

**Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018**



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.1.10

УДК 519.872.4



## Имитационная модель двухканальной системы массового обслуживания с обменом и повторными заявками

С.А. Баркалов, Е.А. Серебрякова

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 18 декабря 2023  
Одобрена: 25 февраля 2024  
Принята к публикации:  
25 апреля 2024

#### Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Вклад авторов

равноценен.

#### Ключевые слова:

массовое обслуживание, повторные заявки, обмен заявками, голосовой бот, нестационарное решение, имитационное моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Рассматриваются нестационарные эффекты при работе двухканальной RQ система массового обслуживания (СМО) с обменом заявками в процессе обслуживания. Исследование направлено на выявление особенностей функционирования гибридного кол-центра с параллельным обслуживанием человеком-диспетчером и интеллектуальным голосовым ботом. Заявки, не получившие обслуживания, переходят на «орбиты», откуда осуществляются повторные звонки. По истечении случайного времени, определяемого терпеливостью клиентов, заявки покидают «орбиты». Интеллектуальный бот обладает более высокой скоростью обслуживания в сравнении с диспетчером-человеком. Поток заявок на входе распределяется между каналами обслуживания случайным образом. Учитывается, что часть клиентов в ходе обслуживания может предпочесть переход к альтернативному диспетчеру. В процессе работы у диспетчера-человека имеются короткие перерывы для отдыха и длинный перерыв на обед. В эти временные промежутки обслуживание полностью осуществляется ботом. Прерывистость режимов обслуживания приводит к нестационарным эффектам в виде текущего изменения пропускной способности СМО. Поступающие заявки описываются пуассоновским процессом, когда обслуживание открыто. Численные расчеты основаны на дискретно-событийном имитационном моделировании системы. На каждом шаге таймер модельного времени увеличивается на фиксированную величину шага. Состояние системы за временной шаг изменяется случайным образом, как марковский процесс, т.е. вероятность перехода зависит только от текущего состояния СМО и не учитывает эффектов памяти. Предложен алгоритм имитационного моделирования, основанный на разбиении всего периода работы СМО на малые интервалы, в течение каждого из которых вероятности изменений малы. Наличие альтернатив в работе СМО приводит к ветвлению процесса. Статистический характер функционирования СМО учитывается в ансамбле реализаций компьютерной модели и характеризуется дисперсией результатов. В качестве примера проведено моделирование кол-центра жилищной управляющей компании, показавшее перспективность повышения доли интеллектуальных ботов в обслуживании звонков.

© Баркалов Сергей Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления, e-mail: bsa610@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6183-3004.

Серебрякова Елена Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления, e-mail: seaparis@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5129-246X.



**Perm Polytech Style:** Barkalov S.A., Serebryakova E.A. Simulation model of a two-channel queuing system with exchange and retry requests. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2024, no. 1, pp. 160–172. DOI: 10.15593/2499-9873/2024.1.10

**MDPI and ACS Style:** Barkalov, S.A.; Serebryakova, E.A. Simulation model of a two-channel queuing system with exchange and retry requests. *Appl. Math. Control Sci.* **2024**, 1, 160–172. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.1.10>

**Chicago/Turabian Style:** Barkalov, Sergey A., and Elena A. Serebryakova. 2024. "Simulation model of a two-channel queuing system with exchange and retry requests". *Appl. Math. Control Sci.* no. 1: 160–172. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.1.10>



APPLIED MATHEMATICS  
AND CONTROL SCIENCES

№ 1, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.1.10

UDC 519.872.4



## Simulation model of a two-channel queuing system with exchange and retry requests

S.A. Barkalov, E.A. Serebryakova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 17 December 2023

Approved: 25 February 2024

Accepted for publication:

25 April 2024

#### Funding

This research received no external funding.

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Author Contributions

equivalent.

#### Keywords:

queuing service, retry requests, exchange of requests, voice bot, non-stationary solution, simulation.

### ABSTRACT

Non-stationary effects in the operation of a two-channel RQ system with the exchange of requests during the service process are considered. The study is aimed to identify the features of the functioning a hybrid call center with parallel service by a human dispatcher and an intelligent voice bot. Requests that do not obtained service are transferred to orbits, from where retry calls are made. After a random time, determined by the patience of clients, requests leave the orbit. An intelligent bot has a higher service rate compared to a human dispatcher.

The flow of input requests is distributed randomly between service channels. It is taken into account that some clients during the course of service may prefer to switch to an alternative dispatcher. During the operation process, the human dispatcher has short breaks for rest and a long break for lunch. At these time periods, maintenance is performed entirely by a bot. The intermittency of service modes leads to non-stationary effects in the form of a current modification in the throughput of the QS. Incoming requests are described by Poisson processe when the service is open.

Numerical calculations are based on discrete event simulation modeling of the system. At each step, the model time is increased by a fixed step amount. The state of the system changes randomly over a time step, as a Markov process, i.e. the transition probability depends only on the current state of the QS and does not take into account memory effects. A simulation modeling algorithm is proposed, based on dividing the entire period of operation of the QS into small intervals, when the probabilities of changes are small.

The presence of alternatives in the operation of the QS leads to branching of the process. The statistical nature of the functioning of the QS is taken into account in the ensemble of realizations of the computer model and is characterized by the dispersion of the results. As an example, a simulation of a call center for a housing management company was carried out and showed the prospects of increasing the share of intelligent bots in servicing calls.

© **Sergey A. Barkalov** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Management, e-mail: [bsa610@yandex.ru](mailto:bsa610@yandex.ru), ORCID: 0000-0001-6183-3004.

**Elena A. Serebryakova** – CSc of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, e-mail: [sea-parish@mail.ru](mailto:sea-parish@mail.ru), ORCID: 0000-0001-5129-246X.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## Введение

Развитие полноценного проектного подхода в строительстве предполагает дифференцирование жизненного цикла всего проекта по стадиям и отработку управленческих процессов в каждой его фазе [1; 2]. Ключевую роль в современном выстраивании процессов управления строительством играют BIM-технологии информационного моделирования, отображающие данные об объектах строительства на всех этапах жизненного цикла проекта от начального цифрового проектирования объектов и их строительства до эксплуатации, ремонта и демонтажа объектов [3; 4]. Стадия эксплуатации выделяется среди остальных этапов тем, что на этом промежутке времени обеспечивается финансовая окупаемость проекта. Для жилищных комплексов в этот период основные эксплуатационные задачи решаются управляющей компанией (УК) [5; 6]. При этом общее качество обслуживания, обеспечиваемое УК, существенно зависит от налаживания коммуникаций с жильцами, в том числе через диспетчерскую службу. Диспетчерская служба в виде кол-центра обычно имеет несколько телефонных номеров, по которым осуществляется подача жильцами заявок, и представляет собой разновидность системы массового обслуживания (СМО).

Разнообразные СМО изучались в связи с многочисленными приложениями в торговле, транспорте, медицине и связи [7–11], а новые стимулы для их совершенствования продиктованы требованиями формирующейся цифровой экономики и широким применением технологий искусственного интеллекта. К основным проблемам, решаемым теорией СМО, относится определение пропускной способности системы с заданными параметрами и конфигурацией, а также выбор оптимальных параметров СМО с учетом особенностей решаемой задачи. Главные трудности при теоретическом описании СМО обусловлены ограниченностью скорости обслуживания, что приводит к образованию очередей или появлению повторных заявок [12]. Особенность описания кол-центров заключается в замене дисциплины очередей на режим повторных звонков. В этом случае заявки, получившие отказ в обслуживании, поступают на так называемую «орбиту», откуда они могут повторно направляться на обслуживание или покидать систему после некоторого ожидания. В такой постановке проблемы для СМО с повторными заявками (RQ-систем) сформулированы базисные представления и решен ряд важных задач последовательной и параллельной обработки заявок, которые представляют существенный теоретический и практический интерес [13]. В предположении марковости процессов СМО проблема обычно сводится к определению стационарных распределений вероятностей состояний путем решения системы линейных алгебраических уравнений Колмогорова – Чепмена [14]. Несмотря на привлекательность такого подхода, он не описывает очевидно имеющиеся в реальных системах нестационарности, связанные, в частности, с режимами включения и наличием перерывов в обслуживании. Отразить вызванные такими изменениями переходные процессы можно только в рамках нестационарных моделей. Одной из возможностей для их описания является формулировка и решение нестационарных уравнений Колмогорова – Чепмена. Другую возможность предоставляет имитационное моделирование СМО, позволяющее гибко учитывать специфику конкретных систем [15–18].

В данной работе рассматривается гибридный двухканальный кол-центр, где обслуживание осуществляется параллельно диспетчером-человеком и интеллектуальным голосовым ботом, которые могут обмениваться заявками на основе предпочтений клиентов. Описание основывается на имитационном моделировании в предположении марковости процессов. Этот класс алгоритмов использует метод пакетного среднего, собирая последовательность независимых выборок, путем агрегирования совокупности последовательных

наблюдений моделирования процесса [19]. Одним из самых простых и распространенных способов оценки получаемого результата считается метод установления доверительного интервала для средних значений, характеризующих процесс. Размер выборок должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать достоверность результатов. Более подробно эта методика рассмотрена в [20], а в представленной работе дается уточнение понимания смысла дисперсии результатов моделирования нестационарных процессов СМО.

## Модель и метод

Для построения модели, отражающей развитие RQ-системы во времени, мы используем дискретно-событийное моделирование [20], когда переменные, описывающие состояния СМО, меняются в дискретные моменты времени случайным образом. В такие моменты времени могут происходить те или иные события, при этом событие определяется как формально мгновенное изменение состояния системы. Переменная  $t$ , обеспечивающая текущее значение времени, является таймером модельного времени. Для описания динамики системы будем использовать продвижение по времени с постоянным шагом  $\Delta t$ . Определим состояние системы, т.е. совокупность переменных, необходимых для описания системы в определенный момент времени. Состояние системы будем описывать следующим набором переменных. Состояние первой подсистемы (диспетчер-человек)  $P$  будем описывать переменной  $p(k, t)$ , а состояние второй подсистемы  $Q$  (бот) – переменной  $q(k, t)$ , где индекс  $k = 0$  соответствует свободному состоянию обслуживающей системы, а индекс  $k = 1$  указывает на то, что система в данный момент времени  $t$  занята.

Рассматриваемая RQ-система M/M/2 предполагает работу диспетчеров с интенсивностями обслуживания  $\mu_p$  и  $\mu_q$  соответственно. На вход СМО подается простейший поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ . Распределение заявок на входе с выбором диспетчера  $P$  по набранному номеру составляет долю  $h(t)$ , а коэффициент выбора диспетчера равен  $(1-h(t))$ . Парциальные потоки заявок имеют интенсивности  $\lambda_p(t) = h(t)\lambda$ ,  $\lambda_q(t) = (1-h(t))\lambda$ . Если выбранный диспетчер занят, то заявка отклоняется. При этом она переходит на «орбиту», формируя источник повторных вызовов. На «орбите» отклоненная заявка остается некоторое случайное время, после чего вновь обращается в диспетчерскую с попыткой получить обслуживание со скоростью  $\sigma$ .

Схема двухканальной RQ СМО с обменом заявками показан на рис. 1. Блоки  $SP$  и  $SQ$  обозначают каналы обслуживания. Линии со стрелками показывают движение заявок в процессе обслуживания. На входе СМО показаны уже отдельные входные потоки, поскольку на их начальное разделение время фактически не затрачивается. Далее обслуживание осуществляется подсистемами  $SP$  и  $SQ$ . При этом часть заявок отклоняется и уходит на «орбиту», а часть передается другому диспетчеру случайным образом. С «орбиты» заявки повторно поступают на обслуживание или покидают систему в результате отказа клиента находиться в режиме ожидания и повторных попыток. Заявки на «орбите» постепенно покидают систему случайным образом, в темпе, задаваемом параметром  $\alpha$ . Число заявок на орбите диспетчера  $P$  обозначим  $n_p(t)$ , а число заявок на орбите  $Q$  обозначим  $n_q(t)$ . В ходе обслуживания клиент может сменить диспетчера, перейдя от одного к другому. Обслуживание в каналах производится со скоростями  $\mu_p$  и  $\mu_q$ , а обмен заявками регулируется скоростями передачи заявок  $v_p$  и  $v_q$ .

Режим поступления первичных звонков можно описать распределением Пуассона [21]:

$$P(N(t+\tau) - N(t) = k) = \frac{e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^k}{k!}, \quad (1)$$

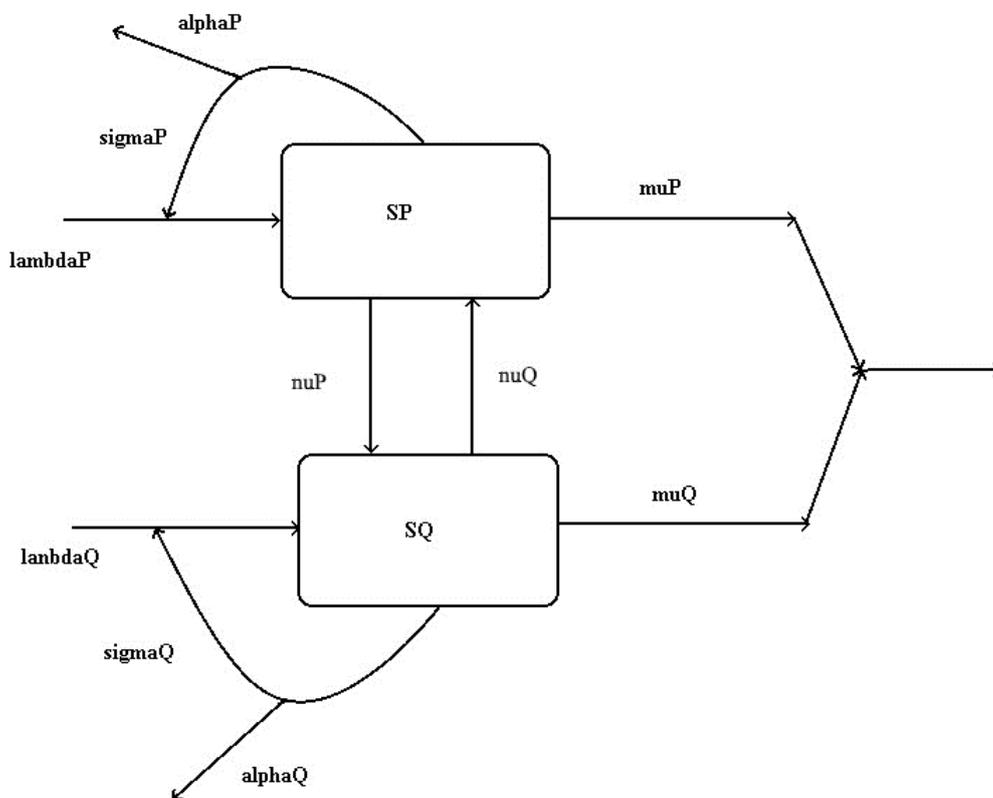


Рис. 1. Схема СМО гибридного двухканального кол-центра

В формуле (1) величина  $N(t)$  представляет собой количество заявок, поступивших в интервале  $(0, t)$ ,  $t \geq 0$ ,  $\tau \geq 0$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ , а  $\lambda$  – скорость поступления заявок. Численное моделирование пуассоновского процесса основывается на том, что вероятность наступления события в таком процессе за короткий интервал времени рассчитывается умножением скорости  $\lambda$  на величину интервала  $\Delta t$  [22]. Таким же образом рассчитываются вероятности и других событий в модели СМО. Так, вероятность обслуживания в канале  $P$  за шаг времени составит  $\mu_P \Delta t$ , а в канале  $Q$  она равна  $\mu_Q \Delta t$ . Поток повторных обращений и поток ухода с «орбиты» пропорциональны числу находящихся на «орбите» заявок  $n_P(t)$  и  $n_Q(t)$  соответственно: для «орбиты» канала  $P$  эти потоки составляют  $\sigma n_P(t)$  и  $\alpha n_P(t)$ ; для канала  $Q$  соответствующие величины равны  $\sigma n_Q(t)$  и  $\alpha n_Q(t)$ . В рассматриваемой модели явно предполагается марковость СМО. Это позволяет резко упростить расчет динамики системы, поскольку на каждом дискретном шаге времени для расчета перехода системы в новое состояние требуется знание только текущего состояния всех переменных. Разделение входного потока по каналам обслуживания учитывает наличие промежутков времени, когда диспетчер-человек имеет перерывы в работе, связанные с отдыхом и обедом [23]. В эти интервалы все входящие заявки адресуются боту. Такая прерывистость в обслуживании приводит к нестационарности процесса функционирования СМО. Для простой од-

ноканальной системы без очередей и повторных звонков время установления стационарного состояния оценивается как  $t_s = \frac{1}{\lambda + \mu}$ . Поэтому ясно, что эффекты нестационарности должны сильно проявляться при малых скоростях поступления заявок, по крайней мере на временных интервалах, сопоставимых с величиной  $t_s$ . При накоплении повторных заявок выход на стационарный режим замедляется.

## Результаты расчетов и их обсуждение

Описанная последовательность действий при моделировании СМО позволяет сформулировать соответствующий компьютерный алгоритм. Вначале происходит инициализация системы, при которой загружаются параметры СМО, а счетчики событий и состояний принимают начальные значения. Проводится моделирование обслуживания на интервале времени обслуживания. Для этого вычисляется вероятность поступления заявки за шаг времени в виде  $\lambda \Delta t$ . На основании этой вероятности с помощью датчика равномерного распределения случайных чисел определяется, наступило событие или нет. Если событие наступило, и в систему поступила заявка, то случайным образом с помощью датчика случайных чисел заявка направляется в один из каналов обслуживания. Если заявка не поступила, то проверяется поступление заявки с соответствующей «орбиты» с вероятностью  $\sigma n_{p,q}(t) \Delta t$ , а счетчик заявок на «орбите» уменьшается на единицу. Если заявки нет, то канал обслуживает предшествующую заявку или простаивает свободным. Если обслуживающий диспетчер занят, то заявка отправляется на «орбиту», и соответствующий счетчик заявок на «орбите» увеличивается на единицу. При обслуживании заявки она может быть с некоторой вероятностью выполнена или передана в другой канал. Соответствующие переходы являются независимыми и конкурирующими, а их реализация выбирается в соответствии с вероятностями  $\mu_{p,q} \Delta t$  и  $\nu_{p,q} \Delta t$ . Обслуживание или «уход» заявки приводит к очистке канала с переходом его состояния в свободное. Заявки с «орбит» уходят с вероятностями  $\alpha n_{p,q}(t) \Delta t$ , в соответствии с которыми уменьшается их число на «орбитах». На интервале обслуживания во время перерывов диспетчера-человека система становится одноканальной с сохранением процедур расчета. Контроль за результатами обслуживания осуществляется по выходу каждого канала. Для получения статистической достоверности результатов вся процедура повторяется многократно до достижения требуемой точности путем расчета среднеквадратичной погрешности средних значений на ансамбле реализаций.

Описанный алгоритм представлен ниже в виде программы на псевдокоде.

Листинг псевдокода программы моделирования двухканальной СМО

### Input

количество эпох моделирования NN;  
 список nT контрольных точек работ T(i), i=1,2,...,nT;  
 интенсивность входного потока lambda;  
 параметр распределения заявок по каналам h;  
 скорости обслуживания в каналах muP, muQ;  
 скорости передачи заявок в другой канал nuP, nuQ;  
 скорость повторных звонков sigma;  
 скорость ухода заявки с орбиты alpha;

```

шаг продвижения по времени dt;
число эпох моделирования NN;
продолжительность обслуживания tmax;
begin program
for kk=1:NN do #набор статистики по эпохам#
начало обслуживания t=0;
счетчик заявок по эпохам nlambda(kk)=0;
счетчик обслуженных заявок по эпохам nmu(kk)=0;
счетчики состояний каналов kP=0, kQ=0;
счетчики заявок на орбитах nP=0, nQ=0;
for k=1:nT-1 do
вычислить временной интервал и число шагов по времени N;
for m=1:N do
вычисление числа поступивших заявок nlambda(kk);
if k нечетное
обслуживание по двум каналам;
вычисление новых значений nmu(kk);
else
обслуживание ботом;
вычисление новых значений nmu(kk);
end
end
end
end
расчет пропускной способности beta=sum(nmu)/sum(nlambda);
расчет относительной погрешности s;
Output
вывод доли обслуженных заявок beta;
вывод относительной погрешности s;
end program

```

Для проведения компьютерного моделирования необходимы реальные данные по СМО [24]. В качестве примера был рассмотрен кол-центр диспетчерской службы УК «СтройТехника» г. Воронежа, работающей на рынке управления жильем с 2007 г. [25]. УК обслуживает 195 зданий в различных районах города. Данные о компании представлены на ее сайте (<https://xn----8sbomdeewgkmdg3b.xn--p1ai/index.php>). В квартирах находятся приборы и устройства, поломки которых приводят к обращениям в диспетчерскую УК. На основании данных сайта УК «СтройТехника» рассчитан среднесуточный объем заявок. При расчете общего потока заявок учтены средние сроки эксплуатации устройств. Для счетчика воды характерный период составляет 12 лет, шаровых кранов – 25 лет, смесителя – 15 лет, арматуры сливного бачка – 5 лет, батареи водяного отопления – 25 лет, электросчетчика – 30 лет. В течение восьмичасового рабочего дня рассчитанное поступление заявок происходит со средней скоростью 1/4 заявки/мин. За сутки средний объем заявок равен 117. Учтено увеличение заявок в начальный период эксплуатации из-за повышенного числа отказов.

С помощью анализа данных социальных сетей проведена оценка среднего времени до повторного звонка в 12 мин ( $\sigma = 5$  заявок/ч) и среднего времени повторов в 40 мин ( $\alpha = 1,5$  заявок/ч). При расчете типичного режима функционирования двухканальной системы обслуживания с обменом запросами было принято, что поток заявок на входе разделяется на два равных, так что  $\lambda_Q = \lambda_P = \lambda / 2$ . В соответствии со сделанными на основе данных УК расчетами, общий поток составляет  $\lambda = 14,6$  заявок/ч. Пропускная способность одного канала с учетом стандартного среднего времени обслуживания для приема заказа и его обработки с диспетчером-человеком составляет 8 мин, а для диспетчера-робота 4 мин. Поэтому параметры скоростей обслуживания равны  $\mu_P = 7,5$  заявок/ч и  $\mu_Q = 15$  заявок/ч.

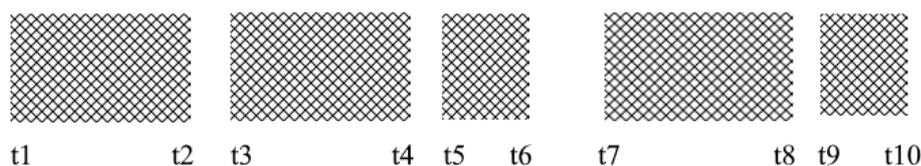


Рис. 2. Диаграмма времени работы диспетчера-человека

В течение восьмичасовой смены диспетчера-человека с 8 до 17 ч имеется несколько интервалов обслуживания и перерыв на обед с 13 до 14 ч. Есть также перерывы по 15 мин с 10:00 и 12:00 до обеда и с 16:00 после обеда. Таким образом, имеется три перерыва по 15 мин и один часовой перерыв, которые можно описать, введя массив отсчетов времени  $T = (t_1, t_2, \dots, t_{10})$ , где  $t_3 - t_2 = t_5 - t_4 = t_9 - t_8 = 15$  мин и  $t_7 - t_6 = 60$  мин. Диаграмма временных интервалов показана на рис. 2. Во время перерывов диспетчера-человека обслуживание полностью осуществляется голосовым ботом.

На рис. 3 показана зависимость пропускной способности СМО при  $\mu_Q = 15$  заявок/ч от коэффициента предпочтения (preference) клиентом голосового бота. Она демонстрирует монотонный рост производительности при смещении обслуживания в пользу бота.

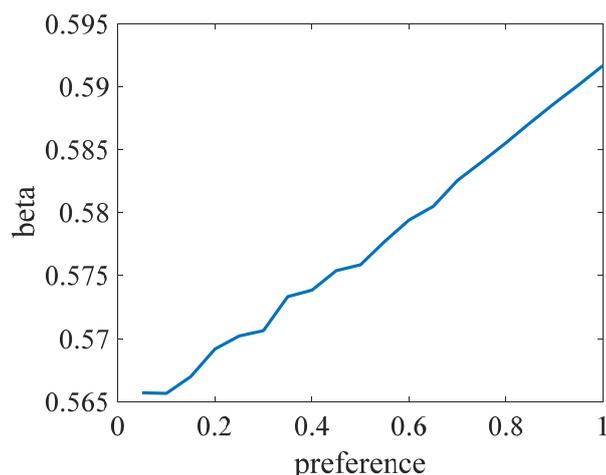


Рис. 3. Зависимость пропускной способности СМО от предпочтений пользователей при  $\mu_Q = 15$  заявок/ч

Расчеты для  $r = 0,15$  дают среднюю производительность 0,56 при относительной погрешности, связанной с дисперсией отдельных реализаций за время работы СМО, равной

0,07. Результат для стационарного решения дает значение  $\beta = 0,41$  [26], в то время как оценка стационарной пропускной способности системы без повторных обращений составляет 0,56 [25]. Результаты расчетов остаются стабильными при изменении числа эпох имитационного моделирования в диапазоне от 200 до 10 000. Это означает, что дисперсия величины производительности за время процесса связана с фундаментальными факторами флуктуаций в СМО на конечных интервалах времени и не является результатом погрешности самой процедуры имитационного моделирования, рассчитываемой по ансамблю реализаций средних значений. Последняя стремится к нулю с ростом числа эпох. Оценка флуктуаций только стационарного пуассоновского потока заявок дает относительную погрешность 0,089, которая сопоставима с результатами, полученными при моделировании всего нестационарного процесса, что подтверждает статистическую природу наблюдаемой дисперсии в СМО. При  $r = 0,85$  пропускная способность системы увеличивается незначительно до 0,58 ( $\beta = 0,55$  в стационарном режиме, стационарная оценка без повторных обращений – 0,60). С ростом пропускной способности до 150 заявок/ч пропускная способность увеличивается до 0,8103 (0,68 в стационарной модели и 0,77 в стационарной модели без повторных обращений) при снижении разброса результатов до 0,04. На рис. 4 показана зависимость пропускной способности СМО при  $\mu_0 = 150$  заявок/ч от коэффициента предпочтения клиентом голосового бота. Здесь наблюдается еще большее повышение общей производительности СМО при перераспределении заявок в пользу бота.

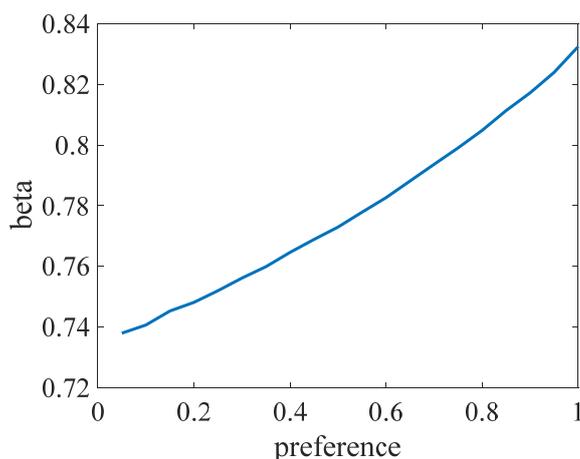


Рис. 4. Зависимость пропускной способности СМО от предпочтений пользователей при  $\mu_0 = 150$  заявок/ч

Обращает на себя внимание, что предельно упрощенная модель СМО без повторных обращений дает результаты ближе к более реалистичному нестационарному имитационному моделированию, по сравнению со стационарной моделью, учитывающей повторные звонки. Этот, на первый взгляд, парадоксальный результат объясняется в действительности отсутствием выхода рассматриваемого процесса СМО на стационарный режим и меньшим вкладом во входной поток заявок на орбитах, по сравнению со стационарной моделью.

## Заключение

Имитационное моделирование нестационарных процессов СМО показало, что пропускная способность гибридного кол-центра с учетом повторных звонков выше той, что рассчитывается в рамках стационарного подхода. Другим важным полученным результатом является

установление принципиальной неустранимости флуктуаций потоков в динамической СМО, приводящих к дисперсии средней пропускной способности. Эти флуктуации обусловлены статистической природой как входного потока заявок, так и самого процесса обслуживания. Тем самым известные критерии сходимости и точности алгоритмов теории СМО относятся к средним значениям по ансамблю эпох, но погрешность отдельных реализаций за время работы СМО является принципиально неустранимой и важной характеристикой поведения системы, которая отражает статистический характер происходящих в ней процессов.

Проведенное имитационное моделирование работы диспетчерской службы УК подтверждает перспективность применения интеллектуальных ботов при совершенствовании работы кол-центров. Необходимым условием для этого является не только повышение производительности и качества работы самих интеллектуальных голосовых ответчиков, но и изменение психологии клиентов с тем, чтобы их предпочтения смещались в сторону общения с ботами. Эта тенденция ведет в перспективе к замене диспетчера-человека автоматом. Обозначенная тенденция ставит вопрос о рациональном использовании высвобождающихся при этом трудовых ресурсов.

Время вычислений является критическим параметром имитационного моделирования, поэтому важным инструментом повышения его эффективности является использование параллельных вычислений [27]. С учетом этого перспективным является применение развитого в работе подхода к более сложным СМО, работающим в нестационарных режимах.

## Список литературы

1. Asdrubali, F. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings / F. Asdrubali, C. Baldassarri, V. Fthenakis // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 64. – P. 73–89. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.04.018
2. Drożyner, P. The Theory of Exploitation as a Support for Management Accounting in an Enterprise / P. Drożyner, S. Młynarski // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – P. 14305(14). DOI: 10.3390/su142114305
3. Ganter, M. Information management throughout the life cycle of buildings – Basics and new approaches such as blockchain / M. Ganter, T. Lützkendorf // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2019. – Vol. 323. – P. 012110(10). DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012110
4. Барабаш, М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства / М.С. Барабаш. – К.: Сталь, 2014. – 301 с.
5. Демин, А.В. Управленческие приемы повышения качества принятия решения собственниками многоквартирных домов о выборе управляющей организации / А.В. Демин, И.В. Рыбальченко, И.В. Милькина // *Вестник университета*. – 2020. – № 5. – С. 104–111.
6. Управление, эксплуатация и обслуживание многоквартирного дома / В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, С.В. Волкова, Е.Ю. Шумилова. – Минеральные воды: СКФ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – 616 с.
7. Tanizaki, T. Modeling and Analysis Method of Restaurant Service Process / T. Tanizaki, T. Shimmura // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 62. – P. 84–89. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.076
8. Cildoz, M. Accumulating priority queues versus pure priority queues for managing patients in emergency departments / M. Cildoz, A. Ibarra, F. Mallor // *Operations Research for Health Care*. – 2019. – Vol. 23. – P. 100224(19). DOI: 10.1016/j.orhc.2019.100224.
9. Ďutková S. Simulation of Queuing System of Post Office / S. Ďutková, K. Achimský, D. Hošťáková // *Transportation Research Procedia*. – 2019. – Vol. 40. – P. 1037–1044. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.145

10. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 392 с.
11. Вишневский, В.М. Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях / В.М. Вишневский, А.Н. Дудин, В.И. Клименок. – М.: Техносфера, 2018. – 562 с.
12. Artalejo, J.R. Retrial Queueing Systems: A Computational Approach / J.R. Artalejo, A. Gómez-Corral. – Berlin: Germany, Springer, 2008. – 318 p.
13. Гарайшина, И.Р. Методы исследования коррелированных потоков и специальных систем массового обслуживания / И.Р. Гарайшина, С.П. Моисеева, А.А. Назаров. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 204 с.
14. Данилюк, Е.Ю. Асимптотический анализ RQ-системы M/M/1 с конфликтами и нетерпеливыми заявками / Е.Ю. Данилюк, Е.А. Фёдорова, С.П. Моисеева // Автомат. и телемех. – 2018. – № 12. – С. 44–56.
15. Юданова, В.В. Имитационное моделирование систем массового обслуживания [Электронный ресурс] / В.В. Юданова // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2019. – № 4. DOI: 10.15862/23INOR419. – URL: <https://resources.today/PDF/23INOR419.pdf> (дата обращения: 17.12.2023).
16. Бобков, С.П. Имитационное моделирование системы массового обслуживания с целью анализа его работы / С.П. Бобков, И.А. Астраханцева, В.С. Волков // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – № 3 (67). – С. 58–62.
17. Siddiqui, S. Modelling and Simulation of Queuing Models through the concept of Petri Nets ADCAIJ [Электронный ресурс] / S. Siddiqui, M. Darbari, D. Yagyasen // Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal Regular Issue. – 2020. – Vol. 9. – No. 3. – P. 17–28. – URL: <https://revistas.usal.es/cinco/index.php/2255-2863/article/view/ADCAIJ2020931728> (дата обращения: 17.12.2023).
18. The Simulation of Finite-Source Retrial Queueing Systems with Collisions and Blocking / A. Tóth, T. Bérczes, J. Sztrik [et al.] // J. Math. Sci. – 2020. – Vol. 246. – P. 548–559. DOI: 10.1007/s10958-020-04759-4
19. Chen, E. A Procedure for Generating Batch-Means Confidence Intervals for Simulation: Checking Independence and Normality / E. Chen, D. Kelton // Simulation. – 1996. – Vol. 83. – P. 683–694. DOI: 10.1177/0037549707086039
20. Law, A.M. Simulation modeling and analysis / A.M. Law. – Arizona, USA, McGraw-Hill, Fifth edition. – 776 p.
21. Research on Simulation of Queuing System Based on OOP / S. Wei, C. Yong-Ke, Y. Ai-Jun, H. Wei, Z. Chao // 2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET), Beijing, China. – 2018. – P. 34–38. DOI: 10.1109/CCET.2018.8542439
22. Бункин, Н.Ф. Стохастические системы в физике и технике / Н.Ф. Бункин, А.Н. Морозов. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. – 366 с.
23. Ухтинский, П.В. Классификация перерывов в течение рабочего дня (смены) / П.В. Ухтинский // Вестник Пермского университета. – 2009. – Вып. 4(6). – С. 115–122.
24. Simulation of Queuing System for Customer Service Improvement: A Case Study / I.A. Hasugian [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 851. – P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/851/1/012030
25. Баркалов, С.А. Стационарное гибридное обслуживание с обменом заявками в жилищной управляющей компании / С.А. Баркалов, П.А. Головинский, Е.А. Серебрякова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 3(93). – С. 70–76.

26. Баркалов, С.А. Модель духканального колл-центра с обменом заявками и повторными звонками / С.А. Баркалов, Е.А. Серебрякова // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 4. – С. 136–145. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.4.09

27. Kiesling, T. Efficient Parallel Queuing System Simulation / T. Kiesling, T. Krieger // Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, CA, USA. – 2006. – P. 1020–1027. DOI: 0.1109/WSC.2006.323190

## References

1. Asdrubali F., Baldassarri C., Fthenakis V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 64, pp. 73-89. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.04.018

2. Drozyner P., Młynarski S. The Theory of Exploitation as a Support for Management Accounting in an Enterprise. *Sustainability*, 2022, vol. 14, pp. 14305(14). DOI: 10.3390/su142114305

3. Ganter M., Lützkendorf T. Information management throughout the life cycle of buildings – Basics and new approaches such as blockchain. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 323, pp. 012110(10). DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012110

4. Barabash M.S. Komp'yuternoe modelirovanie processov zhiznennogo cikla ob'ektov stroitel'stva [Computer modeling of life cycle processes of construction projects]. K., Steel, 2014, 301 p.

5. Demin A.V., Rybal'chenko I.V., Mil'kina I.V. Upravlencheskie priemy povysheniya kachestva prinyatiya resheniya sobstvennikami mnogokvartirnyh domov o vybore upravlyayushchej organizacii [Management techniques for improving the quality of decision-making by owners of apartment buildings on choosing a management organization]. *University Bulletin*, 2020, no. 5, pp. 104–111.

6. Kurbatov V.L., Rimshin V.I., Volkova S.V., Shumilova E.Yu. Upravlenie, ekspluatatsiya i obsluzhivanie mnogokvartirnogo doma [Management, operation and maintenance of an apartment building]. Mineral waters, SKF BSTU named after. V.G. Shukhova, 2022, 616p.

7. Tanizaki T., Shimmura T. Modeling and Analysis Method of Restaurant Service Process. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 62, pp. 84–89. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.076.

8. Cildoz M., Ibarra A., Mallor F. Accumulating priority queues versus pure priority queues for managing patients in emergency departments. *Operations Research for Health Care*, 2019, vol. 23, pp. 100224(19). DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.076.

9. Ďutková S., Achimský K., Hošťáková D. Simulation of Queuing System of Post Office. *Transportation Research Procedia*, 2019, vol. 40, pp. 1037–1044. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.145

10. Stepanov S. N. Osnovy teletrafika mul'tiservisnykh setei [Basics of teletraffic in multi-service networks]. Moscow, Eco-Trends, 2010, 392 p.

11. Vishnyevskiy V.M., Doodin A.N., Klimyenok V.I. Stokhasticheskiye sistemy s korrelirovannymi potokami. Tyeoriya i primenyeniye v tyelyekommoonikatsionnih syetyah. [Stochastic systems with correlated flows. Theory and application in telecommunication networks]. Moscow, Tekhnosphere, 2018, 562 p.

12. Artalejo J. R. and Gómez-Corral A. Retrial Queueing Systems: A Computational Approach. Berlin, Germany, Springer, 2008, 318 p.

13. Garayshina I. R., Moisyeyeva S. P., Nazarov A. A. Metodi isslyedovaniya korrelirovannih potokov i spyetsial'nih sistyem massovogo obsloozhivaniya [Methods for studying correlated flows and special queueing systems]. Tomsk, NTL Publishing House, 2010, 204 p.

14. Danilyook Ye.Yo., Fyodorova Ye.A., Moisyeyeva S. P. Asimptoticheskiy analiz RQ-sistyemi M/M/1 s konfliktami i nyetyerpyelivimi zayavkami [Asymptotic analysis of the M/M/1

RQ system with conflicts and impatient requests]. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79(12), pp. 2136–2146.

15. Yudanova V.V. (2019). Imitating modeling of mass service systems. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online] 4(6). Available at: <https://resources.today/PDF/23INOR419.pdf> (in Russian). DOI:10.15862/23INOR419

16. Bobkov S.P., Astrahanceva I.A., Volkov V.S. Imitacionnoe modelirovanie si-stemy massovogo obsluzhivaniya s cel'yu analiza ego raboty [Simulation modeling of a queuing system to analyze its operation]. *Modern high technology. Regional application*, 2021, no. 3 (67), pp. 58–62.

17. Siddiqui S., Darbari M., Yagyasen D. Modelling and Simulation of Queuing Models through the concept of Petri Nets ADCAIJ. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal Regular Issue*, 2020, vol. 9, no. 3, pp.17–28. <https://revistas.usal.es/cinco/index.php/2255-2863/article/view/ADCAIJ2020931728>

18. Tóth A., Bérczes T., Sztrik J. *et al.* The Simulation of Finite-Source Retrial Queuing Systems with Collisions and Blocking. *J. Math. Sci.*, 2020, vol. 246, pp. 548–559. DOI: 10.1007/s10958-020-04759-4

19. Chen E., Kelton D. A Procedure for Generating Batch-Means Confidence Intervals for Simulation: Checking Independence and Normality. *Simulation*, 1996, vol. 83, pp. 683–694. DOI: 10.1177/0037549707086039

20. Law, Averill M. Simulation modeling and analysis. Arizona, USA, McGraw-Hill, Fifth edition, 2013, 776 p.

21. Wei S., Yong-Ke C., Ai-Jun Y., Wei H., Chao Z. Research on Simulation of Queuing System Based on OOP. *2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET), Beijing, China*, 2018, pp. 34–38. DOI: 10.1109/CCET.2018.8542439.

22. Bunkin N.F., Morozov A.N. Stokhasticheskie sistemy v fizike i tekhnike [Stochastic Systems in Physics and Technology]. Moscow, MGTU, 2011, 366 p.

23. Uhtinskij P.V. Klassifikaciya pereryvov v techenie rabocheho dnya (smeny) [Classification of breaks during the working day (shift)]. *Bulletin of the Perm University*, 2009, issue. 4(6), pp. 115–122.

24. Hasugian I.A. *et al.* Simulation of Queuing System for Customer Service Improvement: A Case Study. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 851, pp. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/851/1/012030

25. Barkalov S.A., Golovinskij P.A., Serebryakova E.A. Stacionarnoe gibridnoe obsluzhivanie s obmenom zayavkami v zhilishchnoj upravlyayushchej kompanii [Stationary hybrid service with exchange of applications in a housing management company]. *Control systems and information technologies*, 2023, no. 3(93), pp. 70–76.

26. Barkalov S.A., Serebryakova E.A. Model' duhkanal'nogo koll-centra s obmenom zayavkami i povtornymi zvonkami [Model of a dual-channel call center with exchange of requests and retry calls.] *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2023, no. 4, pp. 136–145. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.4.09

27. Kiesling T., Krieger T. Efficient Parallel Queuing System Simulation. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, CA, USA*, 2006, pp. 1020–1027. DOI: 10.1109/WSC.2006.323190