

## БИБЛИОТЕКА ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СРЕДЕ GPSS STUDIO

Л.А. Воробейчиков, И.С. Синева (Москва)

Одним из важнейших достоинств среды моделирования GPSS STUDIO [1] является возможность создания библиотек типовых элементарных блоков (ТЭБ), ориентированных на конкретные предметные области, а также использования таких библиотек при разработке имитационных приложений в этой среде.

В работах [2, 3] была предложена технология разработки библиотек типовых решений предметной области, успешно реализованная применительно к предметной области «Модели теории телетрафика» (библиотека *TeleTraffic*). Поскольку язык GPSS в значительной мере ориентирован на моделирование объектов, формализуемых в виде различных систем массового обслуживания (СМО), в данной работе была поставлена и решена более общая задача разработки универсальной библиотеки ТЭБ для предметной области «Системы массового обслуживания» (библиотека *QueuingSystems*).

**Принципы разработки библиотеки.** Разработка библиотеки *QueuingSystems* опиралась в целом на принципы, реализованные при разработке библиотеки *TeleTraffic*[2]:

1. *Функциональная замкнутость библиотеки*, то есть возможность разработки на ее основе любых имитационных приложений в данной предметной области без использования дополнительных ТЭБ, не входящих в состав библиотеки, и без необходимости редактирования текстов, генерируемых GPSS–моделей.

2. *Возможность настройки ТЭБ* как на их параметры, задаваемые разработчиком конкретного приложения, так и на входные параметры приложения, задаваемые пользователем–исследователем через формы ввода исходных данных.

3. *Независимость ТЭБ*, моделирующих ресурсные компоненты моделируемых систем, от вероятностно–временных параметров их функционирования.

4. *Обеспечение доступа* ко всем GPSS–объектам ТЭБ и их атрибутам, потенциально необходимым для мониторинга результатов моделирования.

Однако, как показал двухгодичный опыт использования библиотеки *TeleTraffic*, следование принципу 3, направленному на сокращение общего числа ТЭБ библиотеки, приводит к усложнению структурных схем моделей. При этом на пользователя–разработчика имитационных приложений возлагаются дополнительные функции по координации и связыванию в структурных схемах моделей ТЭБ, генерирующих временные интервалы, с ТЭБ, моделирующими ресурсные компоненты.

В связи с этим, при разработке библиотеки *QueuingSystems* принцип независимости ТЭБ от вероятностно–временных параметров их функционирования был заменен на принцип их *самодостаточности*: для каждого типа моделируемой СМО создавалось несколько ТЭБ с различными законами распределения случайного времени обслуживания заявок и ограничений на время ожидания в очереди или пребывания в системе. Это привело к увеличению общего количества ТЭБ библиотеки примерно в  $n$  раз, где  $n$  – число используемых законов распределения. Однако такой рост объема библиотеки представляется оправданным, так как библиотека разрабатывается единожды, а используется многократно.

Другим проявлением принципа самодостаточности ТЭБ стал отказ от моделирования одноканальных СМО как частных случаев многоканальных. Для каждого типа моделируемой СМО с тем или иным законом распределения времени обслуживания создавались два ТЭБ: одноканальный и многоканальный, что позволило повысить эффективность моделирования одноканальных СМО. Следствием этого стало двукратное увеличение количества ТЭБ библиотеки.

При разработке библиотеки *QueuingSystems* предполагалось, что она может быть использована в двух основных целях:

1) разработка моделей различных сетей и многофазных систем массового обслуживания, где предметом исследования являются интегральные характеристики таких сетей и систем;

2) разработка моделей отдельных систем массового обслуживания для детального (возможно, сравнительного) исследования их характеристик.

По этой причине ТЭБ СМО с неограниченным ожиданием разрабатывались в двух вариантах:

1) с мониторингом характеристик очередей лишь на уровне средних значений (с относительно высокой эффективностью моделирования);

2) с мониторингом характеристик очередей на уровне средних значений и стандартных отклонений (с относительно низкой эффективностью моделирования).

Это вызвало дополнительное увеличение количества ТЭБ библиотеки.

Все модели, реализованные в ТЭБ библиотеки, являются известными системами массового обслуживания в соответствии с классификацией Кендалла-Башарина. За основу GPSS-моделей большинства ТЭБ были взяты модели, представленные и описанные в работе одного из авторов [4].

Рассмотренные принципы разработки библиотеки определили ее структуру и состав.

**Структура и состав библиотеки.** Библиотека *QueuingSystems* состоит из ТЭБ трех категорий.

Категория *Вспомогательные ТЭБ* включает ТЭБ, служащие для связывания в структурной схеме ТЭБ двух основных категорий.

Категория *Генераторы входных потоков заявок* включает ТЭБ, генерирующие входные потоки транзактов с различными законами распределения интервалов их поступления.

Категория *Системы обслуживания (СМО)* включает ТЭБ, моделирующие СМО различных классов.

На рис. 1 приведен состав ТЭБ категорий *Вспомогательные ТЭБ* и *Генераторы входных потоков заявок*.

Вспомогательные ТЭБ	Генераторы входных потоков заявок
<input type="checkbox"/> Запись в параметр текущего модельного времени	<input type="checkbox"/> Вейбулла (W)
<input type="checkbox"/> Запись данных в таблицу	<input type="checkbox"/> Гиперэкспоненциальный с параметром k (HEk)
<input type="checkbox"/> Разветвление с заданной вероятностью	<input type="checkbox"/> Детерминированный (D)
<input type="checkbox"/> Сравнение двух выражений на равенство	<input type="checkbox"/> Парето (P)
<input type="checkbox"/> Уничтожение транзакта	<input type="checkbox"/> Произвольный (G)
	<input type="checkbox"/> Пуассоновский (M)
	<input type="checkbox"/> Равномерный (U)
	<input type="checkbox"/> Эрланговский с параметром k (Ek)

Рис. 1. Состав ТЭБ категорий *Вспомогательные ТЭБ* и *Генераторы входных потоков заявок*

Назначение ТЭБ категории *Вспомогательные ТЭБ* очевидно из их названий. Каждый из них реализован одним соответствующим блоком GPSS и имеет один или два параметра для настройки на конкретную структурную схему. Некоторые из этих ТЭБ включают также соответствующие объекты GPSS, в частности, ячейки *SaveValue* для инициализации параметров ТЭБ в формах ввода данных имитационных приложений.

ТЭБ категории *Генераторы входных потоков заявок* генерируют потоки с законами распределения, наиболее часто используемыми для аппроксимации реальных

потоков заявок в различных приложениях. В эту категорию включены прежде всего ТЭБ, использующие для генерации входных потоков транзактов встроенные процедуры среды GPSS World [4]. Это такие ТЭБ, как *Вейбулла*, *Парето*, *Пуассоновский* и *Равномерный*.

ТЭБ *Детерминированный* генерирует поток с постоянными интервалами времени между поступающими транзактами и не требует специальных процедур. ТЭБ *Произвольный* генерирует поток с произвольным законом распределения, задаваемым набором точек функции распределения.

Остальные ТЭБ данной категории генерируют потоки с законами распределения, для которых отсутствуют встроенные процедуры GPSS World. Процедуры генерации для этих потоков были реализованы средствами языка GPSS.

Подавляющее большинство ТЭБ библиотеки относится к категории *Системы обслуживания (СМО)*. Структура этой категории на уровне подкатегорий следующего уровня представлена на рис. 2.

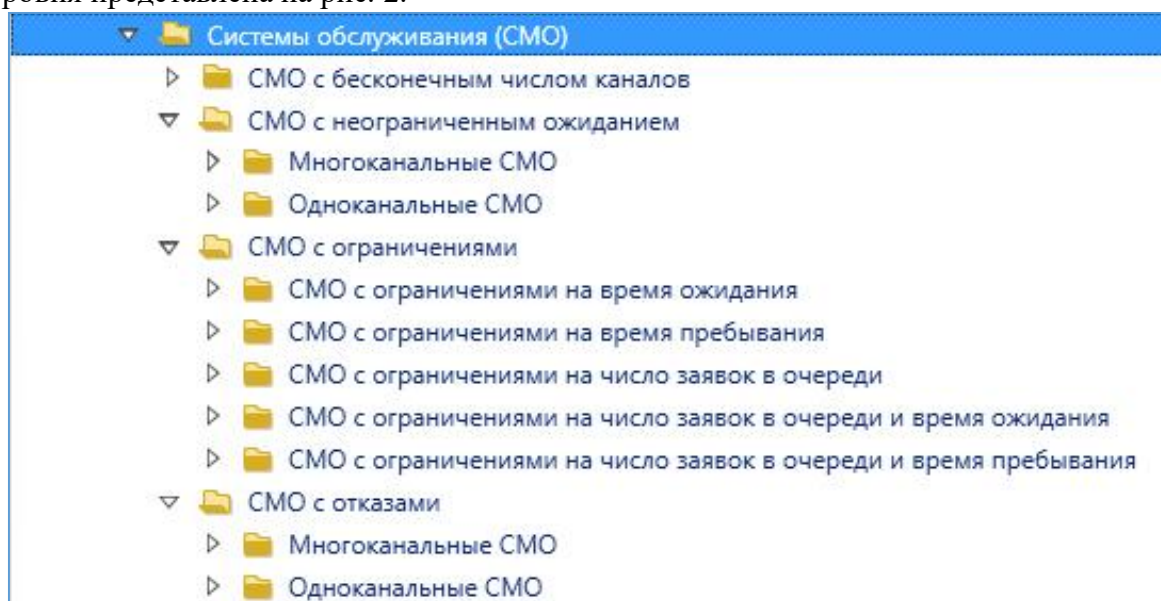


Рис. 2. Подкатегории ТЭБ категории Системы обслуживания (СМО)

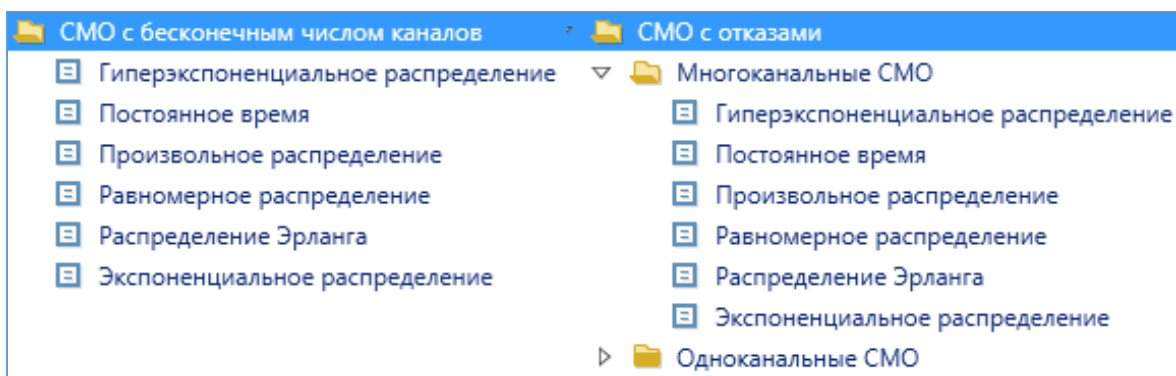


Рис. 3. Состав ТЭБ подкатегорий СМО с бесконечным числом каналов и СМО с отказами

Подкатегория *СМО с бесконечным числом каналов* включает в себя ТЭБ, осуществляющие задержку транзактов на заданные случайные интервалы с различными законами распределения. Такие ТЭБ могут использоваться, например, для моделирования неограниченного числа заявок, получивших отказ в обслуживании в некоторой СМО и повторно поступающих на ее вход через некоторый интервал времени.

Подкатегория *СМО с отказами* включает в себя ТЭБ, моделирующие простейшие СМО без возможности ожидания обслуживания. ТЭБ данной подкатегории разделены на две подкатегории следующего уровня: *Многоканальные СМО* и *Одноканальные СМО*. На рис. 3 показан состав ТЭБ этих подкатегорий. Подкатегория *Одноканальные СМО с отказами* имеет тот же состав, что и *Многоканальные СМО*.

ТЭБ обеих подкатегорий отличаются лишь законами распределения времени обслуживания, наиболее часто используемыми для аппроксимации времени обслуживания заявок в различных приложениях.

Подкатегория *СМО с ограничениями* содержит ТЭБ, моделирующие системы с ожиданием и различными ограничениями: на число заявок в очереди, на время ожидания или пребывания заявки в системе, а также смешанными ограничениями. Для каждого вида ограничений организована соответствующая подкатегория следующего уровня. На рис. 4 показан состав ТЭБ подкатегорий *СМО с ограничениями на время ожидания* и *СМО с ограничениями на число заявок в очереди*. ТЭБ обеих подкатегорий разделены на две подкатегории следующего уровня: *Многоканальные СМО* и *Одноканальные СМО*. Подкатегории *Одноканальные СМО* имеют тот же состав, что и *Многоканальные СМО*.

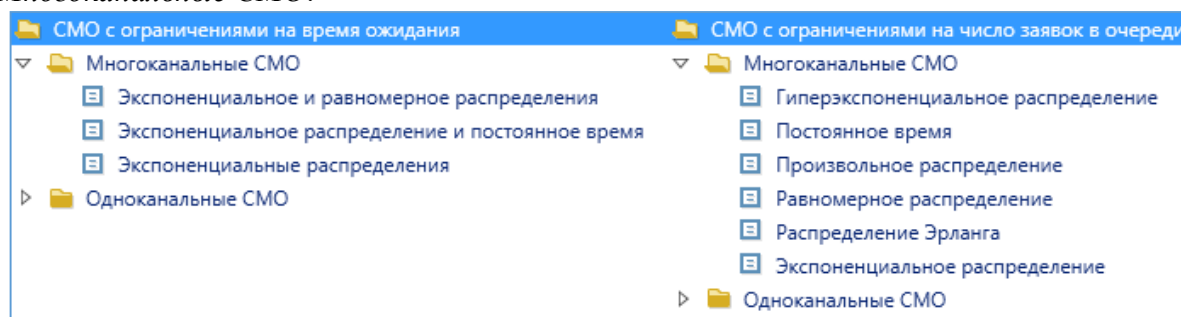


Рис. 4. Состав ТЭБ подкатегорий *СМО с ограничениями на время ожидания* и *СМО с ограничениями на число заявок в очереди*

ТЭБ подкатегории *СМО с ограничениями на число заявок в очереди* отличаются лишь законами распределения времени обслуживания.

ТЭБ подкатегории *СМО с ограничениями на время ожидания* отличаются той или иной комбинацией законов распределения времени обслуживания и ограничения на время ожидания. В актуальной версии библиотеки реализованы лишь ТЭБ с экспоненциальным распределением времени обслуживания и тремя распределениями ограничения на время ожидания: экспоненциальным, равномерным и детерминированным. Работа по расширению состава ТЭБ этой категории будет продолжена.

Аналогичный состав имеют и другие подкатегории *СМО с ограничениями*. ТЭБ подкатегорий с ограничениями на время пребывания заявки в системе реализованы только для одноканальных СМО из-за ограниченных возможностей языка GPSS.

Подкатегория *СМО с неограниченным ожиданием* содержит ТЭБ, моделирующие одноканальные и многоканальные системы с неограниченной очередью и различными дисциплинами обслуживания. Помимо этого, как указано выше, каждый ТЭБ данной подкатегории разработан в двух вариантах: с мониторингом средних значений характеристик очереди и с дополнительным мониторингом стандартных отклонений этих характеристик. Эти факторы определили структуру данной подкатегории, показанную на рис. 5.

В разработанной библиотеке реализованы следующие беспriorитетные дисциплины обслуживания систем с неограниченным ожиданием:

FIFO – первым пришел – первым обслужен;

- LIFO – последним пришел – первым обслужен;
- RR – круговая циклическая с фиксированным временем обслуживания;
- SIRO – случайный выбор заявки из очереди;
- SPF – выбор заявки с минимальным временем обслуживания.

На том же рисунке показан состав ТЭБ подкатегории *СМО с дисциплиной FIFO/Мониторинг средних значений характеристик*. Как и в рассмотренных ранее примерах, ТЭБ подкатегории отличаются лишь законами распределения времени обслуживания. Полностью аналогичный состав имеют остальные подкатегории *СМО с неограниченным ожиданием*.

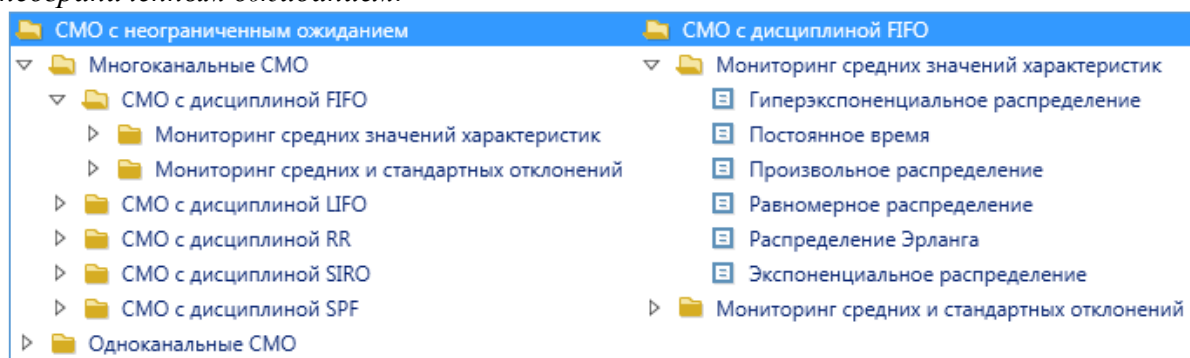


Рис. 5. Структура подкатегории СМО с неограниченным временем ожидания и состав подкатегории СМО с дисциплиной FIFO

Таким образом, общий объем актуальной версии библиотеки *QueuingSystems* составляет 181 ТЭБ. По окончании ее разработки к ним добавится еще 90 ТЭБ подкатегории *СМО с ограничениями* с дополнительными распределениями времени обслуживания.

**Тестирование нестандартных процедур генерирования случайных временных интервалов.** Ввиду того, что генерирование случайных временных интервалов с законами распределения Эрланга и гиперэкспоненциальным в ТЭБ библиотеки было реализовано собственными процедурами на языке GPSS, появилась необходимость их тестирования.

Проверка гипотезы о виде распределения – неоднозначно решаемая задача. Мощность и чувствительность критериев при одинаковом уровне значимости отличаются в зависимости от вида проверяемого распределения и проверяемых гипотез, и альтернативы (простые или сложные). Поэтому на проверку таких гипотез существуют ГОСТы [5;6]. В соответствии с их рекомендациями для проверки гипотез о соответствии выборок требуемым распределениям был использован критерий согласия  $\chi^2$  Пирсона. Это единственный тест, корректно работающий с группированными данными. Если множество значений случайной величины разбито на  $m$  непересекающихся подмножеств, то статистика критерия при проверке простых гипотез имеет асимптотическое распределение  $\chi^2(m-1)$ .

Выбранные объемы выборок и количества интервалов разбиения обеспечивают корректное использование критерия  $\chi^2$  Пирсона для проверки согласия выборок и гипотетического распределения. Для каждого из двух указанных распределений генерировались выборки объемом 5000 при различных значениях параметров распределений. Результаты тестирования сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования процедур генерирования временных интервалов

Распределение	Параметры	Наблюдаемое значение критерия	Уровень значимости (p-value)
Эрланга	$k = 3; \lambda = 1$	17,500	0,354
	$k = 5; \lambda = 1$	13,404	0,643
Гипер-экспоненциальное	$k = 4;$ $p = (0,25; 0,25; 0,25; 0,25);$ $\lambda = (6; 8; 10; 12)$	20,897	0,140
	$k = 8;$ $p = (0,125; 0,125; 0,125; 0,125; 0,125; 0,125; 0,125; 0,125);$ $\lambda = (6; 8; 10; 12)$	24,379	0,109
	$k = 8;$ $p = (0,005; 0,015; 0,02; 0,03; 0,01; 0,02; 0,1; 0,8);$ $\lambda = (100; 90; 80; 60; 50; 40; 5; 1)$	19,934	0,223

Используются следующие параметры для описания распределений:

распределение Эрланга порядка  $k$  с параметром  $\lambda$  описывается парой  $(k, \lambda)$ .

гиперэкспоненциальное распределение как взвешенная смесь экспоненциальных распределений описывается своим порядком  $k$  и двумя векторами: весов  $p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$  и параметров интенсивностей  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ .

Полученные значения p-value значительно превышают стандартный порог 0.05, что говорит о хорошем согласовании проверяемых выборок с ожидаемыми распределениями. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о корректности GPSS-процедур генерирования соответствующих временных последовательностей.

**Тестирование ТЭБ с ограничениями на время ожидания и пребывания.** В GPSS-моделях ТЭБ с ограничениями на время ожидания заявки была использована модель, описанная в работе [4] и ряде других источников. Однако полноценное тестирование использованного там алгоритма ранее не проводилось. GPSS-модели ТЭБ с ограничениями на время пребывания заявки в СМО были разработаны лишь в процессе создания данной библиотеки. Все это привело к необходимости тестирования соответствующих алгоритмов для обоих видов моделей.

Тестирование проводилось на двух специально созданных GPSS-моделях с фиксацией ошибок двух видов:

1) транзакт, время ожидания (пребывания) которого превысило заданную величину, поступил на обслуживание (был обслужен);

2) транзакт, время ожидания (пребывания) которого не превысило заданную величину, не поступил на обслуживание (не был обслужен).

В результате достаточно длительных прогонов обеих моделей не было выявлено ни одной ошибки того или иного вида, что подтверждает адекватность моделей заданным дисциплинам обслуживания.

**Тестирование ТЭБ со случайным выбором заявки из очереди.** Все дисциплины обслуживания, кроме дисциплины со случайным выбором заявок из очереди (SIRO), реализованы в ТЭБ библиотеки стандартными средствами GPSS и тестирования не требуют. Модель, реализующая указанную дисциплину, описана в работе [4], а также в ряде других источников, однако сведения о ее тестировании отсутствуют.

Тестирование проводилось на специально созданной GPSS-модели одноканальной СМО. Подсчитывалось число транзактов, извлеченных с разных

позиций очереди при различных ее длинах. Результаты тестирования, полученные при максимальной длине очереди, равной 5, и при длине прогона модели 10 000 000, подтвердили равновероятный (в пределах статистической погрешности) выбор транзактов с разных позиций очереди при всех ее возможных длинах. Однако полноценный статистический анализ результатов тестирования не проводился.

**Пример разработки имитационного приложения с использованием ТЭБ библиотеки *QueuingSystems*.** С целью сопоставимости результатов моделирования в качестве примера использования разработанной библиотеки была выбрана модель контакт-центра (КЦ) с трехэтапной системой обслуживания, подробно рассмотренная в [3;7].

На рис. 6 представлена структурная схема модели КЦ, разработанная в GPSS STUDIO с использованием библиотеки *QueuingSystems*. Надписи на изображениях ТЭБ отображают логику модели. Связи между ТЭБ организованы в соответствии со схемой модели КЦ [3].

ТЭБ №1 класса *Пуассоновский* относится к категории *Генераторы входных потоков заявок*, ТЭБ №2 класса *Экспоненциальное распределение* – к подкатегории *СМО с бесконечным числом каналов*. ТЭБ с номерами 6 и 9 класса *Экспоненциальные распределения* относятся к подкатегории *СМО с ограничениями на число заявок в очереди и время ожидания*. ТЭБ с номерами 3, 5 и 8 класса *Разветвление с заданной вероятностью*, ТЭБ №11 класса *Запись данных в таблицу* и все остальные ТЭБ класса *Уничтожение транзакта* относятся к категории *Вспомогательные ТЭБ*.

Принцип самодостаточности ТЭБ, положенный в основу разработанной библиотеки, позволил сократить общее число ТЭБ структурной схемы модели КЦ в полтора раза, сделать ее более компактной и близкой к исходной модели. В результате прогона имитационной модели, сгенерированной средствами GPSS STUDIO, были получены те же (в пределах статистической погрешности) результаты, что и в работе [3].



Рис. 6. Структурная схема модели КЦ

В настоящее время начато использование библиотеки *QueuingSystems* в разработке ряда имитационных приложений для моделирования некоторых систем телекоммуникации, а также в учебном процессе. Результаты этих работ авторы рассчитывают представить на следующей конференции.

### Выводы

1. Разработанная библиотека типовых элементарных блоков QueuingSystems для предметной области «Системы массового обслуживания» и создаваемые на ее основе в среде GPSS STUDIO структурные схемы позволяют генерировать имитационные GPSS-модели широкого класса систем и сетей массового обслуживания с различными законами распределения случайных потоков заявок и продолжительности их обслуживания.

2. Результаты проведенного тестирования нестандартных процедур генерирования случайных временных интервалов, моделей с ограничениями на время ожидания и пребывания заявки в системе и модели со случайным выбором заявки из очереди подтверждают адекватность соответствующих элементов библиотеки.

3. Практическая значимость работы подтверждается успешным использованием разработанной библиотеки при создании структурной схемы модели контакт-центра и сгенерированной на ее основе имитационной GPSS-модели.

### Литература

1. **Девятков В.В.** и др. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общ. ред. В.В. Девяткова. М.: ИНФРА-М., 2018. – 283 с.
2. **Воробейчиков Л.А., Сосновиков Г.К.** Технология разработки библиотеки типовых решений предметной области в среде GPSS STUDIO // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). Труды конференции (16–18 октября 2019 г., г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»). С. 274-281.
3. **Сосновиков Г.К., Воробейчиков Л.А.** Использование библиотеки типовых решений предметной области при разработке имитационных приложений в среде GPSS STUDIO // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). Труды конференции (16–18 октября 2019 г., г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»). С. 282-289.
4. **Воробейчиков Л.А.** Моделирование систем массового обслуживания в среде GPSS World: учеб. пособие / Л.А. Воробейчиков, Г.К. Сосновиков. М.: КУРС, 2019. – 272 с.
5. ГОСТ Р 50.1.033-2001 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа хи-квадрат. URL: <https://standartgost.ru/g/50.1.033-2001> (дата обращения 15.03.2021).
6. ГОСТ Р 50.1.037-2002 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии. URL: <https://standartgost.ru/g/50.1.037-2002> (дата обращения 15.03.2021).
7. **Степанов С.Н.** и др. Анализ модели call-центра при перегрузке / С.Н. Степанов, М.О. Шишкин, Г.К. Сосновиков, М.С. Степанов, Л.А. Воробейчиков, А.М. Журко // Т-СОММ: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13, № 10. С. 68-76.