

УДК 004.021004.021

ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ: ИНТЕГРАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Е.Е. Щербакова (Санкт-Петербург)

Введение

Современные транспортные узлы – аэропорты, железнодорожные вокзалы, морские и автомобильные терминалы – являются сложными организационно-техническими системами, обеспечивающими выполнение большого количества взаимосвязанных сервисных процессов. Рост объемов перевозок, интенсификация пассажирских и грузовых потоков, а также ужесточение требований к качеству обслуживания и безопасности обуславливают необходимость разработки эффективных методов анализа и управления такими системами.

Одной из ключевых проблем является высокая **структурная и динамическая сложность** сервисных процессов. С одной стороны, они включают множество стадий – от регистрации и досмотра до обслуживания и распределения ресурсов, с другой – характеризуются стохастическим поведением субъектов, изменчивостью условий и параллельным выполнением операций. Традиционные методы анализа, такие как системы массового обслуживания или классическое имитационное моделирование, оказываются недостаточными, так как не позволяют в полной мере учесть конкуренцию за ресурсы, вероятностный характер задержек, а также социально-психологические факторы, влияющие на эффективность работы персонала.

В этих условиях особую значимость приобретает использование **полимодельного подхода**, предполагающего интеграцию различных типов моделей – статических, описывающих структуру процессов и нормативные характеристики операций, и динамических, позволяющих исследовать развитие процессов во времени. Такой подход обеспечивает многогранное представление функционирования транспортного узла и создает основу для применения методов многокритериального анализа.

Ключевым инструментом динамического моделирования в данном исследовании выступают **сети Петри**, хорошо зарекомендовавшие себя при описании параллельных, асинхронных и стохастических процессов. Их использование позволяет отразить логику выполнения операций, наличие конфликтов за ресурсы, очередей и условий синхронизации. Дополнительные возможности открывает применение цветных и временных сетей Петри (Coloured Petri Nets, Timed Petri Nets), которые дают возможность учитывать разнородность субъектов и временные характеристики операций.

Практическая реализация моделей осуществлялась с использованием специализированной программной среды **CPN Tools**, предназначенной для разработки, визуализации и анализа сетей Петри. Данный инструмент обеспечивает не только построение и запуск имитационных моделей, но и проведение экспериментов, включая вариацию параметров потоков, анализ достижимости состояний и исследование производительности. Это позволяет выявлять узкие места в процессах обслуживания и прогнозировать последствия изменений в структуре ресурсов или интенсивности потоков.

Актуальность работы определяется необходимостью создания комплексных моделей транспортных узлов, способных объединять структурные и динамические аспекты сервисных процессов. Научная новизна заключается в разработке полимодельного описания сервисного обслуживания на основе интеграции статических

моделей и динамических сетей Петри, что обеспечивает проведение многокритериального анализа и поддержку принятия решений в задачах управления сервисными системами.

Методология

1. Концептуальная основа

Транспортный узел рассматривается как социо-киберфизическая система (СКФС), включающая пассажиров, персонал, технические средства и информационные подсистемы. Каждый субъект i характеризуется вектором параметров состояния:

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}, \quad (1.1)$$

где x_{ij} – значение j -го параметра (например, скорость перемещения, уровень усталости, компетентность).

Сервисные операции описываются триплетом:

$$O_k = \langle t_k, r_k, p_k \rangle, \quad (1.2)$$

где t_k – среднее время выполнения, r_k – требуемые ресурсы, p_k – вероятность успешного завершения.

Процесс обслуживания формализуется как ориентированный граф:

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (1.3)$$

где V – множество сервисных точек (регистрация, досмотр, посадка), E – множество переходов.

2. Статическое моделирование

Каждому субъекту i , проходящему через систему, сопоставляется маршрут R_i , включающий упорядоченную последовательность сервисных операций. Для каждой операции известна её нормативная продолжительность t_v , а также может быть рассчитано дополнительное время ожидания w_v , связанное с очередями и ограниченностью ресурсов. В результате в статической постановке суммарное время нахождения субъекта i в системе определяется как:

$$T_i = \sum_{v \in R_i} (t_v + w_v), \quad (1.4)$$

где R_i – маршрут субъекта, t_v – нормативное время операции, w_v – дополнительное время ожидания в очереди.

Статическая модель позволяет выявить длинные маршруты обслуживания, потенциальные перегрузки и рассчитать базовые показатели — от времени ожидания до необходимой численности персонала. Она служит фундаментом для динамического моделирования.

3. Динамическое моделирование

Если статическая модель фиксирует структуру процессов и их нормативные характеристики, то динамическое моделирование позволяет исследовать поведение системы во времени, учитывая стохастичность и изменчивость потоков.

Процессы сервисного обслуживания моделируются с помощью цветных сетей Петри (CPN) и их динамической интерпретации, что позволяет учитывать не только последовательность операций, но и параметры субъектов, ошибки, возвраты и психологические состояния.

Формально СП представляется следующей структурой:

$$PN = \langle P, T, F, W, M_0 \rangle, \quad (1.5)$$

где P – позиции, T – переходы, F – дуги, W – весовая функция, M_0 – начальная маркировка.

Состояние субъектов описывается расширенной маркировкой:

$$M(p) = \{n_p, q_p, ps_p\}, \quad (1.6)$$

где n_p – количество субъектов, q_p – квалификация, ps_p – психологическое состояние.

Динамика системы задаётся уравнением:

$$M(t+1) = M(t) + C \cdot U(t) + F(Q, PS, W, t), \quad (1.7)$$

где $M(t), M(t+1)$ – векторы состояния системы в текущий и следующий моменты времени;

C – матрица инцидентности сети Петри;

$U(t)$ – вектор активных переходов в текущий момент времени;

$F(Q, PS, W, t)$ – функция, описывающая динамическое изменение состояния субъектов во времени, зависящее от квалификации, психологического состояния и работоспособности.

Использование временных меток позволяет моделировать операции с распределениями длительности (нормальное, экспоненциальное, равномерное):

$$T \sim N(\mu, \sigma^2), T \sim U(a, b). \quad (1.8)$$

4. CPN Tools как инструмент моделирования

Использование CPN Tools позволило реализовать модели на основе цветных и временных сетей Петри. Это обеспечило:

- моделирование разнотипных субъектов (например, пассажиры разных классов обслуживания, сотрудники с различной квалификацией, оборудование различных типов);
- задание распределений времени операций (экспоненциальное, нормальное, равномерное);
- проведение имитационных экспериментов методом Монте-Карло;
- автоматический анализ достижимости состояний, загруженности ресурсов и вероятностей возникновения задержек.

5. Многокритериальный анализ

Каждая альтернатива A_m описывается вектором показателей качества обслуживания (ПКО):

$$F(A_m) = \{f_1(A_m), f_2(A_m), \dots, f_q(A_m)\}. \quad (1.9)$$

Для приведения разноразмерных ПКО к единому виду выполняется нормализация:

$$f_i^*(A_m) = \frac{f_i(A_m) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}. \quad (1.10)$$

Агрегированная оценка альтернативы:

$$Q(A_m) = \sum_{i=1}^q w_i f_i^*(A_m), \quad \sum w_i = 1. \quad (1.11)$$

Оптимизация проводится по правилу:

$$A^* = \arg \max Q(A_m). \quad (1.12)$$

Таблица 1. Пример системы ПКО для оценки вариантов сервисного обслуживания

№	Наименование показателей качества обслуживания	Тип показателей качества обслуживания	Направленность оптимизации
1	Среднее время обслуживания (T_{avg})	Временной	Минимизация
2	Уровень загрузки ресурсов (L)	Ресурсный	Минимизация
3	Количество ошибок персонала (E)	Качественный	Минимизация
4	Психологическое состояние ($M_{инд}$)	Социально-психологический	Максимизация
5	Устойчивость к сбоям	Надёжностный	Максимизация

Результаты

Разработанный полимодельный комплекс обеспечил целостное представление о сервисных процессах в транспортном узле, позволив объединить нормативные данные и динамическую изменчивость обслуживания. На статическом уровне были описаны структура операций, маршруты движения субъектов и распределение ресурсов. Это дало возможность рассчитать базовые показатели: суммарное время пребывания пассажиров в системе, загрузку оборудования и потребность в персонале.

Динамический уровень, реализованный с помощью временных и цветных сетей Петри, позволил учесть стохастическую природу процессов. Маркировка сети отражала текущее состояние субъектов и ресурсов, а переходы моделировали события обслуживания. Цветные фишки позволили разделять различные категории пассажиров, а временные метки задали случайные распределения длительности операций. Реализация в CPN Tools обеспечила проведение имитационных экспериментов с варьированием интенсивности потоков, числа ресурсов и параметров персонала.

Проведённые сценарные расчёты показали, что при росте пассажиропотока на 20% среднее время ожидания в зоне регистрации увеличивается на 35%, а вероятность превышения допустимого порога ожидания почти удваивается. Учет социально-психологических факторов выявил, что снижение устойчивости персонала на 10% приводит к росту ошибок на 15% и увеличению длительности операций на 7–10%. Сценарий отказа оборудования выявил рост времени ожидания более чем на 25% в часы пик, однако перераспределение нагрузки на другие сервисные точки позволило частично компенсировать негативный эффект.

Таким образом, полученные результаты подтвердили эффективность выбранного подхода для выявления критических зависимостей между потоками, ресурсами и качеством обслуживания, а также для анализа как штатных, так и нештатных ситуаций.

Обсуждение

Интеграция статических и динамических моделей продемонстрировала преимущества по сравнению с традиционными методами анализа. Сети Петри позволили учесть параллельность процессов, конфликты за ресурсы и очереди, а также описать индивидуальные маршруты субъектов и вероятностные задержки, чего невозможно достичь средствами классических систем массового обслуживания. По сравнению с дискретно-событийными моделями (Arena, AnyLogic) предложенный аппарат оказался более формально строгим и наглядным в описании логики процессов.

Использование среды CPN Tools существенно расширило возможности моделирования. Она обеспечила гибкость при настройке параметров, позволила проводить эксперименты методом Монте-Карло, анализировать достижимость

состояний и автоматически собирать статистику по загрузке ресурсов. Это сделало возможным исследование как штатных, так и критических сценариев функционирования транспортного узла.

Особое внимание заслуживает включение социально-психологических факторов, таких как усталость, стрессоустойчивость и коммуникации в рабочих группах. Результаты показали, что даже при достаточном количестве ресурсов снижение психологической устойчивости персонала приводит к росту числа ошибок и задержек. Такой эффект редко учитывается в исследованиях транспортных систем, но он подтверждает необходимость рассматривать сервисное обслуживание как социально-технический процесс, где человеческий фактор играет определяющую роль.

Многокритериальный анализ, объединяющий разнонаправленные показатели (время ожидания, затраты, загрузку персонала, удовлетворённость пассажиров), позволил сформировать множество Парето-оптимальных решений. Это дало руководителю возможность выбирать стратегию исходя из текущих приоритетов: минимизация времени, снижение затрат или повышение качества обслуживания.

Выводы

Предложенный полимодельный подход доказал свою эффективность как инструмент анализа, прогнозирования и оптимизации процессов сервисного обслуживания в транспортном узле. Он позволил объединить нормативные характеристики и стохастическую динамику процессов, а также учесть влияние социальных факторов, ранее игнорируемых в большинстве исследований.

Научная новизна работы заключается в интеграции статических моделей и динамических сетей Петри с процедурами многокритериального анализа, включая показатели психологической устойчивости персонала. Практическая значимость проявляется в возможности применения разработанного подхода для оптимизации работы аэропортов, вокзалов и логистических центров как на стратегическом, так и на оперативном уровне.

Дальнейшее развитие исследований связано с углублением детализации моделей, расширением набора критериев и интеграцией с системами мониторинга в реальном времени. Это позволит повысить адаптивность управления и устойчивость транспортных узлов к внешним воздействиям. В целом, предложенная методика обеспечивает комплексное понимание структуры, динамики и факторов эффективности сервисных процессов и может быть использована для повышения качества обслуживания и рационального использования ресурсов.

Литература

1. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL:<http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started>.
2. **Алибеков Б.И., Мамаев Э.А.** Дискретные матричные модели в управлении транспортными системами / Б. И. Алибеков, Э. А. Мамаев // Тр. всерос. науч. пр. конф. «Транспорт 2005» в 2 частях. Ч. 2. РГУПС, Ростов н/Д, 2005. С. 158-160.
3. **Андронов А.М.** Математические методы планирования и управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий гражданской авиации / А. М. Андронов, А. Н. Хижняк. – М.: Транспорт, 1977. – 215с.
4. **Ашфорд Н.** Проектирование аэропортов / Н. Ашфорд, П.Х. Райт // Пер. с англ. А.П. Степушин. М.: Транспорт, 1988. С. 328.
5. **Бай А. С.** Имитационная модель процесса наземного обслуживания воздушных судов в аэропорту / А. С. Бай, В. А. Романенко // Транспортный бизнес и логистика: актуальные аспекты развития : сборник тезисов II Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 15-17 февраля 2021 года. – Самара: Самарский

- НИУ им. академика С.П. Королева, 2021. С. 19-21.
6. **Баришполец В.А.** Алгоритмы анализа сетевой модели со стохастической структурой / В.А. Баришполец // Информационные технологии. – М.: РЭНсиТ. 2012. Т.4. № 2.
7. **Бодин О.Н.** Социо-киберфизические системы для мониторинга и управления объектами/ О.Н. Бодин, О.Е. Безбородова, В.М. Жигачев // Информатика, вычислительная техника и управление. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13. №4 (68). С. 20-29.
8. **Бурков В.Н.** Модели и методы управления организационными системами / В.Н. Бурков, В.А. Ириков // М.: Наука, 1994. С.270.
9. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. - М.: Наука, 1968. – 356с.
10. **Головченко Г.В., Костин А.А.** Статистический анализ показателей регулярности отправок воздушных судов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, 2016, № 4. (13). С.137-146.
11. **Захаров В.В., Щербакова Е.Е.** Модельно-алгоритмическое обеспечение для планирования функционирования социо-кибер-физических систем // Информатизация и связь. 2024. № 2. С. 81-85.
12. **Зигель А.** Модели группового поведения в системе человек/ А. Зигель, Дж. Вольф. – машина. М.: МИР, 1973.
13. **Иконникова А.В., Петрова И.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В.** Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 62-68.
14. **Майоров Н. Н.** Факторы выбора имитационного моделирования, как универсального средства, для исследования транспортных процессов / Н. Н. Майоров // Проблемы и перспективы экономики и управления: Материалы Международной научной конференции, СПб., 20-23 апреля 2012 года. – СПб.: Реноме, 2012. С. 224-228.
15. **Мараховский В.Б.** Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления / В. Б. Мараховский, Л. Я. Розенблюм, А. В. Яковлев – Санкт-Петербург: Профессиональная литература, 2014. 400 с.
16. **Питерсон Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем: [пер. с англ.] / Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. 264 с.
17. Окрестностное моделирование сетей Петри: монография / С.Л. Блюмин [и др.]. – Липецк: ЛЭГИ, 2010. – 124 с.
18. **Ольшанский А.М.** О постановке задачи управления пассажиропотоком на вокзале / А. М. Ольшанский // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Сборник трудов научнопрактической конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 г. – Москва: ФГАО ВО «Российский университет транспорта», 2022. С. 327-331.
19. **Потрясаев С. А.** Способ организации аналитико-имитационного моделирования АСУ сложными техническими объектами // Материалы конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). СПб, 2014. С. 226-231.
20. **Соколов Б.В., Щербакова Е.Е.** Аналитическое и имитационное моделирование в системе риск-ориентированного управления проектированием и использованием сложных организационно-технических объектов / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. С. 39-42.
21. **Тецлав И.А.** Методы и средства управления системой обслуживания пассажиров в аэропорту в условиях неопределенности : диссертация ... кандидата технических

- наук : 2.9.6. / Тецлав И.А.; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова» ; Диссовет Д 223.012.XX (42.2.002.01)]. Санкт-Петербург, 2023. 132 с.: ил.
22. **Щербакова Е.Е.** Агентно-ориентированный подход для описания функционирования сотрудников аэропорта // Информатизация и связь. 2024. № 5. С. 84-87.
23. **Щербакова Е.Е.** Моделирование группового поведения социализированных агентов в сложной системе с учетом психологических и производственных факторов // Технологические тренды и наукоемкая экономика: бизнес, отрасли, регионы: коллективная монография / Под. ред. проф. О.Н. Кораблевой и др. – Санкт-Петербург, 2022.