

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ БИЗНЕС-МОДЕЛЕЙ СЕРВИСОВ НА ОСНОВЕ БПЛА

Агамиров Владимир Леонович

МТУСИ, МАИ (НИУ) доцент, к.т.н., Москва, Россия
avhere@yandex.ru

Дыбалева Александра Петровна

МАИ (НИУ), студент/ассистент, Москва, Россия
gaeva.sashulya@mail.ru

Тугова Наталья Владимировна

МТУСИ, зав. кафедрой, к.т.н., Москва, Россия
n.v.tutova@mtuci.ru

Аннотация

В статье рассматривается применение сетей Петри для формального моделирования бизнес-процесса оказания услуг с использованием беспилотных летательных аппаратов. Процесс эксплуатации беспилотных летательных аппаратов представлен в виде дискретно-событийной модели, учитывающей последовательность операций, ресурсные ограничения и отклонения. Показано, что сети Петри позволяют анализировать достижение целевого состояния и выявлять логические причины срыва соглашений об уровне сервиса.

Ключевые слова

сети Петри, БПЛА, дискретно-событийные системы, отказоустойчивость, бизнес-процессы.

Введение

Развитие беспилотных летательных аппаратов привело к их широкому применению в виде сервисных решений, ориентированных на выполнение задач в заданные сроки и с определенным уровнем качества. В таких моделях БПЛА рассматривается не как отдельное техническое средство, а как элемент бизнес-процесса, результат которого фиксируется в соглашениях об уровне сервиса. Эксплуатация БПЛА сопровождается воздействием внешних условий, регуляторных ограничений, технических отказов и человеческого фактора, что приводит к отклонениям от планового хода выполнения работ. Традиционные методы анализа рисков, основанные на экспертных оценках, не позволяют формально описывать динамику процесса. В этой связи актуальным является применение формальных методов моделирования, способных описывать дискретные события и ресурсные ограничения. Одним из таких методов являются сети Петри, позволяющие представить бизнес-процесс в виде строгой модели для инженерного анализа и оценки рисков [1, 2].

Декомпозиция бизнес-процесса и границы модели

Рассматриваемый бизнес-процесс представляет собой сервисную модель оказания услуг с применением беспилотных летательных аппаратов, в которой результат определяется передачей заказчику обработанных данных в заданные сроки и с требуемым уровнем качества. Для формального описания процесс декомпозируется на конечное множество элементарных операций, каждая из которых соответствует устойчивому состоянию выполнения заказа или завершенному действию.

В ходе декомпозиции выделяются основные этапы: прием заявки, планирование миссии, проверка условий выполнения, предполетная подготовка, выполнение полета, обработка данных и передача результата. Каждый этап трактуется как логически завершенный фрагмент процесса, переход между этапами возможен только при выполнении условий завершения предыдущего. Это позволяет рассматривать процесс как дискретно-событийную систему.

Формально бизнес-процесс представляется в виде сети Петри:

$$PN = (P, T, F, M_0),$$

где P – множество позиций, соответствующих состояниям выполнения заказа,

T – множество переходов, описывающих операции и события,

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множество дуг,

M_0 – начальная разметка [2].

Позиции интерпретируются как состояния бизнес-процесса, а наличие маркера означает нахождение заказа в соответствующем состоянии. Переходы моделируют завершение операций и дискретные события, изменяющие состояние процесса. Для учета ограничений по человеческим и техническим ресурсам вводятся ресурсные позиции с ограниченным числом маркеров. Переходы, связанные с подготовкой и выполнением миссии, требуют наличия маркеров как в позициях заказа, так и в ресурсных позициях, что формализует конкуренцию за ресурсы и исключает некорректный параллелизм.

Рассматриваемый процесс оказания услуги (см. рис. 1) с использованием беспилотного летательного аппарата представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, направленных на получение и передачу заказчику требуемого результата в рамках заданных ограничений по срокам и качеству. Процесс начинается с этапа приёма заявки, на котором фиксируются параметры задания, требования заказчика и целевые показатели выполнения [3].

На этапе планирования миссии осуществляется формирование маршрута полёта, выбор параметров полезной нагрузки, определение временных окон выполнения и предварительная оценка возможности реализации задания. Далее выполняется проверка условий выполнения, включающая анализ метеорологических факторов, доступности воздушного пространства, наличия геозон и необходимых разрешений. Данный этап является критическим с точки зрения допустимости перехода к последующим операциям.

После подтверждения условий выполняется предполетная подготовка, включающая технический осмотр БПЛА, проверку аккумуляторов, калибровку бортовых систем и выполнение регламентных операций. Завершение подготовки позволяет перейти к этапу выполнения миссии, в рамках которого осуществляется полет и сбор целевых данных.

Полученные в ходе полета данные поступают на этап обработки, где выполняются операции фильтрации, структурирования и приведения данных к требуемому формату. Заключительным этапом процесса является передача обработанного результата заказчику и формальное закрытие сервисных обязательств.

Границы модели определяются моментом принятия заказа в работу и моментом передачи результата. Внешние информационные воздействия, такие как нормативные требования, эксплуатационные регламенты и индивидуальные условия заказчика, не моделируются как отдельные процессы, а учитываются в виде условий разрешимости переходов между этапами, определяющих допустимость и последовательность выполнения операций.

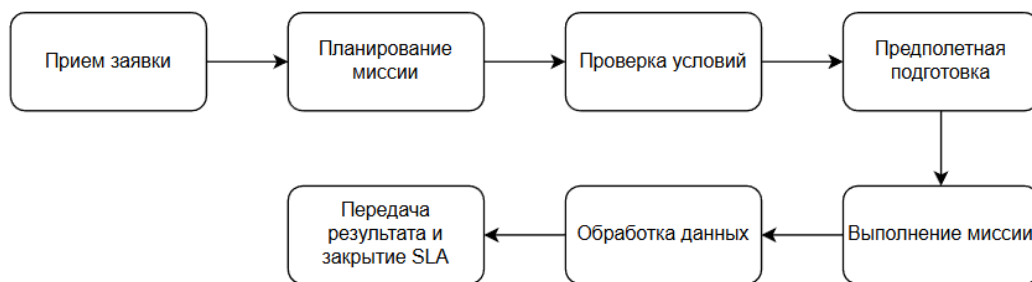


Рис. 1. Процесс оказания услуги с помощью БПЛА

Построение базовой модели и проверка свойств

На основе декомпозированного бизнес-процесса и заданных границ формируется базовая модель в виде классической сети Петри, описывающей нормативный сценарий эксплуатации БПЛА без учёта отказов и внешних возмущений. Целью построения базовой модели является проверка логической корректности структуры процесса до его расширения риск-сценариями.

Множество позиций сети соответствует устойчивым состояниям выполнения заказа, а множество переходов – завершению отдельных операций. Начальная разметка модели задается размещением одного маркера в позиции «Заказ принят», что отражает поступление одного экземпляра заказа в систему.

В ходе функционирования модели маркер последовательно перемещается между позициями в соответствии с логикой бизнес-процесса.

Для учета ограничений по человеческим ресурсам в модель вводится ресурсная позиция «Оператор доступен», содержащая ограниченное число маркеров. Переходы, связанные с предполетной подготовкой и запуском миссии, разрешены только при наличии маркеров как в позициях состояния заказа, так и в ресурсной позиции. После срабатывания переходов маркер ресурса возвращается в исходную позицию, что обеспечивает сохранение ресурсного инварианта [3, 4].

Проверка свойств базовой модели проводится методами анализа сетей Петри. Достижимость целевого состояния подтверждается существованием допустимой последовательности срабатываний переходов, переводящей систему из начальной разметки в разметку завершения заказа. Ограниченность модели обеспечивается тем, что число маркеров в каждой позиции ограничено сверху и не превышает единицы при обработке одного заказа. Живость модели подтверждается отсутствием мёртвых переходов и тупиковых состояний при корректных входных условиях [5].

Таким образом, базовая сеть Петри является корректной и завершённой формальной моделью нормативного бизнес-процесса эксплуатации БПЛА и может использоваться как эталон для дальнейшего анализа и расширения.

Последовательность схемы базовой сети Петри

Позиции (состояния):

- P0 – Заказ принят.
- P1 – Миссия спланирована.
- P2 – Условия проверены.
- P3 – БПЛА готов.
- P4 – Полёт выполняется.
- P5 – Данные получены.
- P6 – Результат передан.
- R0 – Оператор (ресурс).

Переходы (операции):

- T0 – Планирование.
- T1 – Проверка условий.
- T2 – Подготовка.
- T3 – Старт миссии.
- T4 – Завершение полёта.
- T5 – Передача результата.
- TR0 – Оператор подтвердил доступ.

На рисунке 2 показана базовая сеть Петри, отражающая нормативный сценарий выполнения заказа при корректных внешних условиях, исправном техническом состоянии БПЛА и отсутствии организационных ошибок.

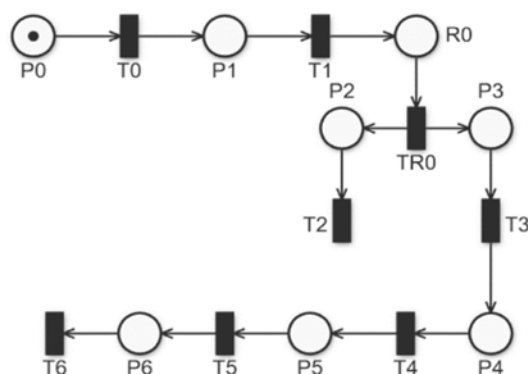


Рис. 2. Схема базовой сети Петри

Расширение базовой модели: введение отказов и сценариев восстановления

После верификации базовой сети Петри, описывающей нормативный сценарий выполнения бизнес-процесса эксплуатации беспилотного летательного аппарата, осуществляется её структурное расширение с целью формального учета отказных ситуаций и альтернативных траекторий развития процесса. Такое расширение позволяет перейти от детерминированного описания регламентированного процесса к модели, отражающей реальные условия функционирования технической системы.

Расширенная модель строится по принципу встраивания отказных подсетей в заранее определенные позиции базовой сети. При этом сохраняются все исходные позиции, переходы и дуги базовой модели, а добавляемые элементы формируют дополнительные ветви, активируемые при наступлении неблагоприятных событий. Такой подход обеспечивает структурную согласованность моделей и позволяет рассматривать базовую сеть как частный случай расширенной при отсутствии срабатывания отказных переходов.

Ключевыми точками встраивания расширений являются позиции, соответствующие проверке условий выполнения миссии, готовности БПЛА и выполнению полёта. Именно в этих состояниях процесс наиболее чувствителен к внешним воздействиям, ошибкам оператора и техническим отказам. В расширенной сети формально различаются восстанавливаемые и невосстанавливаемые сценарии. Первые приводят к возврату процесса в допустимые состояния базовой модели после выполнения корректирующих действий, вторые — к переходу в поглощающее состояние отмены заказа.

С точки зрения теории сетей Петри введение отказных подсетей не нарушает ограниченность и структурную корректность базовой модели, а лишь расширяет множество достижимых разметок. Это создаёт основу для последующего анализа достижимости целевого состояния, оценки устойчивости процесса и интерпретации влияния отказов на выполнение сервисных обязательств.

Список состояний расширенной сети Петри

1. Базовые состояния бизнес-процесса:

P2 – Условия проверены. Состояние соответствует

завершенной проверке метеоусловий, геозон и регуляторных ограничений.

P3 – БПЛА готов. Состояние, в котором БПЛА и персонал готовы к выполнению миссии.

P4 – Полет выполняется. Состояние активного выполнения миссии и сбора данных.

2. Отказные состояния:

PfW – Неблагоприятные и опасные погодные условия. Фиксация временной невозможности выполнения миссии по погодным причинам.

Pfreg – Регуляторный запрет (NO-FLY). Состояние, соответствующее невозможности выполнения миссии по регуляторным ограничениям.

Pfor – Ошибка оператора. Состояние, возникающее при выявлении организационной или человеческой ошибки.

PF1 – Потеря канала связи. Фиксация отсутствия радиоканала управления или передачи данных.

PF2 – Разряд аккумуляторной батареи. Состояние критического снижения заряда АКБ.

PF3 – Отказ датчика или отсутствие полезной нагрузки. Фиксация отказа оборудования, исключающего дальнейшее выполнение миссии.

3. Восстановительные и терминальные состояния:

PR – Восстановление состояния работоспособности. Агрегированное состояние выполнения ремонтных действий.

PC – Отмена заказа. Поглощающее состояние, соответствующее завершению процесса без выполнения SLA.

Список переходов сети Петри:

1. Переходы, связанные с внешними условиями:

Tw – Ожидание подходящего временного окна.

Tn – Возврат.

Tban – Фиксация регуляторного запрета.

2. Переходы, связанные с человеческим фактором:

Top – Выявление ошибки оператора.

Tredo – Повторная предполетная подготовка.

3. Переходы технических отказов:

TF1 – Событие: потеря связи.

TF2 – Событие: разряд АКБ.

TF3 – Событие: отказ датчика.

4. Переходы восстановления и завершения:

TR – Возврат БПЛА (RTH).

ТС – Отмена заказа (нарушение SLA).

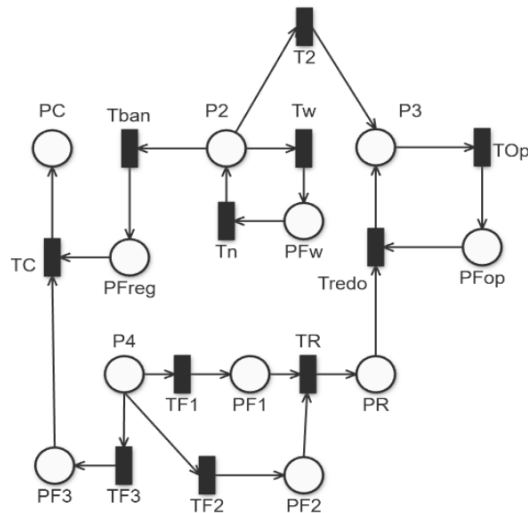


Рис. 3. Схема расширенной сети Петри

Анализ достижимости и структурных свойств расширенной модели

Анализ свойств расширенной сети Петри проводится для модели эксплуатации БПЛА, в которой базовый бизнес-процесс дополнен отказными и восстановительными сценариями. Исходной считается разметка, при которой один маркер расположен в позиции, соответствующей принятому и проверенному заказу, а все ресурсные позиции находятся в допустимом состоянии.

Анализ достижимости целевых состояний

В разработанной модели существуют два принципиально различных класса целевых разметок. Первый класс соответствует достижению состояния успешного завершения заказа, при котором маркер последовательно проходит через позиции $P2 \rightarrow P3 \rightarrow P4$ и далее достигает финального состояния передачи результата. Достижимость данного состояния обеспечивается при отсутствии срабатывания отказных переходов Tw , $Tban$, Top , $TF1$ – $TF3$ и подтверждает корректность нормативного сценария эксплуатации БПЛА.

Второй класс целевых разметок связан с достижением поглощающего состояния PC , соответствующего отмене заказа и нарушению SLA. В рамках модели показано, что достижение PC возможно исключительно через переход TC , который активируется в двух строго определённых случаях: при срабатывании регуляторного запрета ($P2 \rightarrow Tban \rightarrow PFreg \rightarrow TC \rightarrow PC$) и при наступлении невосстанавливаемого технического отказа полезной нагрузки ($P4 \rightarrow TF3 \rightarrow PF3 \rightarrow TC \rightarrow PC$). Это означает, что не любой отказ приводит к отмене заказа, а только те, которые формально определены как критические.

Анализ восстанавливаемых сценариев

Для отказов, классифицированных как восстанавливаемые, в модели явно заданы циклы возврата в допустимые состояния базового процесса. Так, неблагоприятные погодные условия формализуются циклом $P2 \rightarrow Tw \rightarrow PFW \rightarrow P2$, который отражает ожидание подходящего временного окна без разрушения структуры процесса.

Ошибки оператора моделируются переходом $P3 \rightarrow \text{Tor} \rightarrow \text{PFor} \rightarrow \text{Tredo} \rightarrow P3$, что соответствует повторной предполётной подготовке без необходимости повторного планирования миссии. Аналогично, технические отказы в полёте, такие как потеря связи или разряд аккумуляторной батареи, приводят к возврату БПЛА и повторному входу в состояние готовности через последовательность $P4 \rightarrow \text{TF1/TF2} \rightarrow \text{PF1/PF2} \rightarrow \text{TR} \rightarrow \text{PR} \rightarrow \text{Tredo} \rightarrow P3$.

Наличие этих циклов свидетельствует о том, что процесс обладает встроенными механизмами устойчивости и допускает восстановление без отмены заказа при ряде типовых инцидентов.

Анализ поглощающих состояний и устойчивости процесса

Позиция PC в разработанной сети является единственным поглощающим состоянием. После размещения маркера в данной позиции дальнейшее развитие процесса невозможно, что формально соответствует завершению заказа без выполнения сервисных обязательств. Отсутствие других поглощающих состояний указывает на то, что модель не содержит скрытых логических тупиков и все отказные сценарии либо приводят к восстановлению, либо явно завершают процесс.

Анализ ограниченности показывает, что при моделировании одного заказа каждая позиция сети является 1-ограниченной. Циклы восстановления не приводят к накоплению маркеров, поскольку возврат осуществляется в уже существующие позиции базовой модели. Это подтверждает корректность структуры сети и возможность её использования для анализа последовательных заказов.

Интерпретация модели для управления SLA и снижением операционных рисков

В разработанной модели сети Петри выполнение соглашения об уровне сервиса (SLA) формализуется как достижение целевого состояния передачи результата заказчику в пределах заданных временных и эксплуатационных ограничений. С точки зрения модели нарушение SLA соответствует достижению поглощающего состояния PC, при котором процесс завершается без передачи результата.

В общем виде выполнение SLA может быть описано через индикаторную функцию: $S = \{0,1\}$, $S = 1$, если достигнуто целевое состояние завершения заказа; $S = 0$, если достигнуто поглощающее состояние PC.

Тогда вероятность выполнения SLA для одного заказа может быть представлена как $P_{SLA} = 1 - P(PC)$, где $P(PC)$ – вероятность достижения поглощающего состояния отмены заказа в процессе функционирования сети Петри.

В рамках разработанной модели достижение состояния PC возможно только через строго определенные отказные сценарии, формализованные в структуре сети. Таким образом, вероятность нарушения SLA может быть представлена в виде суммы вероятностей критических сценариев: $P(PC) = P_{REG} + P_{CRIT}$, где P_{reg} – вероятность отмены заказа вследствие регуляторных ограничений (траектория $P2 \rightarrow \text{Tban} \rightarrow \text{PFreg} \rightarrow \text{TC} \rightarrow \text{PC}$), P_{CRIT} – вероятность невозможности восстановления технического отказа полезной нагрузки (траектория $P4 \rightarrow \text{TF3} \rightarrow \text{PF3} \rightarrow \text{TC} \rightarrow \text{PC}$)

Соответственно, уровень выполнения SLA может быть записан в виде $P_{SLA} = 1 - (P_{REG} + P_{CRIT})$.

Для восстанавливаемых отказов, таких как неблагоприятные погодные условия, ошибки оператора или потеря связи, модель не приводит к достижению состояния PC, однако увеличивает фактическое время выполнения заказа. Это позволяет ввести дополнительный показатель временного SLA: $T_{fact} = T_{base} + \sum_{i=1}^N \Delta T_i$, где T_{base} – время нормативного выполнения заказа без отказов, ΔT_i – дополнительные временные затраты, связанные с i -м восстановительным циклом, N – число восстановительных циклов.

Требование временного SLA формально записывается как $T_{fact} \leq T_{SLA}$, где T_{SLA} – предельное допустимое время выполнения услуги.

Таким образом, разработанная модель сети Петри позволяет разделить риски нарушения SLA на два класса: структурные риски, приводящие к отмене заказа и формально описываемые вероятностью достижения состояния PC; временные риски, связанные с увеличением длительности процесса вследствие восстановительных циклов.

Это дает возможность использовать модель для количественного обоснования управленческих решений, направленных как на снижение вероятности критических отказов, так и на оптимизацию процессов восстановления с целью соблюдения временных требований SLA.

Заключение

В работе разработана формальная модель бизнес-процесса эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на основе сетей Петри, позволяющая описывать как нормативный сценарий оказания услуги, так и отклонения, связанные с отказами и восстановительными действиями. Показано, что расширение базовой модели за счёт отказных подсетей сохраняет её структурную корректность и обеспечивает формальное различие восстанавливаемых и критических сценариев. На основе модели предложена интерпретация выполнения SLA, в которой нарушение обязательств связано с достижением поглощающего состояния, а временные риски – с наличием циклов восстановления. Полученные результаты позволяют использовать сеть Петри как инструмент анализа устойчивости бизнес-процессов эксплуатации БПЛА и обоснования управленческих решений, направленных на снижение операционных рисков и повышение надежности сервисных услуг.

Литература

1. *Fedorova A., Beliautsou V., Zimmermann A.* Colored Petri net modelling and evaluation of drone inspection methods for distribution networks // *Sensors*. 2022. Т. 22. № 9. С. 3418.
2. *Zurawski R., Zhou M. C.* Petri nets and industrial applications: A tutorial // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 1994. Т. 41. № 6. С. 567-583.
3. *Prasad R., Davidson R.* The Complete Guide to IT Service Level Agreements. 2nd ed. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2014.
4. *Петросов Д.А., Коротеев М.В., Андриянов Н.А.* и др. Интеллектуальный структурно-параметрический синтез имитационных моделей и бизнес-процессов : монография; под ред. Д. А. Петросова. М.: Русайнс, 2024. 98 с.
5. *Агамиров В.Л., Агамиров Л.В., Вестяк К.В., Гаева А.П.* Разработка структурно-параметрической модели автоматической коробки передач с использованием имитационного моделирования и сетей Петри // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова, Крестьянки, 19-23 мая 2025 года.* М.: ООО "ТРИП", 2025. С. 7-8.