. После завершения задачи ресурс освобождается, а транзакт перемещается к следующему блоку структурной схемы.

2.1. ТЭБ *TaskDocDevelopment*.

Данный ТЭБ предназначен для имитации выполнения проектной задачи по разработке ТД.

В процессе разработки ТД стохастически генерируется некоторое количество ошибок на основании базового числа ошибок для конкретного вида документации, сложности объекта и квалификации исполнителя. Сгенерированные ошибки вероятностно распределяются по классификационным признакам, перечень которых представлен в исследовании [4].

После классификации каждая ошибка регистрируется в матрице *MX\$ErrosTable* с указанием следующих атрибутов:

- идентификатор ошибки (порядковый номер);
- идентификатор проектируемого объекта, при разработке которого возникла ошибка;
- вид документа, в котором возникла ошибка;
- признаки: опасная/защитная, одиночная/кратная, случайная/кибернарушение, независимая/взаимосвязанная, легкоустраняемая / трудноустраняемая, легкообнаруживаемая / труднообнаруживаемая;
- вес ошибки;
- признак обнаружения при проверке;
- признак исправления ошибки;
- этап обнаружения ошибки;
- этап исправления ошибки.

После задачи разработки транзакт перемещается к следующему ТЭБ, имитирующему задачу проверки ТД.

2.2. ТЭБ *TaskCheck*.

Данный ТЭБ предназначен для имитации выполнения проектной задачи по проверке ТД.

ТЭБ реализует два режима функционирования: первичную проверку документации и вторичную проверку исправления ранее выявленных замечаний. При первом прохождении транзакта выполняется первичная проверка

разработанной документации, включающая вероятностное выявление ошибок, сгенерированных в процессе разработки. Для этого в ТЭБ выполняется последовательный просмотр строк матрицы, хранящей статистику об ошибках, сгенерированных на при разработке документации. В процессе проверки учитываются идентификатор проектируемого объекта, вид проверяемой документации и текущее состояние ошибки. Из дальнейшей обработки исключаются записи, относящиеся к другим объектам, другим видам документации, а также ошибки, которые уже имеют признак исправления.

Для каждой ошибки, удовлетворяющей условиям отбора, устанавливается вероятность ее обнаружения при проверке. Ключевым фактором, влияющим на результат проверки, является признак трудности обнаружения ошибки.

При обнаружении ошибки в матрице устанавливается признак найденной ошибки и фиксируется этап обнаружения, соответствующий внутренней проверке документации.

Если ошибка остается невыявленной, то она фиксируется как пропущенная и может оказать влияние на последующие задачи моделируемого процесса. За счет этого ТЭБ имитирует неполноту контроля, отражающую натурный процесс проверки ТД.

По результатам первичной проверки формируются статистические данные по найденным и пропущенным ошибкам.

Вторичная проверка предназначена для контроля устранения замечаний после выполнения корректировки документации. В данном режиме ТЭБ не выполняет повторного поиска ошибок, а имитирует процедуру контроля исправления обнаруженных ошибок при первичной проверке.

В зависимости от результатов проверки транзакт перемещается либо на доработку документации, либо к следующему элементу процесса в зависимости от наличия замечаний.

2.3. ТЭБ TaskRework.

Данный ТЭБ предназначен для имитации выполнения доработки ТД по результатам ранее проведенной проверки.

Главной функцией является изменение состояния сгенерированных ошибок, которые были обнаружены при проверке и требуют исправления.

После выполнения задачи доработки в ТЭБ осуществляется последовательный просмотр строк матрицы, хранящей сведения об обнаруженных ошибках на этапе проверки документации.

Для каждой обнаруженной ошибки устанавливается признак исправления и этап. Время доработки напрямую зависит от признака сложности устранения.

Результатом работы ТЭБ является формирование статистических данных о количестве исправленных ошибок в рамках текущей задачи доработки.

2.4. ТЭБ TaskApproval.

Данный ТЭБ предназначен для имитации выполнения процедуры согласования ТД с балансодержателем проектируемого объекта. Он моделирует временную задержку на время согласования в зависимости от дальности расположения рабочих мест соответствующих подразделений, занимающихся согласованием схематического плана с осигнализированием и таблицы взаимозависимостей, а также выявляет ошибки, которые не были обнаружены на этапе внутренней проверки.

Результатом работы ТЭБ является формирование данных о найденных или пропущенных ошибках, на основании которых документ будет либо согласован от конкретного проверяющего, либо отправлен на доработку.

2.5. ТЭБ TaskOther.

Для имитации выполнения проектных задач, в ходе которых не выполняются разработка, проверка, доработка и согласование документации, разработан ТЭБ, имитирующий выполнение прочих задач организационного характера, который не влияет на качество самой документации, но тратит временные ресурсы на ее выполнение.

3. Параллельная развилка (*ParallelGateway*).

Данная группа включает в себя два ТЭБ: развилка «И» (*ParallelGateway*) и соединение-развилка «И» (*ParallelGatewayConnection*). В BPMN используется для разделения потоков управления. В GPSS данная логика реализуется через создание копий-транзакта и последующую синхронизацию потоков.

3.1. ТЭБ ParallelGateway.

ТЭБ предназначен для имитации параллельного разветвления процесса. В GPSS

выполняется с использованием оператора блока SPLIT, создающего копию транзакта и направляющего на соответствующие дополнительные потоки процесса. Исходный транзакт продолжает движение по основному направлению структурной схемы, а копии транзактов направляются в параллельные ветви.

3.2. ТЭБ ParallelGatewayConnection.

Данный ТЭБ выполняет объединение параллельных потоков после завершения параллельных задач, которые выполнялись в разных ветвях процесса. Объединение осуществляется с использованием оператора ASSEMBLE, в операнде А которого задается количество входящих потоков и после поступления требуемого количества транзактов выполняются их синхронизация и объединение в один исходный транзакт.

4. Развилка «ИЛИ/ИЛИ» (ExclusiveGateway).

В данную группу входят три ТЭБ: развилка «ИЛИ/ИЛИ» (ExclusiveGateway), соединение-развилка «ИЛИ/ИЛИ» (ExclusiveGatewayConnection), развилка «ИЛИ/ИЛИ» проверка (ExclusiveGatewayCheck). В нотации BPMN данный элемент используется для развилки по одному потоку управления. В GPSS данная логика реализуется перемещением транзакта на основе задания вероятности перехода в ту или иную ветвь либо на основании проверки условий и безусловной передачи транзакта в соответствующую ветвь.

4.1. ТЭБ ExclusiveGateway.

Функция этого ТЭБ заключается в выборе одного из возможных маршрутов дальнейшего движения транзакта.

В зависимости от назначения конкретного элемента выбор ветви может осуществляться двумя способами. В первом случае используется вероятностный механизм, при котором одна из ветвей выбирается с заранее заданной вероятностью, а при невыполнении вероятностного перехода транзакт направляется по другой ветви. Такой вариант применяется для моделирования ситуаций, в которых дальнейшее развитие процесса имеет случайный характер.

Во втором случае используется условный механизм маршрутизации. При этом направление движения транзакта определяется результатом проверки заданного условия.

4.2. ТЭБ ExclusiveGatewayConnection.

ТЭБ предназначен для последующего объединения нескольких ветвей в одну. Он не имеет никакой программной логики, а разрабатывается для визуального правильного оформления в соответствии со стандартами BPMN.

4.3. ТЭБ ExclusiveGatewayCheck.

Данный ТЭБ является специализированным вариантом развилки для выбора дальнейшего маршрута транзакта по результатам проверки ТД.

Данный блок применяется на тех участках модели, где направления движения зависят от состояния документации после проверки, например, если по результатам проверки выявлены замечания, транзакт направляется на доработку документации; если замечания отсутствуют, он перемещается к следующему блоку процесса.

Помимо ТЭБ, специально разработанных для предметно-ориентированной библиотеки, используются стандартные средства GPSS Studio, реализующие функции потоков управления, дорожек и пулов.

Потоки управления выполняют функцию соединения ТЭБ между собой, задавая последовательность перемещения транзактов между ними.

Дорожки используются для отображения участников процесса. В среде GPSS Studio дорожка не преобразуется в самостоятельный ТЭБ. Сведения об участнике процесса используются в ТЭБ задач при выборе и захвате соответствующего ресурса с помощью оператора SEIZE.

Пул реализуется посредством применения стандартного композитного ТЭБ. Композитный ТЭБ объединяет ТЭБ, входящие в состав одного БП, и потоки управления между ними, определяя границы процесса и его внутреннюю структуру.

В качестве основных средств GPSS для реализации ТЭБ библиотеки использовались следующие операторы:

- блок GATE для проверки состояния логических ключей LS\$WorkShift (логический ключ открытия рабочей смены), LS\$InQueue (логический ключ нахождения транзакта в очереди);
- блок ASSIGN для присвоения значений параметрам транзакта;

- блок TEST для перемещения активного транзакта на основе проверки условий;
- блок SEIZE и RELEASE для захвата и освобождения ресурса;
- блок QUEUE и DEPART для постановки транзакта в очередь и выхода из нее;
- блок TRANSFER для вероятностного распределения ошибок по признакам и переходов к меткам блоков;
- блок ADVANCE для выполнения временной задержки, имитирующей выполнение задачи;
- блок SAVEVALUE для сохранения значений в ячейку числовой памяти;
- блок MSAVEVALUE для записи атрибутов ошибки в многомерную матрицу.
- блок SPLIT для создания копий транзакта при параллельной развилке;
- блок ASSEMBLE для синхронизации и объединения параллельных потоков.

Формирование целевого алфавита нотации BPMN в среде GPSS Studio

По результатам формирования библиотеки определен целевой алфавит нотации BPMN в среде GPSS Studio:

$$\sum_{BPMN}^{GPSS} = \{CB, B_s, B_f, B_d, B_c, B_r, B_{ap}, B_o, B_{pg}, B_{pgc}, B_{eg}, B_{egc}, B_{ec}, B_{xc}, f\}, \quad (3)$$

где CB — композитный ТЭБ;

B_s — ТЭБ начального события StartEvent;

B_f — ТЭБ конечного события EndEvent;

B_d — ТЭБ задачи по разработке документации TaskDocDevelopment;

B_c — ТЭБ задачи по проверке документации TaskCheck;

B_r — ТЭБ задачи по доработке документации TaskRework;

B_{ap} — ТЭБ задачи по согласованию документации TaskApproval;

B_o — ТЭБ прочих проектных задач TaskOther;

B_{pg} — ТЭБ развилки типа «И» ParallelGateway;

B_{pgc} — ТЭБ соединения развилки типа «И» ParallelGatewayConnection;

B_{eg} — ТЭБ развилки типа «ИЛИ/ИЛИ» ExclusiveGateway;

B_{egs} — ТЭБ соединения развилки типа «ИЛИ/ИЛИ» ExclusiveGatewayConnection;

B_{es} — ТЭБ развилки типа «ИЛИ/ИЛИ» проверка ExclusiveGatewayCheck;

f — поток управления, соединяющий ТЭБ между собой.

Каждый ТЭБ целевого алфавита обладает локальным фрагментом GPSS-модели, набором используемых GPSS-объектов, заданным количеством входных и выходных потоков, параметрами и состояниями. Формальное представление указанных характеристик ТЭБ задается выражением:

$$B_i = (M_i, O_i, n_i^{in}, n_i^{out}, P_i, S_i), \quad (4)$$

где B_i — i -й ТЭБ целевого алфавита;

M_i — локальный фрагмент GPSS-модели;

O_i — набор используемых GPSS-объектов;

n_i^{in} — количество входных потоков;

n_i^{out} — количество выходных потоков;

P_i — набор параметров;

S_i — набор состояний.

Установление соответствий между элементами рабочего алфавита BPMN и элементами целевого алфавита BPMN в среде GPSS Studio

Для установления правил формализованного перехода от статического к динамическому представлению БП определяется соответствие между элементами рабочего алфавита нотации BPMN и элементами целевого алфавита нотации BPMN в среде GPSS Studio. Указанное соответствие учитывает функциональное назначение элементов BPMN-диаграммы и особенности их динамической реализации. Соответствие элементов рабочего и целевого алфавитов представлено в табл. 2.

Построение структурной схемы и автоматизированная генерация программного кода ИМ

На данном этапе осуществляются построение структурной схемы и автоматизированная генерация программного кода ИМ. Построение осуществляется на основе установленного соответствия между элементами рабочего алфавита BPMN и элементами целевого алфавита BPMN в GPSS Studio.

ТАБЛИЦА 2. Соответствие элементов рабочего алфавита и целевого алфавита BPMN в GPSS Studio для построения БП проектирования ОТД СЖАТ

Элемент рабочего алфавита BPMN	Обозначение	Элемент целевого алфавита BPMN в GPSS Studio	Обозначение
Начальное событие	e_s	ТЭБ StartEvent	B_s
Конечное событие	e_f	ТЭБ EndEvent	B_f
Задача, выполняемая вручную Задача, выполняемая пользователем с помощью программного обеспечения Автоматизированная задача без непосредственного участия пользователя	a_m , a_s , a_a	TaskDocDevelopment, TaskCheck, TaskRework, TaskApproval, TaskOther	B_d , B_c , B_r , B_{ap} , B_o
Развилка типа «И»	g_p	ParallelGateway, ParallelGatewayConnection	B_{pg} , B_{pgc}
Развилка типа «ИЛИ/ИЛИ»	g_x	ExclusiveGateway ExclusiveGatewayConnection ExclusiveGatewayCheck	B_{eg} , B_{egc} , B_{ec}
Поток управления	f	Поток управления между ТЭБ	f
Пул	p	Композитный ТЭБ	CB
Дорожка	l	Самостоятельного элемента не имеет	–

Примечание: в статическом представлении нотации BPMN задачи различаются по способу выполнения: вручную, с применением программного обеспечения и автоматизированным способом. В динамическом представлении нотации BPMN в GPSS Studio способ выполнения задачи имитируется посредством задания продолжительности ее выполнения.

Структурная схема воспроизводит организационно-логическую структуру исследуемого процесса, отображает последовательность задач, их параллельное выполнение, альтернативные маршруты движения проектируемого объекта и условия перехода между задачами.

На рис. 1 и 2 представлена структурная схема ИМ, соответствующая BPMN-диаграмме разработки графической части проектной документации для станционных СЖАТ в виде структурной схеме ИМ в среде GPSS Studio.

После формирования структурной схемы ИМ в среде GPSS Studio выполняется автоматизированная генерация программного кода модели. Данный шаг завершает переход от статического представления BPMN-диаграммы к исполняемой ИМ.

Автоматизированная генерация осуществляется на основе размещенных на структурной схеме ТЭБ и установленных между ними связей. При генерации программного кода

фрагменты GPSS-модели ТЭБ объединяются и формируют единую моделирующую программу, отражающую структуру и логику построенной структурной схемы.

Заключение

Результатом исследования является разработанная методика формализованного перехода от статического представления БП проектирования ОТД СЖАТ в нотации BPMN к динамической имитационной модели в среде GPSS Studio. Предложенная методика определяет последовательный порядок преобразования исходной BPMN-диаграммы в структурную схему ИМ, на основе которой автоматизированным способом формируется моделирующая программа, представляющая исследуемый процесс в динамическом виде.

В ходе исследования из исходного алфавита нотации BPMN был выделен рабочий алфавит, включающий в себя элементы, которые используются для описания БП-проектирования

ОТД СЖАТ. На его основе разработана предметно-ориентированная библиотека ТЭБ BPMN, реализующих динамическую логику соответствующих элементов рабочего алфавита. На основе разработанной библиотеки сформирован целевой алфавит, определяющий состав элементов, используемых при построении структурной схемы ИМ. Установленные соответствия между элементами рабочего и целевого алфавита представлены в виде таблицы, которая определяет правила преобразования элементов исходной BPMN-диаграммы в ТЭБ библиотеки в GPSS Studio.

Практическая реализация методики на примере процесса разработки графической части проектной документации для станционных СЖАТ продемонстрировала возможность сохранения структуры и логики BPMN-диаграммы при переходе к динамическому представлению процесса. Построенная структурная схема отражает его организационно-логическую структуру, а сгенерированная моделирующая программа позволяет воспроизводить его в модельном времени.

Полученная GPSS-модель позволяет перейти к процедурам верификации и валидации ИМ. После выполнения указанных процедур модель может быть использована для проведения имитационных экспериментов, направленных на исследование процессов проектирования ОТД СЖАТ.

Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение и использования предметно-ориентированной библиотеки ТЭБ BPMN для моделирования иных событий, задач, логических условий, необходимых для описания других процессов проектирования. ▲

Список источников

1. Набоков А. С., Булавский П. Е., Марков Д. С. Анализ и моделирование процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 2. С. 164–177. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-164-177. EDN LHVUJZ
2. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An Introduction to the Standard, Computer Standards & Interfaces. Vol. 34, iss. 1. 2012. Pp. 124–134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.06.002>. ISSN 0920-5489
3. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company / F. Alves [et al.] // Conference: 7th International Conference on Applied Research in Management, Economics and Accounting. Dublin, November 2023. DOI: 10.33422/7th.iarme.2023.07.124
4. Business Process Re-Engineering using BPMN: A Case Study // International Journal of Business Management and Visuals. 2024. No. 7 (1). Pp. 49–55.
5. Девятков В. В., Габалин А. В. Имитационное исследование бизнес-процессов с очередями с помощью среды моделирования GPSS Studio // Открытое образование. 2020. Т. 24, № 3. С. 67–77. DOI: 10.21686/1818-4243-2020-3-67-77. EDN THWLFA
6. Каменская Е. А. Построение диаграмм DFD в рамках разработки модели бизнес-процессов для предприятий АПК // Актуальные проблемы науки и образования в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции (Великие Луки, 10 декабря 2025 года). Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия, 2025. С. 108–111. EDN UKCEQC
7. Формализация перехода от IDEF0-диаграммы к GPSS-модели этапов жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. А. Белишкина [и др.] // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 2. С. 155–165. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-155-165. EDN CMICOQ
8. Functional and Information Modeling of Production Using IDEF Methods / V. Šerif [et al.] // Strojniški vestnik. 2009. No. 55 (2). Pp. 131–140.
9. Jeong K.-Y., Wu L., Hong J.-D. IDEF Method-Based Simulation Model Design and Development Framework. Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM). 2009. No. 2. Pp. 337–359.
10. Набоков А. С., Булавский П. Е., Марков Д. С. Модель-описание процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 3. С. 250–263. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263. EDN NZBZNG
11. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. Ю. Константинова [и др.] // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 2. С. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204. EDN HYPJQU
12. Степанова А. С., Чепин Е. В. Имитационная модель многопроцессорной системы в среде GPSS World // Бизнес-информатика. 2010. № 2 (12). С. 11–14. EDN MSSTCP
13. Imitational Studies with GPSS WORLD: New Capabilities / S. A. Vlasov [et al.] // Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75, no. 2. Pp. 389–398. DOI: 10.1134/S0005117914020179. EDN SKNELD

14. Аверьянов В. Т., Полюнько С. В. Имитационное моделирование системы массового обслуживания на языке GPSS World // Проблемы управления рисками в техносфере. 2010. № 3 (15). С. 66–72. EDN NPVSKR
15. Девятков В. В., Девятков Т. В., Федотов М. В. Единое исследовательское пространство имитационного моделирования в среде GPSS Studio // Прикладная информатика. 2019. Т. 14, № 5 (83). С. 98–110. DOI: 10.24411/1993-8314-2019-10039. EDN HPJHNU
16. Бариев К. Р., Ванюшев А. А., Мокшин В. В. Разработка пользовательской библиотеки предметной области в среде GPSS Studio // Kazan Digital Week 2024: сборник материалов Международного форума (Казань, 9–11 сентября 2024 года). Казань: Научный центр безопасности жизнедеятельности, 2024. С. 672–681. EDN NQGIPA
17. Применение среды GPSS Studio для имитационных исследований процессов материально-технического обеспечения войск / В. В. Девятков [и др.] // I Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения»: труды конференции (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020 года). СПб.: Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, 2020. С. 101–108. EDN XLBWGC

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 3, pp. 228–240
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-03-228-240

Formalization of the Transition from a BPMN Diagram to a GPSS Model of the Design Process for Object-Oriented Technical Documentation of Railway Automation and Remote Control Systems

Information about authors:

NABOKOV Artem Sergeevich, Postgraduate Student of the “Automation and Remote Control on Railways” Department; e-mail: t3man8@yandex.ru

BULAVSKIY Petr Evgen'evich, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the “Automation and Remote Control on Railways” Department; e-mail: bulavskiy@pgups.ru

MARKOV Dmitriy Spiridonovich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the “Automation and Remote Control on Railways” Department; e-mail: MDS1945@yandex.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

Abstract: the article addresses the transition from a static graphical representation of business processes for developing object-specific technical documentation for railway automation and remote control systems, described in BPMN, to a dynamic simulation model implemented in GPSS Studio. To solve this problem, a working BPMN alphabet was formed, comprising the elements required to describe the structure, sequence, and logic of design tasks. Based on this alphabet, a domain-specific library of standard elementary blocks was developed to implement the corresponding business process elements in GPSS Studio. Correspondences between the elements of the working BPMN alphabet and the library blocks were established, which made it possible to form a target alphabet and define rules for transforming the source diagram. Using the developed library, a structural diagram of the simulation model for the development of the graphical part of design documentation for station railway automation and remote control systems was constructed. Based on the structural diagram, the program code of the simulation model is generated automatically while preserving the logic and structure of the original BPMN diagram. The main result of the study is a methodology for the formalized transition from a BPMN diagram to a GPSS model of the design process. The simulation program generated from the structural diagram enables the model to proceed to verification and validation procedures and provides a basis for conducting simulation experiments aimed at investigating design processes.

Keywords: simulation modeling, design organizations, business processes, technical documentation, BPMN, GPSS Studio

References

1. Nabokov A. S., Bulavskiy P. E., Markov D. S. Analiz i modelirovanie protsessov proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Analysis and Modeling of Design Processes for Railway Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika na transporte [Automation in Transport]*, 2025, vol. 11, no. 2, pp. 164–177. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-164-177. EDN LHVUZI (In Russian)
2. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An Introduction to the Standard, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 34, iss. 1, 2012, pp. 124–134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.06.002>. ISSN 0920-5489
3. Alves F., et al. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company, Dublin, November 2023. DOI: 10.33422/7th.iarrea.2023.07.124
4. Business Process Re Engineering Using BPMN: A Case Study, *International Journal of Business Management and Visuals*, 2024, no. 7 (1), pp. 49–55.
5. Devyatkov V. V., Gabalin A. V. Imitatsionnoe issledovanie biznes protsessov s ocheredyami s pomoshchyu sredy modelirovaniya GPSS Studio [Simulation Study of Business Processes with Queues Using the GPSS Studio Modeling Environment], *Otkrytoe obrazovanie [Open Education]*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 67–77. DOI: 10.21686/1818-4243-2020-3-67-77. EDN THWLFA (In Russian)
6. Kamenskaya E. A. Postroenie diagramm DFD v ramkakh razrabotki modeli biznes protsessov dlya predpriyatiy APK [Constructing DFD Diagrams in the Framework of Developing a Business Process Model for Agribusiness Enterprises], *Aktualnye problemy nauki i obrazovaniya v selskom khozyaystve: materialy mezhdunarodnoy nauchno prakticheskoy konferentsii (Velikie Luki, 10 dekabrya 2025 goda) [Current Problems of Science and Education in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Velikie Luki, December 10, 2025)]*, Velikie Luki: Velikolukskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya [Velikie Luki State Agricultural Academy], 2025, pp. 108–111. EDN UKCEQC (In Russian)
7. Belishkina T. A., et al. Formalizatsiya perekhoda ot IDEF0 diagrammy k GPSS modeli etapov zhiznennogo tsikla sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Formalization of the Transition from an IDEF0 Diagram to a GPSS Model of the Life Cycle Stages of Railway Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika na transporte [Automation in Transport]*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 155–165. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-155-165. EDN CMICOQ (In Russian)
8. Šerif V., et al. Functional and Information Modeling of Production Using IDEF Methods, *Strojinski vestnik*, 2009, no. 55 (2), pp. 131–140.
9. Jeong K.-Y., Wu L., Hong J.-D. IDEF Method Based Simulation Model Design and Development Framework, *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 2009, no. 2, pp. 337–359.

10. Nabokov A. S., Bulavskiy P. E., Markov D. S. Model opisaniye protsessov proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Model Description of Design Processes for Railway Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika na transporte [Automation in Transport]*, 2025, vol. 11, no. 3, pp. 250–263. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263. EDN NZ-BZNG (In Russian)
11. Konstantinova T. Yu., et al. Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Simulation Modeling Technology for Railway Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika na transporte [Automation in Transport]*, 2023, vol. 9, no. 2, pp. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204. EDN HYPJQU (In Russian)
12. Stepanova A. S., Chepin E. V. Imitatsionnaya model mnogoprotssessornoy sistemy v srede GPSS World [Simulation Model of a Multiprocessor System in the GPSS World Environment], *Biznes informatika [Business Informatics]*, 2010, no. 2 (12), pp. 11–14. EDN MSSTCP (In Russian)
13. Vlasov S. A., et al. Imitational Studies with GPSS WORLD: New Capabilities, *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75, no. 2, pp. 389–398. DOI: 10.1134/S0005117914020179. EDN SKNELD
14. Averyanov V. T., Polynko S. V. Imitatsionnoye modelirovaniye sistemy massovogo obsluzhivaniya na yazyke GPSS World [Simulation Modeling of a Queuing System in the GPSS World Language], *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere [Problems of Risk Management in the Technosphere]*, 2010, no. 3 (15), pp. 66–72. EDN NPVSKR (In Russian)
15. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. Edinoe issledovatel'skoe prostranstvo imitatsionnogo modelirovaniya v srede GPSS Studio [Unified Research Space for Simulation Modeling in the GPSS Studio Environment], *Prikladnaya informatika [Applied Informatics]*, 2019, vol. 14, no. 5 (83), pp. 98–110. DOI: 10.24411/1993-8314-2019-10039. EDN HPJHNU (In Russian)
16. Bariev K. R., Vanyushev A. A., Mokshin V. V. Razrabotka polzovatel'skoy biblioteki predmetnoy oblasti v srede GPSS Studio [Development of a User Library for a Subject Area in the GPSS Studio Environment], *Kazan Digital Week 2024: sbornik materialov Mezhdunarodnogo foruma (Kazan, 9–11 sentyabrya 2024 goda) [Kazan Digital Week — 2024: Collection of Materials of the International Forum (Kazan, September 09–11, 2024)]*, Kazan: Nauchnyy tsentr bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti [Scientific Center for Life Safety], 2024, pp. 672–681. EDN NQGIPA (In Russian)
17. Devyatkov V. V., et al. Primeneniye sredy GPSS Studio dlya imitatsionnykh issledovaniy protsessov materialno tekhnicheskogo obespecheniya voysk [Using the GPSS Studio Environment for Simulation Studies of Logistics Processes for the Military], *Pervaya vserossiyskaya nauchno prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v voennoy sfere «Imitatsionnoye modelirovaniye sistem voennogo naznacheniya, deystviy voysk i protsessov ikh obespecheniya»: trudy konferentsii (Sankt Peterburg, 25 noyabrya 2020 goda) [First All Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and Its Application in the Military Sphere “Simulation Modeling of Military Systems, Troop Operations, and Their Support Processes”: Conference Proceedings (Saint Petersburg, November 25, 2020)]*, Saint Petersburg: Voennaya akademiya materialno tekhnicheskogo obespecheniya imeni generala armii A. V. Khroleva [Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrolev], 2020, pp. 101–108. EDN XLBWGC (In Russian)