

Научная статья

УДК 519.688

doi: 10.17223/19988605/73/15

Концепция архитектуры приложения для построения аналитической аппроксимации распределения вероятностей числа заявок в СМО на основе имитационного моделирования**Юлия Андреевна****¹, Александр Николаевич****²***^{1,2} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия**¹ prokudina_ua@mail.ru**² moiseev.tsu@gmail.com*

Аннотация. Представлена концепция общей архитектуры приложения для построения аналитической аппроксимации распределения вероятностей числа заявок в системах массового обслуживания. Главная идея, заложенная в основу данного приложения, – построение аналитических аппроксимаций распределения вероятностей на основе численных результатов, полученных в серии экспериментов имитационного моделирования соответствующих систем массового обслуживания. Качество генерируемых аппроксимаций оценивается с использованием метрик близости распределений вероятностей. Предложены общий алгоритм процесса построения аналитических аппроксимаций, необходимые для его реализации классы, пакеты и структуры данных, а также детализация их взаимодействий для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: имитационное моделирование; система массового обслуживания; аппроксимация распределения вероятностей.

Для цитирования: Прокудина Ю.А., Моисеев А.Н. Концепция архитектуры приложения для построения аналитической аппроксимации распределения вероятностей числа заявок в СМО на основе имитационного моделирования // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 73. С. 134–142. doi: 10.17223/19988605/73/15

Original article

doi: 10.17223/19988605/73/15

Concept of application architecture for constructing analytical approximation of the probability distribution of the number of customers in queuing systems based on simulation modeling**Yuliya A. Prokudina¹, Alexander N. Moiseev²***^{1,2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation**¹ prokudina_ua@mail.ru**² moiseev.tsu@gmail.com*

Abstract. The article presents the idea and concept of the general architecture of the application for constructing an analytical approximation of the probability distribution of the number of customers in queuing systems. The main idea underlying this application is to construct analytical approximations of the probability distribution based on numerical results obtained in a series of simulation experiments of the corresponding queuing systems. The quality of the generated approximations will be assessed using metrics of the proximity of probability distributions. The article proposes a general algorithm for the process of constructing analytical approximations, classes, packages and data structures required for its implementation, as well as a detailing of their interactions to solve the problem.

Keywords: simulations; queuing system; approximation of probability distribution.

For citation: Prokudina, Y.A., Moiseev, A.N. (2025) Concept of application architecture for constructing analytical approximation of the probability distribution of the number of customers in queuing systems based on simulation modeling. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science.* 73. pp. 134–142. doi: 10.17223/19988605/73/15

Введение

При исследовании систем массового обслуживания (СМО) [1] одной из главных задач является получение в аналитическом виде распределения вероятностей числа заявок в системе, обычно в стационарном режиме работы. При этом из-за трудностей математического характера только в редких случаях возможно получить точный аналитический результат. В некоторых случаях удается аналитически получить аппроксимации распределений, используя асимптотические методы [2, 3] или аппроксимации исходных распределений [4]. В остальных случаях возможно получение рекуррентных алгоритмов [5] либо – чаще всего – проведение численного или имитационного моделирования [6].

Имитационное моделирование позволяет получить численный результат практически для любой конфигурации СМО. Поэтому возникает идея – провести серию экспериментов по имитационному моделированию одной и той же СМО с разными значениями параметров, получить наиболее подходящие в каждом случае распределения вероятностей числа заявок в системе, а затем систематизировать эти результаты и оценить влияние каждого входного параметра на результирующую функцию распределения. Таким образом, в качестве результата будет предложена аппроксимация функции распределения вероятностей числа заявок в системе в виде какой-то известной функции распределения, параметры которой определяются в терминах исходных параметров модели. В приложении реализован банк распределений, среди которых производится поиск.

В настоящее время в ИПМКН ТГУ ведется разработка программного комплекса SimQ [7], предназначенного для имитационного моделирования систем массового обслуживания. Предполагается использовать ядро этой системы для выполнения непосредственно процесса имитационного моделирования и получения эмпирических распределений, а затем с помощью надстроенного каскада модулей построить аналитическую аппроксимацию числа заявок в системе. В данной работе предложена концепция архитектуры программного комплекса, который будет выполнять эту задачу, описаны задачи каждого модуля, основные идеи по реализации алгоритмов.

1. Концепция архитектуры приложения

Чтобы реализовать описанный процесс, предлагается следующая концепция архитектуры разрабатываемого программного комплекса (рис. 1; на рисунках используется нотация UML [8]). Мы выделяем пять основных частей системы: Интерфейс пользователя (UI), Управление (AF_Controller), Модуль оценки параметров (Estimator), Ядро моделирования SimQ и Модуль подбора аналитических выражений (Analytic).

Пакет UI предназначен для элементов, формирующих интерфейс пользователя. С помощью этих элементов пользователь выбирает конфигурацию системы массового обслуживания, задает параметры модели и параметры процесса построения аналитической аппроксимации. Здесь же находятся объекты, с помощью которых производится вывод результатов по окончании процесса построения аналитической аппроксимации.

Пакет AF_Controller реализует функции управления процессом построения аппроксимации, многократно запускает имитационное моделирование выбранной системы (конфигурации СМО) для различных значений варьируемых параметров модели, получает от модуля Estimator соответствующие оценки распределений и передает их в модуль Analytic.

Работа пакета Estimator подробно описана в [9]. Его задачами являются поиск наиболее близкого распределения вероятностей из имеющейся коллекции распределений и оценка его параметров. На самом деле оценки строятся для каждого распределения из коллекции, если это возможно, при этом вычисляется метрика близости построенной оценки к эмпирическому распределению (в настоящей статье для этого используется расстояние Колмогорова).

Ядро моделирования SimQ [7] занимается непосредственно имитационным моделированием заданной СМО и выдает в качестве результата эмпирическое распределение вероятностей числа заявок в системе.

Наконец, задачей пакета Analytic является построение аппроксимации распределения вероятностей числа заявок в выбранной СМО в аналитической форме. Для этого используются выражения для распределений из имеющейся коллекции, а также построенные с помощью Estimator оценки распределений и их метрики близости к результатам имитационного моделирования.

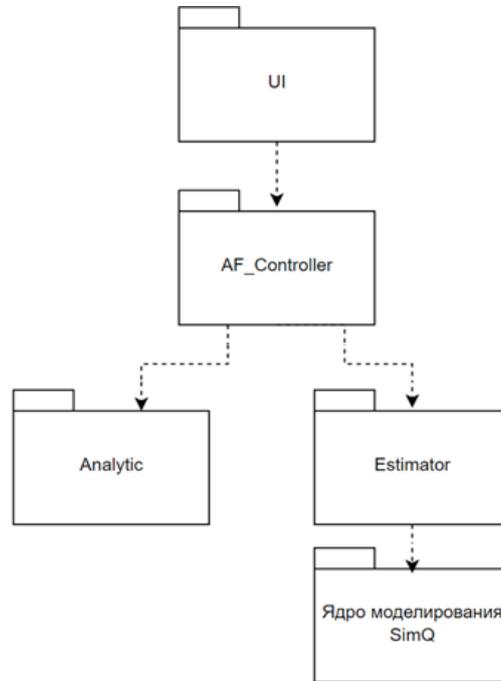


Рис. 1. Концепция архитектуры приложения для построения аналитической аппроксимации
Fig. 1. Concept of the architecture of the application for constructing analytical approximation

В результате пользователь получает в аналитическом виде предполагаемое распределение вероятностей числа заявок в системе для выбранной модели СМО. Это распределение в рамках данной работы будем называть аналитической аппроксимацией. В принципе, приложение может выдавать пользователю все аналитические аппроксимации, полученные для каждого элемента коллекции распределений, сортированные по значению некоторой агрегированной метрики близости, чтобы пользователь наглядно видел точность каждого вида аппроксимации и мог выбрать подходящую, даже если значение метрики близости (погрешность) было не минимальным. Это полезно, например, в тех случаях, когда погрешность отличается незначительно, но одно из распределений является более удобным для использования на практике.

2. Общий контур процесса построения аппроксимации

Рассмотрим общий ход предлагаемого процесса построения аналитической аппроксимации распределения вероятностей в разрабатываемой системе (рис. 2).

Пользователь выбирает конфигурацию (тип) СМО, в некоторых случаях задает значения неизменяемых параметров модели, а также параметры самого процесса построения. Эти данные поступают в AF_Controller, который в цикле перебирает все значения варьируемых параметров модели, необходимые для построения аналитических выражений, запускает для них имитационное моделирование соответствующей СМО в Ядре моделирования SimQ, передает получаемые при этом эмпирические распределения модулю Estimator, который строит для них оценки распределения и вычисляет значения метрики качества для каждой оценки. Эти оценки и соответствующие значения метрик записываются в Структуру ПРО («Параметры–Распределение–Оценки»), которая индексируется по выбранным значениям параметров СМО. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут выбраны все необходимые значения варьируемых параметров модели.

Далее сформированная Структура ПРО передается модулю Analytic, который на ее основе строит аналитические аппроксимации распределения вероятностей числа заявок в СМО выбранной пользователем конфигурации, а также для каждой такой аппроксимации вычисляет некоторую агрегированную метрику качества, например, используя значения метрики качества оценок распределений, полученных ранее и хранящихся в Структуре ПРО.

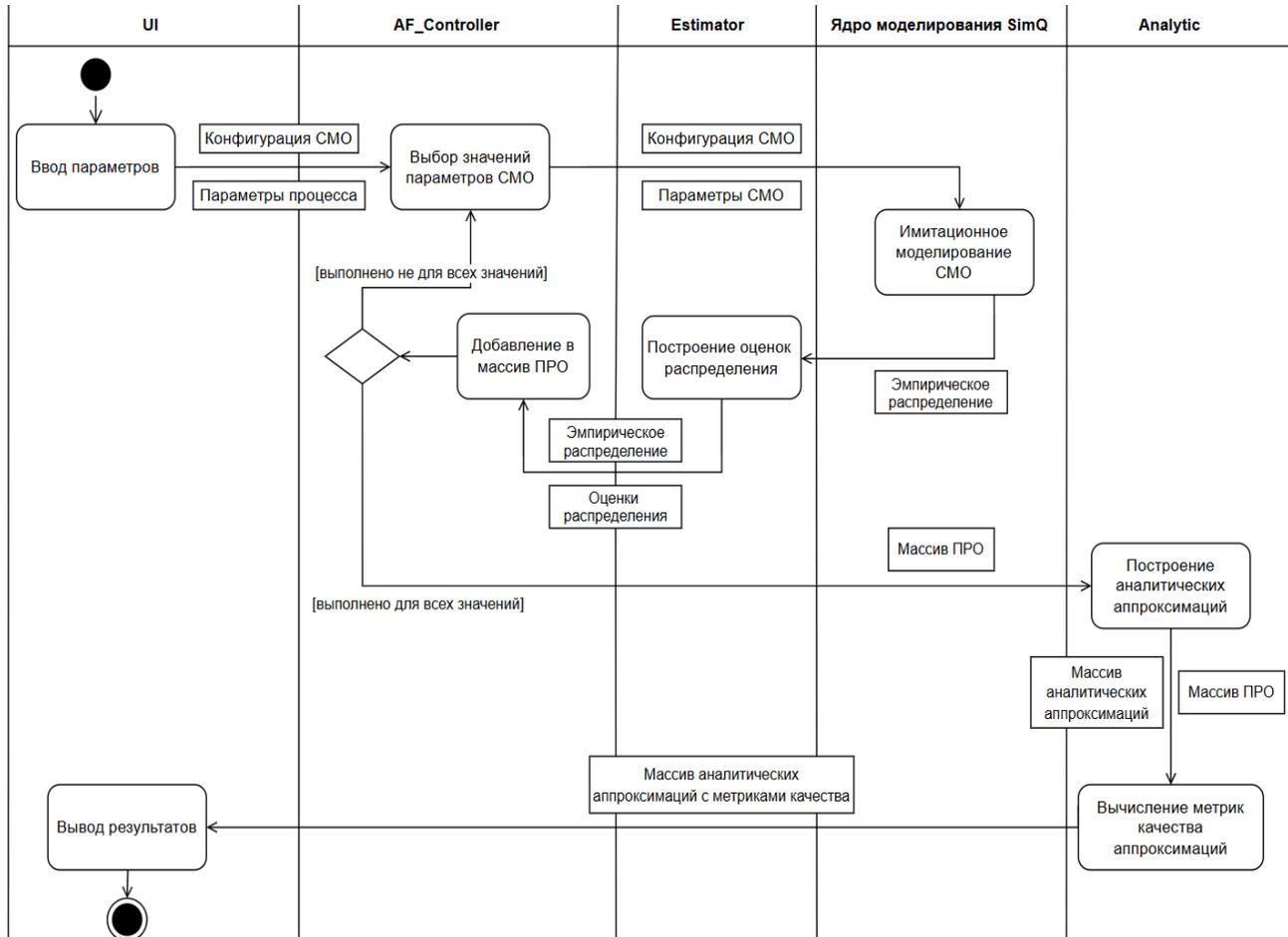


Рис. 2. Процесс построения аналитической аппроксимации
 Fig. 2. Process of constructing of the analytical approximation

Результат выдается пользователю в виде аналитических выражений аппроксимаций для распределения вероятностей, выполненных в терминах исходных (варьируемых) параметров СМО.

3. Общая архитектура системы, связанная с построением аналитических аппроксимаций

На рис. 3 показана часть элементов пакетов системы, которые задействованы в процессе построения аналитических аппроксимаций.

В пакете **AF_Controller** содержатся следующие важные для текущего рассмотрения классы:

CollectAFs – класс, который запускает вычисление аналитических функций параметров оцененных распределений (аппроксимаций) [9]. Его операции:

AFs_Collect(init: String): AF[]* – метод, который запускает вычисление аналитических аппроксимаций параметров и выдает результаты в виде массива структур AF (см. ниже). Сначала вызывается метод формирования массива структур ПРО (массив содержит формулы для всех возможных параметров всех необходимых оценок) класса CalcPDE, и на основе этого массива запускается формирование массива структур AF, обращаясь к пакету Analytic. *init* – атрибут, который хранит конфигурацию и значения параметров СМО и параметры симуляции.

PDEs_Collect(): PDE[]* – метод, который в цикле перебирает все значения варьируемых параметров модели, запускает формирование структур ППО (класс PDE, см. ниже), обращаясь к методам класса CalcPDE, и собирает из этих структур массив.

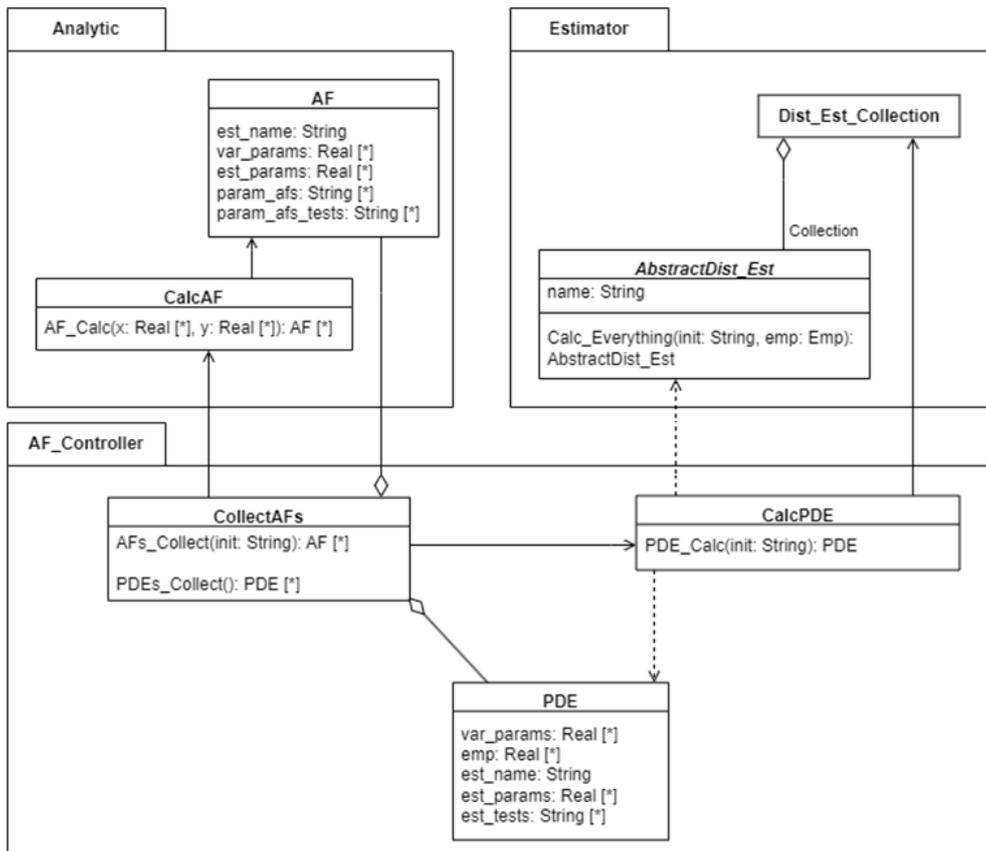


Рис. 3. Структура пакетов Analytic, Estimator, AF_Controller
 Fig. 3. Structure of the Analytic, Estimator, AF_Controller packages

CalcPDE – класс, который запускает процесс имитационного моделирования, чтобы получить эмпирическое распределение и его оценки (аппроксимации распределениями из банка распределений с оценками их параметров), а после формирует массив ППО.

PDE_Calc(init: String): PDE – вызывает методы пакетов Ядро SimQ для генерации эмпирических распределений и Estimator для получения оценок и соответствующих значений метрик качества, а также вызывает свои методы для записи этих оценок и метрик в Структуру ППО. Возвращает Структуру ППО.

PDE – класс, который представляет в приложении структуру ППО, содержит следующие атрибуты:

- var_params: Real[*]* – массив исходных параметров системы и их значений;
- emp: Real[*]* – массив значений эмпирического распределения;
- est_name: String* – название оценки (распределения);
- est_params: Real[*]* – массив оценок параметров;
- est_tests: String[*]* – массив метрик качества оценок параметров.

Структура PDE и пример заполнения данными приведены на рис. 4. Массив исходных параметров системы и их значений *var_params* содержит значения параметров исходной СМО, в том числе заданные и изменяемые в классе *CollectAFs*; массив значений эмпирического распределения *emp* состоит из пар «значение–вероятность», представляющих эмпирическое распределение вероятностей, полученное в результате имитационного моделирования; оценки распределения: названия оценок *est_name* – ключевые слова, определяющие распределение вероятностей из банка распределений,

массив оценок параметров *est_params* – массив пар «параметр–значение», полученный на основе построения оценок параметров для одного *est_name* на основе текущего *emp*, массив метрик качества *est_tests* содержит набор значений метрик качества (точности) соответствующей оценки распределения. Обозначения λ , γ и β приведены в качестве примера варьируемых параметров, для конкретной конфигурации, рассматриваемой СМО, они могут означать, например, соответственно интенсивность входящего потока, интенсивность обслуживания заявок и интенсивность ухода заявок из очереди. Другие обозначения, используемые на рисунке: *Kolm.Dist.*, ω_2 – метрики качества (расстояние Колмогорова и метрика «омега-квадрат» соответственно), p – параметр геометрического распределения, μ , σ – параметры дискретизированного нормального распределения (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение).

Варьируемые параметры <i>var_params</i>	Эмп. распр. <i>emp</i>	Назв. оценки (расп.) <i>est_name</i>	Оценки параметров <i>est_params</i>	Метрики качества <i>est_tests</i>
$\lambda = 1, \gamma = 3, \beta = 2$	[0 = 0.001, 1 = 0.0003, ...]	Дис. нор.	$\mu = 3, \sigma = 6$	[<i>Kolm. Dist.</i> = 0.05, $\omega_2 = 0.9, \dots$]
		Геомет.	$p = 0.8$	[<i>Kolm. Dist.</i> = 0.04, $\omega_2 = 0.8, \dots$]
	

Рис. 4. Структура типа PDE (ППО) и пример ее заполнения
Fig. 4. Structure of PDE type and an example of its filling

Пакет **Estimator**, представленный впервые в [9], модифицирован и дополнен. Он содержит следующие классы, важные для текущей работы:

AbstractDist_Est – абстрактный класс, представляющий одно распределение вероятностей из банка распределений и включающий в себя всю информацию об оценке его параметров (в том числе метрики качества). Его атрибуты и операции:

name: String – имя распределения (оценки распределения);

Calc_Everything(init: String, emp: Emp): AbstractDist_Est – для заданного эмпирического распределения *emp* строит оценку и вычисляет для нее значения метрик качества.

Dist_Est_Collection – класс, позволяющий осуществлять операции над классами-потомками *AbstractDist_Est*: создавать экземпляры этих классов, вызывать их методы и т.п. Фактически представляет собой точку доступа к коллекции распределений вероятностей из банка распределений. Доступ осуществляется через следующий атрибут:

Collection: AbstractDist_Est[]* – в нем содержатся экземпляры каждого класса-потомка *AbstractDist_Est* (по одному на класс) из банка распределений. Этот массив формируется на старте приложения и позволяет другим классам работать с банком распределений для оценок.

Пакет **Analytic** содержит следующие важные для рассмотрения классы:

CalcAF – его задачей является построение (аппроксимация) аналитических зависимостей значений параметров оценок распределений от исходных параметров конфигурации СМО. Основной интерфейс этого класса:

AF_Calc(x: Real[], y: Real[*]): AF[*]* – метод, который формирует аналитические аппроксимации параметров оценок распределения в виде функций исходных параметров (конфигурации) СМО. На вход подается массив значений x оцениваемого параметра; массив значений y параметра конфигурации СМО. Возвращает массив аналитических оценок выражений для параметра x через параметр y .

AF – класс, который представляет в приложении структуру, содержащую необходимую информацию по аналитическим оценкам параметров распределения. Имеет следующие атрибуты:

est_name: String – название распределения;

var_params: Real[]* – массив варьируемых параметров и их значений;

est_params: Real[]* – массив параметров распределения;

param_afs: String[]* – массив аналитических функций оценок параметров;

param_afs_tests: String[]* – массив метрик качества для аналитических функций оценок параметров.

Этот тип данных предназначен для сохранения аналитических выражений оценок параметров распределения, полученных в методе *AF_Calc(...)* класса *CalcAF*. AF состоит из названия распределения-оценки, значений варьируемых параметров, параметров оценки, массивов полученных аналитических функций оценок параметров, массивов метрик качества для каждой аналитической оценки. Структура данного класса и пример заполнения атрибутов представлены на рис. 5.

Назв. оценки (расп.) <i>est_name</i>	Варьируемые параметры и значения <i>var_params</i>	Параметры оценки <i>est_params</i>	Аналит. фу-ии оценок параметров <i>param_afs</i>	Метрики качества <i>param_afs_tests</i>
Дис. нор. расп.	$\lambda = [1, 2, 3, 4]$ $\gamma = [1, 2, 3, 4]$ $\beta = [1, 2, 3, 4]$	μ	$[3\lambda + \gamma - 2^\beta - 0.124,$ $2.4^\lambda + \gamma/\beta - 0.62,$ $-4^\beta - 0.4]$	<i>[Kolm. Dist. = 0.012, w2 = 0.91, ...]</i>
		σ	$[0.1\lambda + 0.4,$ $0.3^\gamma + 0.43\beta^4 - 0.23]$	

Рис. 5. Структура класса AF и пример ее заполнения
Fig. 5. Structure of AF class and an example of its filling

4. Реализация общего контура процесса построения аналитических аппроксимаций

На рис. 6 представлена общая реализация поведения прототипа в виде взаимодействия между элементами системы.

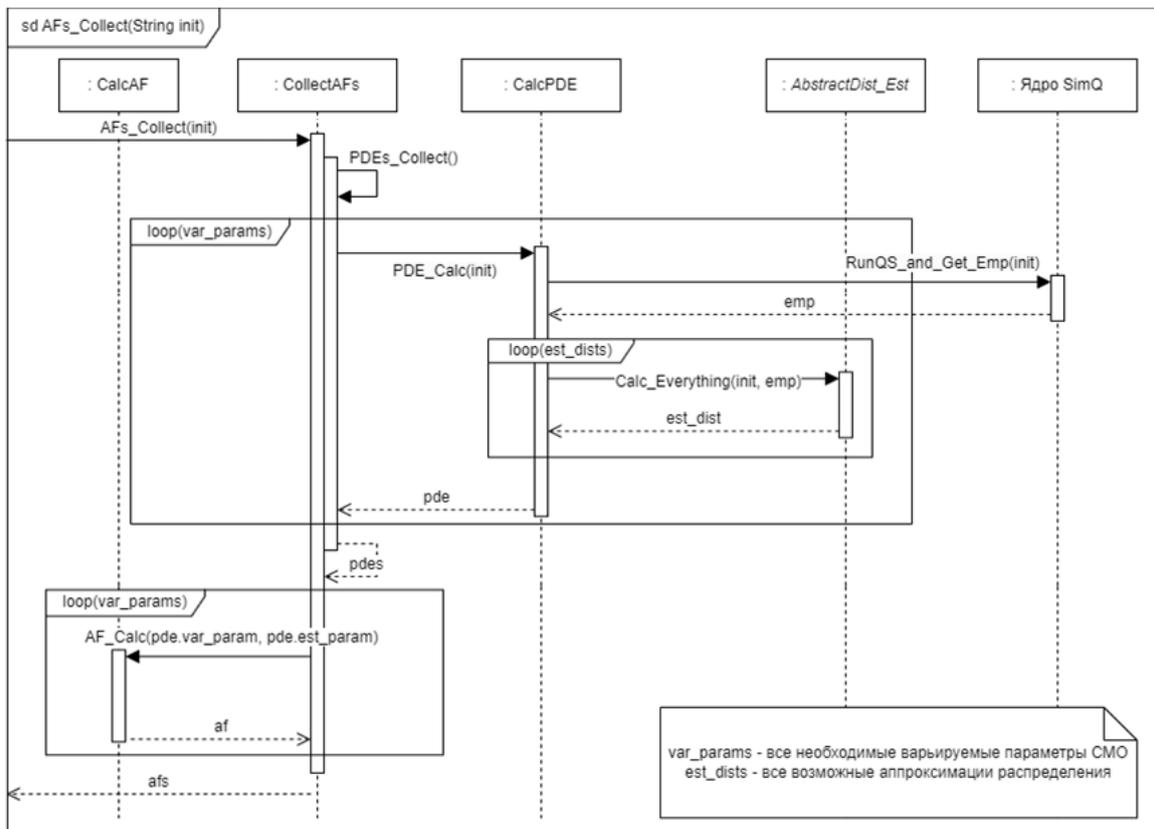


Рис. 6. Реализация общего контура процесса построения аналитических аппроксимаций
Fig. 6. Implementation of the general outline of the process of constructing analytical approximations

Вычисление аналитических функций начинается с запуска метода *AFs_Collect(...)* объекта класса *CollectAFs*, который сначала формирует массив Структур ПРО (коллекцию объектов типа PDE). Для этого в цикле с разными значениями входных параметров он обращается к классу *CalcPDE*, вызывая его метод *PDE_Calc(...)* для генерации массива Структур ПРО. Метод *PDE_Calc(...)*, в свою очередь, обращается к Ядру SimQ, запуская процесс имитационного моделирования заданной СМО с соответствующими значениями параметров. В результате получаем эмпирическое распределение целевой случайной величины. Далее в цикле вычисляются оценки этого распределения (аппроксимации и метрики их точности) через обращение к объектам из коллекции *Collection* класса *Dist_Est_Collection* пакета *Estimator*, и возвращается Структура ПРО (объект PDE).

После этого на основе массива сформированных Структур ПРО класс *CollectAFs* в цикле вызывает метод класса *CalcAF* для построения аналитических функций параметров оценок.

Основная теоретическая проблема, решение которой является критически важным для реализации модуля *Analytic* и работы всей системы, – это разработка методов построения самих аналитических аппроксимаций параметров оценок по имеющимся наборам данных. Здесь авторы видят возможность использования как прямых методов (построение уравнений и их решение), так и методов регрессионного анализа [10, 11] и даже, возможно, методов машинного обучения [12–14]. Выполнена опытная апробация работоспособности предложенной концепции архитектуры с прототипом модуля *Analytic*.

Заключение

Таким образом, в результате работы сформулированы общая концепция архитектуры приложения и основной контур построения аналитических аппроксимаций распределения числа заявок в СМО, конфигурацию которой определяет пользователь. Представленная концепция предлагает общую архитектуру, ключевые элементы и описание основных контуров взаимодействия программного комплекса, предназначенного для поиска аппроксимаций распределений вероятностей числа заявок и других вероятностных характеристик функционирования СМО в аналитическом виде. Реализация программного комплекса позволит получать аналитические выражения или их аппроксимации для указанных характеристик для СМО различных конфигураций, в том числе и таких, где получение аналитических результатов не представляется возможным.

Список источников

1. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания: учебное пособие. 2-е изд., испр. Томск : Изд-во НТЛ, 2010. 228 с.
2. Назаров А.А., Моисеева С.П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания. Томск : Изд-во НТЛ, 2006. 112 с.
3. Моисеев А.Н., Назаров А.А. Бесконечнолинейные системы и сети массового обслуживания. Томск : Изд-во НТЛ, 2015. 240 с.
4. Moiseev A.N., Nazarov A. A., Paul S.V. Asymptotic Diffusion Analysis of Multi-Server Retrial Queue with Hyper-Exponential Service // *Mathematics*. 2020. V. 8 (4). Art. 531. P. 1–16.
5. Полховская А.В., Данилюк Е.Ю., Моисеева С.П., Бобкова О.С. Вероятностная модель системы совместного доступа с коллизиями, *H*-настойчивостью и отказами // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2022. № 58. С. 35–46.
6. Приступа П.В., Сущенко С.П., Михеев П.А., Моисеев А.Н. Анализ эффективности прямой коррекции ошибок на уровне транспортного протокола // *Автоматика и телемеханика*. 2022. № 7. С. 59–81. doi: 10.31857/S0005231022070042
7. Прокудина Ю.А., Оруджов Э.А., Моисеев А.Н. Концепция архитектуры программного комплекса SimQ // *Труды Томского государственного университета. Сер. физико-математическая*. 2023. Т. 308. С. 155–159.
8. Буч Г., Рамбо Дж., Якобсон И. Язык UML : руководство пользователя / пер. с англ. Н. Мухина. 3-е изд. М. : Академия АйТи ; ДМК Пресс, 2022. 495 с.
9. Прокудина Ю.А., Моисеев А.Н. Прототип приложения для поиска распределения, наиболее близкого к заданному эмпирическому // *Труды Томского государственного университета. Сер. физико-математическая*. 2024. Т. 309. С. 199–205.
10. Гельман Э., Хилл Д., Вехтари А. Регрессия: теория и практика. М. : ДМК Пресс, 2022. 748 с.
11. Воскобойников Ю.Е. Регрессионный анализ данных в пакете MATHCAD : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2022. 224 с.
12. Вишневикий В.М., Ефросинин Д.В. Теория очередей и машинное обучение. М. : ИНФРА-М, 2024. 370 с.
13. Sherzer E., Senderovich A., Baron O., Krass D. Can machines solve general queueing systems? 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2202.01729> (accessed: 17.02.2025).

14. Raheema M., Abdullah A. Function approximation using neuraland fuzzy methods // Communications on Applied Electronics 2016. V. 6 (3). P. 35–42.

References

1. Nazarov, A.A. & Terpugov, A.F. (2010) *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing System Theory]. 2nd ed. Tomsk: NTL.
2. Nazarov, A.A. & Moiseeva, S.P. (2006) *Metod asimptoticheskogo analiza v teorii massovogo obsluzhivaniya* [Method of asymptotic analysis in queueing theory]. Tomsk: NTL.
3. Moiseev, A.N. & Nazarov, A.A. (2015) *Beskonechno lineynye sistemy i seti massovogo obsluzhivaniya* [Infinitely linear systems and queueing networks]. Tomsk: NTL.
4. Moiseev A.N., Nazarov A.A. & Paul, S.V. (2020) Asymptotic Diffusion Analysis of Multi-Server Retrial Queue with Hyper-Exponential Service. *Mathematics*. 8(4). Art. 531. pp. 1–16. doi: 10.3390/math8040531
5. Polkhovskaya, A.V., Danilyuk, E.Yu., Moiseeva, S.P. & Bobkova O.S. (2022) The probabilistic model of sharing system with collisions, H-persistence and rejections. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 58. pp. 35–46. doi: 10.17223/19988605/58/4
6. Pristupa, P.V., Suschenko, S.P., Mikheev, P.A. & Moiseev, A.N. (2022) Analysis of the effectiveness of forward error correction at the transport protocol level. *Avtomatika i Telemekhanika*. 7. pp. 59–81. doi: 10.31857/S0005231022070042
7. Prokudina, Yu.A., Oruzhov, E.A. & Moiseev, A.N. (2023) Kontseptsiya arkhitektury programmno kompleksa SimQ [Concept of the SimQ Software Complex Architecture]. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. fiziko-matematicheskaya*. 308. pp. 155–159.
8. Booch, G., Rambo, J. & Yakobson, I. (2022) *Yazyk UML: rukovodstvo pol'zovatelya* [The Unified Modeling Language User Guide]. Translated from English by N. Mukhin. 3rd ed. Moscow: Akademiya AyTi; DMK Press.
9. Prokudina, Yu.A. & Moiseev, A.N. (2024) Prototip prilozheniya dlya poiska raspredeleniya, naiboleye blizkogo k zadannomu empiricheskomu [Application Prototype for Finding the Distribution Closest to a Given Empirical One]. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. fiziko-matematicheskaya*. 309. pp. 199–205.
10. Gelman, E., Hill, D. & Vekhtari, A. (2022) *Regressiya: teoriya i praktika* [Regression and Other Stories]. Moscow: DMK Press.
11. Voskoboynikov, Yu.E. (2022) *Regressionnyy analiz dannykh v pakete MATHCAD* [Regression Data Analysis in the MATHCAD Package]. St. Petersburg: Lan'.
12. Vishnevskiy, V.M. & Efrosinin, D.V. (2024) *Teoriya ocheredey i mashinnoe obuchenie* [Queueing Theory and Machine Learning]. Moscow: INFRA-M.
13. Sherzer, E., Senderovich, A., Baron, O. & Krass, D. (2022) *Can machines solve general queueing systems?* [Online] Available from: <https://arxiv.org/abs/2202.01729> (Accessed: 26th February 2025).
14. Raheema, M. & Abdullah, A. (2016) Function Approximation using Neuraland Fuzzy Methods. *Communications on Applied Electronics*. 6(3). pp. 35–42.

Информация об авторах:

Прокудина Юлия Андреевна – аспирант, ассистент кафедры программной инженерии Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: prokudina_ua@mail.ru

Моисеев Александр Николаевич – доцент, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой программной инженерии Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: moiseev.tsu@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Prokudina Yuliya A. (Post-Graduate Student, Assistant, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: prokudina_ua@mail.ru

Moiseev Alexander N. (Associate Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: moiseev.tsu@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 12.03.2025; принята к публикации 02.12.2025

Received 12.03.2025; accepted for publication 02.12.2025