

Модель оптимального управления стоматологической компанией

Т.А. Гробер, И.А. Дегтярёв

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Построена модель стоматологической компании, как имитационная модель (модель входа), обеспечивающая целенаправленную вариацию входных параметров на языке программирования GPSS World, и модель линейного программирования (модель выхода), проводящая обработку результатов вычислений и предоставляющая данные о степени чувствительности модели к изменению её параметров. Для исследования этого вопроса использовались численные методы Монте-Карло. Разработано пользовательское приложение на языке объектно-ориентированного программирования VBA, позволяющее определить, начиная с какого количества отказов, следует нанять дополнительного врача, так, чтобы прибыль компании была максимальной.

Ключевые слова: имитационная модель, системы массового обслуживания, GPSS World, модель линейного программирования, численные методы Монте-Карло, VBA.

Исследование сложных систем предполагает построение абстрактных математических моделей, представленных в терминах определённой математической теории, позволяющей получить функциональные зависимости характеристик исследуемой системы от параметров.

Моделирование в логистике [1 – 3] и производственных системах [4, 5] является очень востребованным, поскольку оно позволяет воспроизводить процессы для изучения их поведения, анализа влияния возможных изменений или сравнения различных вариантов проектирования без высокой стоимости масштабных экспериментов.

В научной литературе подобные исследования проводятся с середины 80-х годов 20-го века [6]. Последние работы по систематизации имеющихся знаний приведены в [7 – 9].

Моделирование дискретных событий [10 – 12], агентное моделирование [13] и системная динамика [14, 15] являются основными и наиболее важными

методами имитационного моделирования. Исследователь сам должен решить, какая методика подходит лучше для изучения конкретной системы.

Изучение процессов, протекающих в дискретных системах со стохастическим характером функционирования, проводится в рамках теории массового обслуживания. Многие модели реальных систем строятся на основе моделей массового обслуживания.

Построение и исследование имитационной модели стоматологической компании

Модель входа. При построении модели стоматологической компании мы исходили из следующих предположений: вначале пациент приходит в регистратуру (там возможна очередь) для записи к врачу (или звонит по телефону в регистратуру), затем он поступает на лечение к первому освободившемуся врачу (старались сделать так, чтобы очередь не превышала двух человек). Это возможно благодаря тому, что, как правило, врачи компании обслуживают все поступающие классы заявок.

При необходимости пациент (определённые классы заявок) после посещения врача, направляется к хирургу. Заметим, что к хирургу формируется своя очередь из пациентов, после чего они покидают компанию.

Фактически, мы получили многоканальную систему массового обслуживания (СМО) с неоднородным потоком заявок и накопителем ограниченной ёмкости. Модель управления стоматологической компании рассматривается нами как имитационная модель массового обслуживания.

Данная модель является стохастической, так как процессы поступления и обслуживания заявок носят случайный характер, то есть, интервалы времени между поступающими заявками и длительностью их обслуживания в приборах представляют с собой случайные величины, описываемые соответствующими законами распределения. Рассматриваемая модель представляет собой систему массового обслуживания с относительным

приоритетом обслуживания заявок. Это означает, что приоритеты учитываются только в моменты завершения обслуживания заявок при выборе новых заявок на обслуживание и не влияют на процесс обслуживания низкоприоритетной заявки в приборе, то есть, обрабатываемая заявка не прерывается при поступлении заявки высшего приоритета. К заявкам низшего приоритета относятся текущие обращения клиентов, а к заявкам высшего приоритета – обращения клиентов с острой болью.

Входной поток состоит из шести различных классов заявок. В работе строились гистограммы распределения относительных частот, и выдвигались гипотезы о виде распределений случайных величин. Так как приём, в основном, ведётся по предварительной записи, то первые три класса заявок распределены по равномерному закону. Четвёртый, пятый и шестой классы представляет собой заявки повышенного приоритета (приход пациента с острой болью) и распределены по экспоненциальному закону. Считаем, что обслуживание заявок происходит согласно равномерному закону распределения.

При изучении функционирования стоматологии рассматривались статистические данные реально существующих организаций. На основе этих данных задавались параметры модели.

Входными параметрами модели являются:

- количество накопителей и их емкость (формирование очереди);
- количество приборов (работающие врачи);
- входной поток заявок разных классов (текущее обращение и обращение с острой болью).

Характеристиками системы являются случайные величины, которые полностью описываются соответствующими законами распределений. Например, среднее время ожидания заявок в очереди, среднее время

пребывания заявок в системе, и т.п., а также интенсивность потока потерянных заявок.

Целью исследования данной модели является подбор таких значений параметров, чтобы система была эффективной. Для этого необходимо, чтобы загруженность приборов (врачей) была максимальной, а число потерянных заявок сводилось к минимуму. Кроме того, длина очереди не должна превосходить двух заявок (двух человек) одновременно к каждому прибору (врачу).

В данной работе была разработана имитационная модель управления стоматологической клиники с помощью универсальной среды моделирования GPSS World.

Исследуя модель работы стоматологической клиники, в программе варьировали значения входных параметров. Прежде всего, изменялось количество работающих приборов (2 или 3 врача). Кроме того, исследовалась поведенческая модель в зависимости от интенсивности потока входных заявок в спальном районе и в центре города (в спальном районе интенсивность будет меньше, чем в центре города), в результате чего получили по две модели для каждого района.

Модель 1. Рассмотрим следующие параметры модели. Спальный район.

- количество обслуживающих приборов = 2;
 - ёмкость накопителя ограничена = 2;
 - количество потоков (классов) заявок = 6;
 - закон распределения интервалов между заявками пациентов с кариесом (1-ый класс) - равномерный со средним значением интервалов между заявками 60 ± 10 минут, среднее время обслуживания заявки 30 ± 5 минут;
-

- закон распределения интервалов между заявками пациентов с удалением зуба, лечением зуба и установлением пломбы - (2-ый класс) - равномерный со средним значением интервалов между заявками 70 ± 10 минут, среднее время обслуживания заявки 30 ± 5 минут у стоматолога и 60 ± 5 минут у хирурга;
 - закон распределения интервалов между заявками пациентов с кариесом, депульпированием зуба и установлением пломбы (3-ый класс) - равномерный со средним значением интервалов между заявками 100 ± 10 минут, среднее время обслуживания заявки 30 ± 5 минут;
 - закон распределения интервалов между заявками пациентов с острой болью (оперативное вмешательство) (4-ый класс) - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 160 минут, среднее время обслуживания заявки 60 ± 5 минут;
 - закон распределения интервалов между заявками пациентов с острой болью и лечением зуба (5-ый класс) - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 170 минут, среднее время обслуживания заявки 60 ± 10 минут;
 - закон распределения интервалов между заявками пациентов с острой болью и удалением зуба (6-ый класс) - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 120 минут, среднее время обслуживания заявки 60 ± 10 минут;
 - длительность обслуживания заявок в регистратуре 1-го, 2-го и 3-го класса – равномерная со средним значением 6 ± 2 минуты;
 - длительность обслуживания заявок в регистратуре 4-го, 5-го, 6-го класса – равномерная со средним значением 3 ± 1 минуты;
-

- дисциплина обслуживания – приоритетная (1-ый, 2-ой и 3-ий класс – низший приоритет; 4-ый, 5-ый, 6-ый класс – высший приоритет).

Модель 2. Параметры модели такие, как в модели 1, кроме тех, что отвечают за интенсивность входящего потока заявок. Центр города.

- закон распределения интервалов между заявками пациентов с кариесом (1-ый класс) - равномерный со средним значением интервалов между заявками 60 ± 10 минут;
- закон распределения интервалов между заявками 2-го класса - равномерный со средним значением интервалов между заявками 40 ± 10 минут;
- закон распределения интервалов между заявками 3-го класса - равномерный со средним значением интервалов между заявками 80 ± 10 минут;
- закон распределения интервалов между заявками 4-го класса - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 60 минут.
- закон распределения интервалов между заявками 5-го класса - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 90 минут;
- закон распределения интервалов между заявками 6-го класса - экспоненциальный со средним значением интервалов между заявками 60 минут;

Модель 3. Параметры модели такие, как в модели 1, кроме количества обслуживающих приборов = 3. Спальный район.

Модель 4. Параметры модели такие, как в модели 2, кроме количества обслуживающих приборов = 3. Центр города.

Требуется определить, какая из моделей (с 2 или 3 врачами + хирург) будет более эффективной в зависимости от расположения.

Проверка критерия эффективности модели для спального района и центра города

В данной работе была создана программа, имитирующая функционирование стоматологической клиники на языке программирования GPSS World

Прежде всего, следует заметить, что все исследования проводятся из расчёта одного 10-ти часового рабочего дня. Итак, сравниваем модели 1 и 3, построенные для спального района. График поступлений заявок в систему для случая двух и трёх врачей-стоматологов приведён на рис. 1 и рис. 2 (по нижней оси расположены временные интервалы поступления заявок в систему, а по верхней – количество заявок).

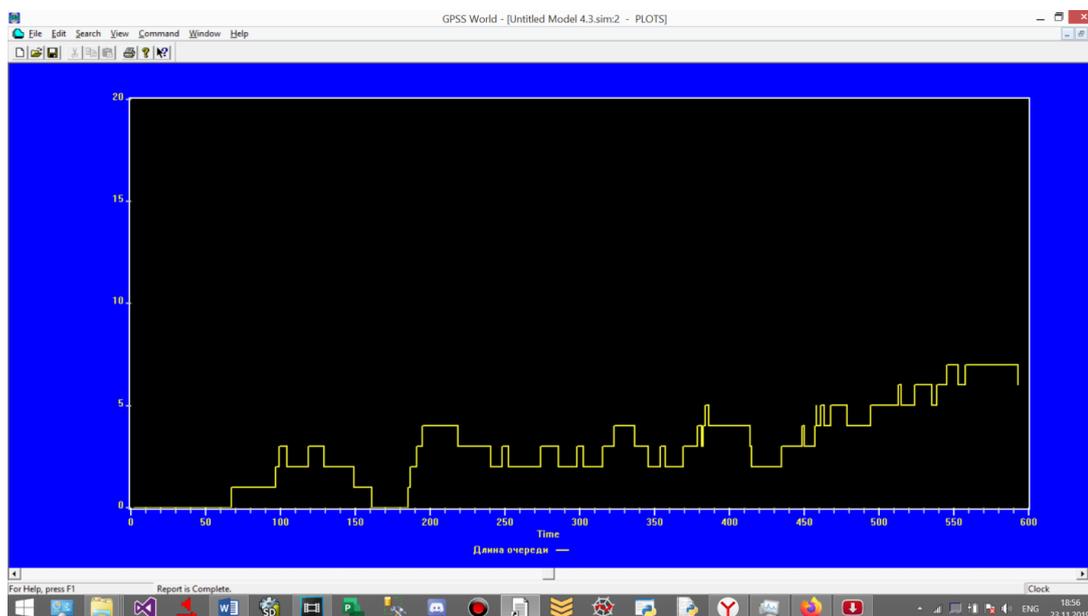


Рис. 1. График обращений клиентов в стоматологию (2 врача).

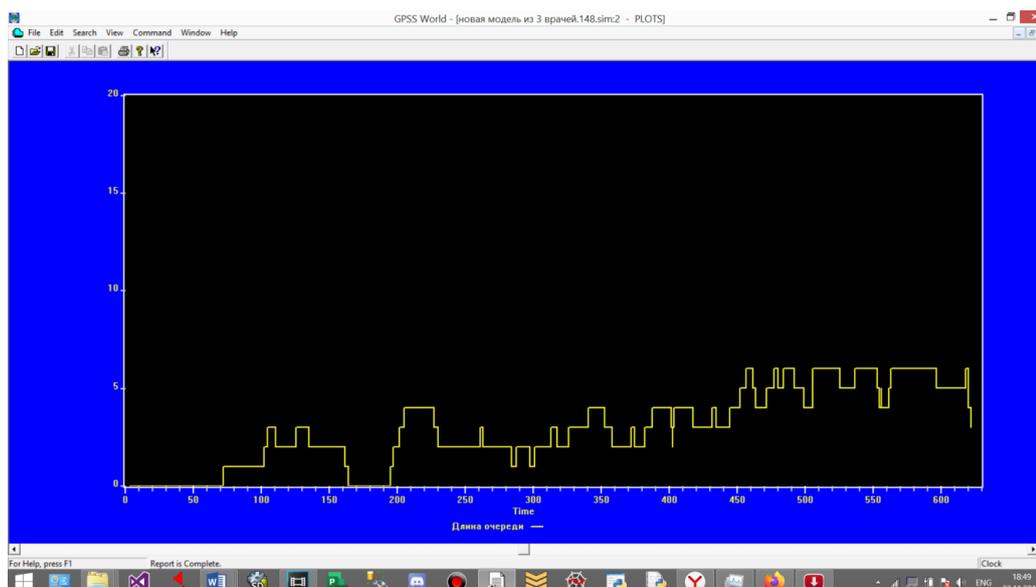


Рис. 2. График обращений клиентов стоматологии (3 врача).

Кроме того, в результате компьютерного моделирования получены данные, приведённые на рис. 3.

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
REGI	29	0.267	5.534	1	33	0	0	0	1
DOCTOR_1	13	0.748	34.532	1	34	0	0	0	0
DOCTOR_2	15	0.750	29.992	1	0	0	0	0	0
KNIRURG	8	0.780	58.473	1	30	0	0	1	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
LECHENIE	8	5	30	0	3.783	75.663	75.663	0
OCHERED	4	0	22	13	0.557	15.191	37.133	0
REGISTER	1	1	30	24	0.032	0.644	3.220	0

Рис. 3. Статистика модели 1 (2 врача спальный район).

Ниже в таблице № 1 поясним статистические данные, полученные в результате моделирования.

Таблица № 1.

Статистические данные модели 1.

Данные о входном потоке, чел.		Загруженность приборов, %	Среднее время обслуживания, мин.
Регистратура	29	26,7	5,5
1-й врач	13	74,8	34,5
2-й врач	15	75,0	29,9

Хирург	8	78	58,5
Не обслужены	1	-	-

Кроме этого, среднее время нахождения пациента в клинике составляет 75 минут.

При добавлении ещё одного врача время пребывания клиентов в стоматологии практически не изменилось, а вот загруженность врачей значительно уменьшилась: 1-й врач – 63%, 2-й врач – 56%, 3-й врач – 63%, загруженность хирурга осталась прежней.

Отметим, что загруженность врачей в модели 1, естественно, выше, чем в модели 3. Несмотря на то, что в третьей модели нет отказов в обслуживании стоматологами, есть заявки, ожидающие обслуживания у хирурга. Так что, согласно критерию эффективности, в спальном районе следует отдать предпочтение модели 1.

Теперь сравниваем модели 2 и 4, построенные для центра города.



Рис 4. График обращений клиентов в стоматологию (2 врача).



Рис 5. График обращений клиентов в стоматологию (3 врача).

Сравнивая графики на рис. 4 и рис. 5, замечаем, что модель 2 не справляется с потоком входящих заявок, СМО работает в режиме перегрузки и явно не подходит для центра города.

После анализа гистограмм плотностей распределения обслуживания заявок, отметим, что загруженность врачей в моделях 2 и 4 заметно отличается. Кроме этого, в модели 2 при поступлении 61 заявки на входе, среднее время нахождения пациента в клинике составляет 114 минут, а число отказов равно 32.

В результате компьютерного моделирования получены данные для модели 4, приведённые на рис. 6.

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
REGI	61	0.501	4.926	1	66	0	0	0	2
DOCTOR_1	18	0.909	30.308	1	62	0	0	5	0
DOCTOR_2	22	0.869	23.704	1	50	0	0	5	0
DOCTOR_3	15	0.834	33.341	1	59	0	0	0	0
KHIRURG	17	0.725	25.595	1	52	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
LECHENIE	12	12	63	0	7.153	68.124	68.124	0
REGISTER	2	2	63	38	0.134	1.276	3.215	0

Рис. 6. Статистика модели 4 (3 врача центр города).

Ниже, в таблице № 2 поясним статистические данные, полученные в результате моделирования.

Таблица № 2.

Статистические данные модели 4.

Данные о входном потоке, чел.)		Загруженность приборов, %	Среднее время обслуживания, мин.
Регистратура	63	50	5
1-й врач	18	90	30
2-й врач	22	87	23
3-й врач	15	83	33
Хирург	77	73	26
Не обслужены	2	-	-

Среднее время нахождения пациента в клинике составляет 68 минут.

Модель 4 отличается от второй модели тем, что все врачи максимально загружены и при этом число не обслуженных заявок значительно меньше (2 вместо 32), среднее время нахождения пациента в стоматологии уменьшилось в 2 раза.

Так как зависимость числа отказов от интенсивности входного потока нелинейная, а некоторые классы заявок обслуживаются не только стоматологом, но и хирургом, то добиться выполнения критерия эффективности, изменяя только интенсивность входного потока невозможно.

Экспериментально было получено, что для того, чтобы данная система была эффективной, нужно не только варьировать интенсивность потока входных заявок, но и время обслуживания каждого класса заявок.

После анализа рассматриваемых моделей, делаем вывод о том, что согласно критерию эффективности, для спального района предпочтительна модель 1, а для центра города – модель 4.

Линейная оптимизационная модель функционирования стоматологической компании

Модель выхода. По результатам работы имитационной модели (возьмём, например, модель 1) располагаем статистическими данными о том, как связаны интенсивность входящего потока заявок и число не обслуженных заявок. Цель работы стоматологической компании – это, прежде всего, получение прибыли. Следующий этап нашей работы заключается в том, чтобы дать лицу, принимающему решение, рекомендации об оптимальном количестве сотрудников (связано с размером входного потока) для получения максимальной прибыли компании.

Прежде всего, создаём программу на языке объектно-ориентированного программирования Visual Basic for Application (VBA), проводящую обработку результатов вычислений имитационной модели (модели входа) и предоставляющую данные о степени чувствительности модели к изменению её параметров в течение одного рабочего дня, кроме этого рассчитывается прибыль компании. Для исследования этого вопроса применялись численные методы Монте-Карло.

Итак, прибыль компании за один рабочий день рассчитывается по формуле:

$$F = z - w - a - s,$$

где $z = \sum_{i=1}^6 r_i \cdot k_i \cdot t_i \cdot l$ - сумма обслуженных заявок всех классов, при этом t_i - коэффициент сложности заявок i -го класса, $i = \overline{1,6}$, $t_i \in \{2,3\}$, r_i - трудоёмкость заявок i -го класса, $i = \overline{1,6}$, $r_i \in \{1,2,3,4,5,6\}$, k_i - количество заявок i -го класса, $i = \overline{1,6}$, l – стоимость обслуживания базовой заявки.

Зарплата всех сотрудников стоматологической компании выражается:

$$w = 0,001 \cdot z(p_1 + p_2) + 0,002 \cdot h(r_2 \cdot k_2 \cdot t_2 \cdot l + r_4 \cdot k_4 \cdot t_4 \cdot l) + c + 2 \cdot m,$$

где c и m – зарплата регистратора и медсестры соответственно, a – аренда помещения, p_1 – базовая ставка 1-го врача, p_2 – базовая ставка 2-го врача, h – базовая ставка хирурга, s – стоимость расходных материалов. $k_i \leq 10, i = \overline{1,6}$.

На переменные накладываются следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} l \leq 1500 \\ p_1 \leq 550 \\ p_2 \leq 450 \\ h \leq 550 \\ m \leq 350 \\ a \leq 3000 \\ s \leq 17000 \\ k_i \leq 10, i = \overline{1,6}. \end{array} \right.$$

Заметим, что при варьировании интенсивности потока заявок, естественно, будет изменяться количество не обслуженных заявок (отказов).

Введём в рассмотрение величину предполагаемой потерянной прибыли (стоимость не обслуженных заявок), влияющую на принятие решения о приёме на работу ещё одного врача.

Предполагаемая потерянная выгода компании за день рассчитывается по формуле:

$$g = (r_1 \cdot k_1 \cdot t_1 \cdot o_1 + r_2 \cdot k_2 \cdot t_2 \cdot o_2 + r_3 \cdot k_3 \cdot t_3 \cdot o_3) \cdot l - (0,001 \cdot z + p_1 + 0,3 \cdot a + m + 0,167 \cdot s),$$

где o_i – число отказов заявок i -го класса, $i = \overline{1,3}$.

$0,001 \cdot z + p_1 + 0,3 \cdot a + m + 0,167 \cdot s$ – затраты, связанные с работой дополнительно нанятого врача.

Дело в том, что приоритетные заявки не отклоняются, поэтому в формуле рассматриваются отказы заявок первых трёх классов.

На рис. 7 приведён пример работы программы. Заметим, что при шести отказах не нужен ещё 1 врач, а при семи – уже нужен.

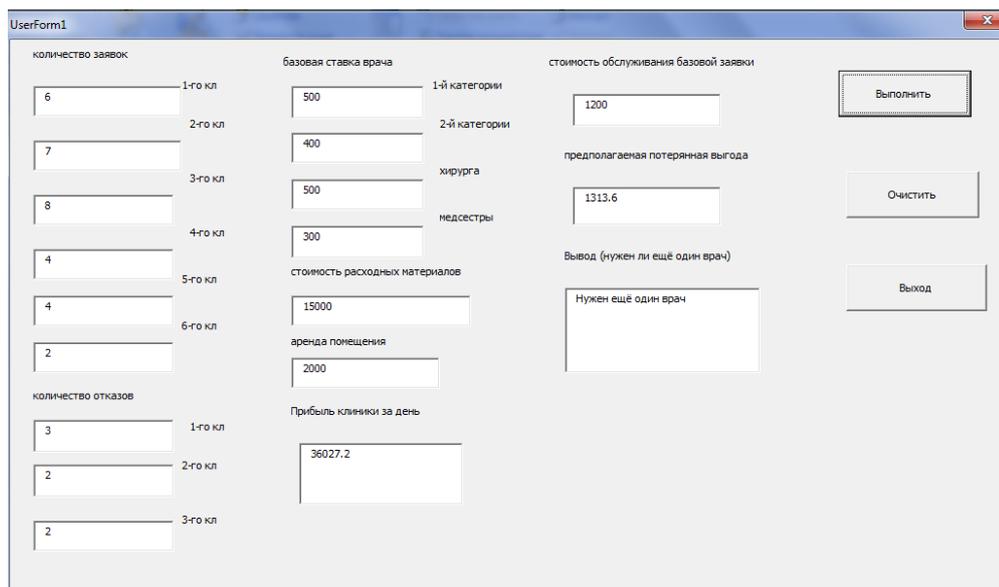


Рис. 7. Изменение рекомендаций пользовательского приложения в случае 7 отказов.

Для исследования вопроса, при каком количестве отказов выгоднее нанять ещё одного врача, нужно исследовать поведение системы в течение какого-то периода, например, недели или месяца. Далее, если величина предполагаемой потерянной прибыли для большинства наблюдений (более 70%) неотрицательна, то программа предлагает нанять ещё одного врача.

Таким образом, мы решаем оптимизационную задачу (1), (2), в которой целевая функция прибыли компании за весь период представляет собой:

$$\sum_{j=1}^n F_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

где j – это количество периодов наблюдений.

$$\left\{ \begin{array}{l} l_j \leq 1500 \\ p_{1j} \leq 550 \\ p_{2j} \leq 450 \\ h_j \leq 550 \\ m_j \leq 350 \\ a_j \leq 3000 \\ s_j \leq 17000 \\ k_i \leq 10, i = \overline{1,6}. \end{array} \right. \quad (2)$$

После многочисленных прогонов модели можно сделать вывод, что начиная с 22,5% числа отказов уже нужно брать ещё одного врача, для того, чтобы прибыль компании была максимальной.

Следует заметить, что получены значения, довольно близкие к реальным данным.

Выводы.

В данной работе была построена и исследована модель управления стоматологической компании.

Идея исследования состояла в том, чтобы построить имитационную модель стоматологической компании, как модель входа, для того, чтобы выявить связь между интенсивностью потока входных параметров и числом отказов в обслуживании заявок. Рассматривается приход потока пациентов с различными классами заявок, распределение этих заявок по врачам, обслуживание заявок и подсчёт числа отказов в обслуживании. Затем, для определения прибыли компании строится модель линейного программирования – модель выхода. Исходя из характеристик модели, полученных из модели входа, формируется процесс функционирования компании в течение некоторого периода времени. Для реализации этого процесса было создано программное приложение, входными параметрами для которого являются: число заявок каждого класса, стоимость их обслуживания, число отказов по некоторым классам, арендная плата за

помещение, стоимость расходных материалов. На выходе же рассчитывается прибыль компании за определённый период, зарплата сотрудников с учётом их квалификации, а главное – величина предполагаемой потерянной прибыли (стоимость не обслуженных заявок - зарплата дополнительно нанятого врача), выдаётся рекомендация нанять дополнительного врача, или нет.

Создание и изучение подобных моделей является важным и полезным с экономической точки зрения, так как позволяет существенно упростить владельцу компании процесс принятия решений.

Практическая ценность предлагаемой модели заключается в ее гибкости, комплексном характере, системности при организации и технологической регламентации основных систем и бизнес-процессов компании.

Модель работы стоматологической компании имеет достаточную степень универсальности, так как может быть использована в любой отрасли сферы услуг.

Литература

1. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Basharina O., Simulation modeling in heterogeneous distributed computing environments to support decisions making in warehouse logistics // *Procedia Engineering*. 2017. № 201. pp. 524-533.
2. Slats P. A, Bholá B., Evers J. J., Dijkhuizen G. Logistic chain modelling // *European Journal of Operational Research*. 1995. № 87(116).pp. 1-20.
3. Kostrzewski M., Implementation of Distribution Model of an International Company with Use of Simulation Method // *Procedia Engineering*. 2017. № 192. pp. 445-450.



4. Strang K. D. Importance of verifying queue model assumptions before planning with simulation software // *European Journal of Operational Research*. 2012. № 218 (216). pp. 493-504.
 5. Fatemi Ghomi S. M. T., Ashjari B. A simulation model for multi-project resource allocation // *International Journal of Project Management*. 2002. № 20 (2). pp. 127-130.
 6. Abed S. Y., Barta T. A., McRoberts K. L. A quantitative comparison of three simulation languages: SLAM, GPSS/H, SIMSCRIPT // *Computers & Industrial Engineering*. 1985, № 9 (1). pp. 45-66.
 7. García-García J. A., Enríquez J. G., Ruiz M., Arévalo C., Jiménez-Ramírez A. Software Process Simulation Modeling: Systematic literature review // *Computer Standards & Interfaces*. 2020, № 70. Article 103425.
 8. Zeigler B. P., Muzy A. From Discrete Event Simulation to Discrete Event Specified Systems (DEVSS) // *IFAC-Papers On Line*. 2017, № 50 (1). pp. 3039-3044.
 9. Galvão Scheidegger A.P., Fernandes Pereira T., Moura de Oliveira M. L., Banerjee A., Barra Montevechi J. A. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature // *Computers & Industrial Engineering*. 2018. № 124. pp. 474-492.
 10. Ďutková S., Achimský K., Hošťáková D. Simulation of Queuing System of Post Office // *Transportation Research Procedia*. 2019. № 40. pp. 1037-1044.
 11. Tarshizi E., Sturgul J., Ibarra V., Taylor D. Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. № 25 (4). pp. 671-674.
 12. Гробер Т.А., Колотиенко М.А. Имитационное моделирование задачи о дуэли трёх лиц. // *Инженерный вестник Дона*, 2017, №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4640/
-



13. Liu Y., Wang W., Huang H.-Z., Li Y., Yang Y. A new simulation model for assessing aircraft emergency evacuation considering passenger physical characteristics // *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. № 121. pp. 187-197.
14. Xie Y., Chien C.-F., Tang R.-Z. A dynamic task assignment approach based on individual worklists for minimizing the cycle time of business processes // *Computers & Industrial Engineering*. 2016, № 99. pp. 401-414.
15. Гаврилова З.П. Имитационное моделирование системной динамики демографической ситуации на Юге России // *Инженерный вестник Дона*, 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/217/

References

1. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Basharina O. *Procedia Engineering*. 2017. № 201. pp. 524-533.
 2. Slats P. A., Bholá B., Evers J. M., Dijkhuizen G. *European Journal of Operational Research*. 1995. №87 (116). pp. 1-20.
 3. Kostrzewski M. *Procedia Engineering*. 2017. № 192. pp. 445-450.
 4. Strang K. D. *European Journal of Operational Research*. 2012, № 218(216). pp. 493-504.
 5. Fatemi Ghomi S. M. T., Ashjari B. *International Journal of Project Management*. 2002. № 20 (2). pp. 127-130.
 6. Abed S. Y., Barta T. A., McRoberts K. L. *Computers & Industrial Engineering*. 1985. № 9 (1). pp. 45-66.
 7. García-García J. A., Enríquez J. G., Ruiz M., Arévalo C., Jiménez-Ramírez A. *Computer Standards & Interfaces*. 2020. № 70. Article 103425.
 8. Zeigler B. P., Muzy A. *IFAC-Papers on Line*. 2017. № 50 (1). pp. 3039-3044.
 9. Galvão Scheidegger A.P., Fernandes Pereira T., Moura de Oliveira M. L., Banerjee A., Barra Montevechi J. A. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. № 124. pp. 474-492.
-



10. Ďutková S., Achimský K., Hošťáková D. Transportation Research Procedia. 2019. № 40. pp. 1037-1044.
11. Tarshizi E., Sturgul J., Ibarra V., Taylor D. International Journal of Mining Science and Technology. 2015. № 25 (4). pp. 671-674.
12. Grober T.A., Kolotienko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4640/
13. Liu Y., Wang W., Huang H.-Z., Li Y., Yang Y. Reliability Engineering & System Safety. 2014. № 121. pp. 187-197.
14. Xie Y., Chien C.-F., Tang R.-Z. Computers & Industrial Engineering. 2016. № 99. pp. 401-414.
15. Gavrilova Z.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/217