

УДК 004.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

П.В. Степанов (Санкт-Петербург)

Введение

Моделирование логистических процессов представляет собой междисциплинарный научно-прикладной метод, направленный на анализ, оптимизацию и прогнозирование поведения сложных динамических систем в условиях неопределённости и многоуровневой структуры.

Логистика как область на стыке управления, экономики, информатики и инженерии требует интеграции разнородных знаний для построения целостных моделей. Ключевая особенность – это динамичность: процессы подвержены влиянию стохастических факторов (спрос, задержки, риски), что обуславливает применение имитационного и стохастического моделирования. Системы иерархичны и могут включать как локальные операции, так и глобальные цепочки поставок (SCM), что требует многоуровневого моделирования с учётом согласованности решений.

Логистические модели должны учитывать жёсткие ограничения: физические (ёмкость, грузоподъёмность), временные (SLA), финансовые (бюджет) и нормативные (регуляторные требования).

Задачи логистики многокритериальные: минимизация издержек, максимизация сервиса, сокращение сроков – это часто конфликтующие цели, решаемые через поиск Парето-оптимальных решений. Неопределённость требует применения методов анализа чувствительности, сценарного моделирования и управления рисками для проактивного принятия решений.

Моделирование охватывает всю цепочку создания ценности от поставщиков до конечных потребителей, требуя системного подхода и учёта интересов множества заинтересованных сторон. Визуализация (анимации, тепловые карты, графики загрузки) и интерактивные платформы (AnyLogic, Arena) повышают интерпретируемость моделей для лиц, принимающих решения. Цикличность процессов (обратная логистика, рециклинг, повторное использование упаковки и оборотной тары) требует включения механизмов обратной связи и замкнутых контуров.

Моделирование в логистике – это не вспомогательный инструмент, а стратегический актив, обеспечивающий конкурентные преимущества через снижение издержек, повышение надёжности и устойчивости.

Формализм сетей Петри, особенно в реализации CPN Tools, позволяет эффективно моделировать дискретные, параллельные и распределённые процессы, характерные для логистики. Несмотря на архаичность интерфейса CPN Tools, его аналитическая мощь остаётся актуальной, особенно при поддержке ИИ-ассистентов для генерации кода и отладки.

Таким образом, моделирование логистических процессов – это синтез математической строгости, системного мышления и цифровых технологий, формирующий основу для принятия обоснованных управленческих решений в условиях высокой динамики и сложности современных цепочек поставок.

Методология

Использование CPN Tools [1] для моделирования логистических процессов открывает перед аналитиками и исследователями уникальные возможности, основанные на строгой математической основе цветных сетей Петри. Несмотря на то, что изначально этот инструмент разрабатывался для анализа параллельных и распределённых

вычислительных систем [2, 3], его гибкость и формальная выразительность делают его чрезвычайно полезным и в логистике, где процессы часто сложны, многопоточны и насыщены взаимозависимостями.

Главное преимущество CPN Tools это формальная строгость. Каждая модель, построенная в этой среде, опирается на чёткую математическую теорию, что позволяет не просто визуализировать процесс, а доказывать его корректность. Например, можно формально проверить, что система никогда не попадёт в тупиковое состояние, или что каждый заказ обязательно достигнет пункта назначения. Это особенно ценно в критически важных логистических цепочках, например, при доставке медикаментов или в оборонной сфере, где ошибка в процессе может иметь серьёзные последствия.

Ещё одна сильная сторона – это естественное моделирование параллелизма и синхронизации. В логистике множество операций происходят одновременно: приёмка груза, его сортировка, комплектация, оформление документов, погрузка и отправка. CPN Tools позволяет точно отразить эти параллельные потоки, задать условия их взаимодействия и управлять конфликтами за ресурсы, например, запретить одновременное использование одного погрузчика двумя бригадами. Такая детализация помогает выявлять узкие места и повышать общую эффективность системы.

Особенно мощной делает CPN Tools возможность использования «цветных» фишек (токенов) – элементов, которые несут в себе данные. В отличие от классических сетей Петри, где фишки неразличимы, здесь каждая фишка может представлять конкретный груз, заказ или транспортное средство с уникальными атрибутами: весом, типом, пунктом назначения, срочностью доставки и т.п. Это позволяет моделировать индивидуальные маршруты и условия обработки, а также реализовывать сложные правила принятия решений, например, направлять тяжёлые грузы на специализированные погрузочные площадки или осуществлять приоритетную обработку срочных заказов.

Кроме того, CPN Tools поддерживает имитационное моделирование: можно запустить симуляцию и визуально наблюдать, как объекты (фишки) движутся по сети, как загружаются ресурсы, где возникают задержки. Встроенные средства сбора статистики позволяют анализировать времена ожидания, частоты операций, загрузку оборудования и это всё даёт ценные данные для оптимизации. Например, можно выяснить, что 70% времени заказы простаивают в ожидании подписания документов и принять меры для автоматизации этого этапа.

Модульность среды позволяет разбивать сложные системы на подмодели, отдельные страницы, отвечающие за склад, транспортировку, таможню и т.д. Это упрощает восприятие, облегчает повторное использование компонентов и позволяет масштабировать модель от локальной операции до всей цепочки поставок.

Важным преимуществом является и возможность формальной верификации модели. С помощью анализа пространства состояний можно убедиться, что все заказы обрабатываются корректно, что не возникает «потерянных» фишек (т.е. «потерянных» грузов), и что система всегда может вернуться в рабочее состояние. Это не просто моделирование – это гарантия логической целостности процесса.

Нельзя не отметить и то, что CPN Tools является бесплатным и открытым инструментом, что делает его доступным для образовательных учреждений, научных исследований и пилотных проектов. Хотя интерфейс устарел, а официальная поддержка прекращена, его мощь как инструмента для глубокого анализа логики процессов остаётся непревзойдённой. Для промышленного внедрения его часто используют как этап проектирования, чтобы «отладить» логику, прежде чем переносить модель в более визуальные, но менее строгие имитационные среды, такие как AnyLogic или Simio.

Конечно, у CPN Tools есть и ограничения: высокий порог начального обучения, понимание теории сетей Петри, а также скромные возможности визуализации по сравнению с современными платформами. Однако именно его математическая точность, гибкость данных и способность анализировать сложные взаимодействия делают его незаменимым для глубокого понимания структуры модели, выявления скрытых рисков и построения надёжных, верифицируемых процессов.

Таким образом, CPN Tools это не просто программа для моделирования, а инструмент глубокого логического и структурного анализа, который позволяет заглянуть внутрь логистической системы, убедиться в её корректности и заложить основу для дальнейшей количественной оптимизации. Для исследователей, инженеров процессов и системных аналитиков это мощный интеллектуальный ресурс, способный превратить хаос логистических операций в стройную, проверенную и управляемую модель.

Результаты

Практическим доказательством применимости CPN Tools для моделирования логистических процессов являются созданные автором модели систем контроля оборота мобильного оборудования [4], автомобильного терминала [5] и обслуживания пассажиров в аэропорту.

На рис. 1 показана обобщённая схема модели оборота мобильного оборудования, часть технологического процесса, обеспечивающего подготовку и загрузку на борт воздушного судна. Модель имеет следующие параметры – число технологических этапов, количество мобильного оборудования, количество персонала на каждом этапе, число используемых транспортно-технологических средств для перевозки мобильного оборудования. Определено множество технологий идентификации, каждая из которых имеет параметры стоимости, достоверности и временные характеристики. Модель позволяет решить задачу выбора оптимальной комбинации технологий идентификации для конкретного технологического процесса при заданных ограничениях на стоимость реализации при достижении требуемой достоверности. Модель, результаты моделирования и реализация алгоритмов поиска оптимальных решений по Парето описаны в [6].



Рис. 1. Обобщённая модель технологии подготовки мобильного оборудования к вылету на воздушном судне

На рис. 2 показана обобщённая схема модели автомобильного терминала, которая имеет следующие параметры – число погрузочных/разгрузочных постов, количество погрузчиков, вместимость склада. Входной и выходной поток формируются с учётом имеющихся статистических данных распределения интенсивности по месяцам, дням

недели и времени суток. Задаются параметры распределения загрузки единицы транспорта и времени на разгрузку и погрузку. Модель учитывает возможность поломки погрузочных механизмов. Задаётся распределение времени наработки на отказ и времени восстановления. Модель позволяет решить задачу подбора параметров терминала для обеспечения заданного среднего времени нахождения автотранспорта под погрузкой/разгрузкой исходя из задаваемых характеристик входного и выходного потока грузов.

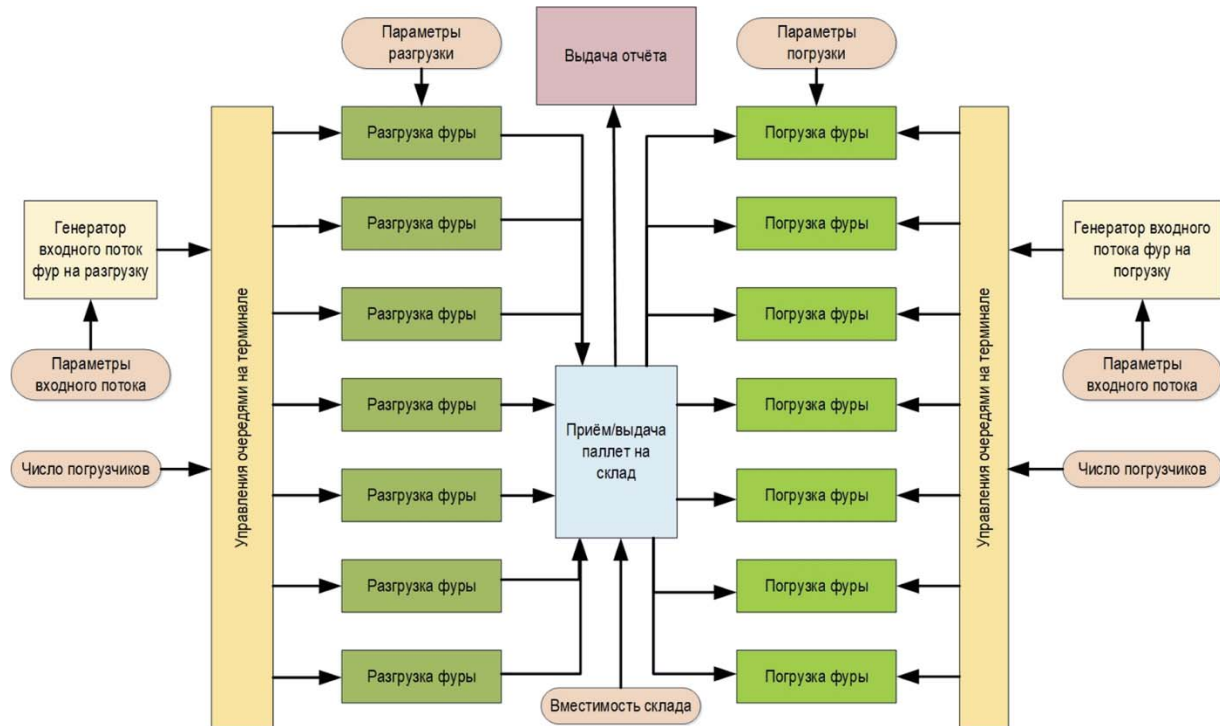


Рис. 2. Модель автомобильного терминала

На рис. 3 показана обобщённая схема обслуживания вылетающих пассажиров в аэропорту и имеет много общего с процессом, описанным в [7]. Модель имеет следующие параметры –

- число пассажиров на рейс;
- количество пунктов досмотра на первом и втором этапах;
- число стоек регистрации;
- расстояние между отдельными этапами.

Учитывается число мест багажа и ручная кладь, а также предоплачен ли сверхнормативный багаж. Параметры возраст, степень мобильности пассажира и наличие детей влияют на время, затрачиваемое на перемещение от одной контрольной точки до другой.

Модель позволяет задавать количество персонала, на каждом контрольном пункте с учётом сменности, соблюдения длительности рабочих смен.

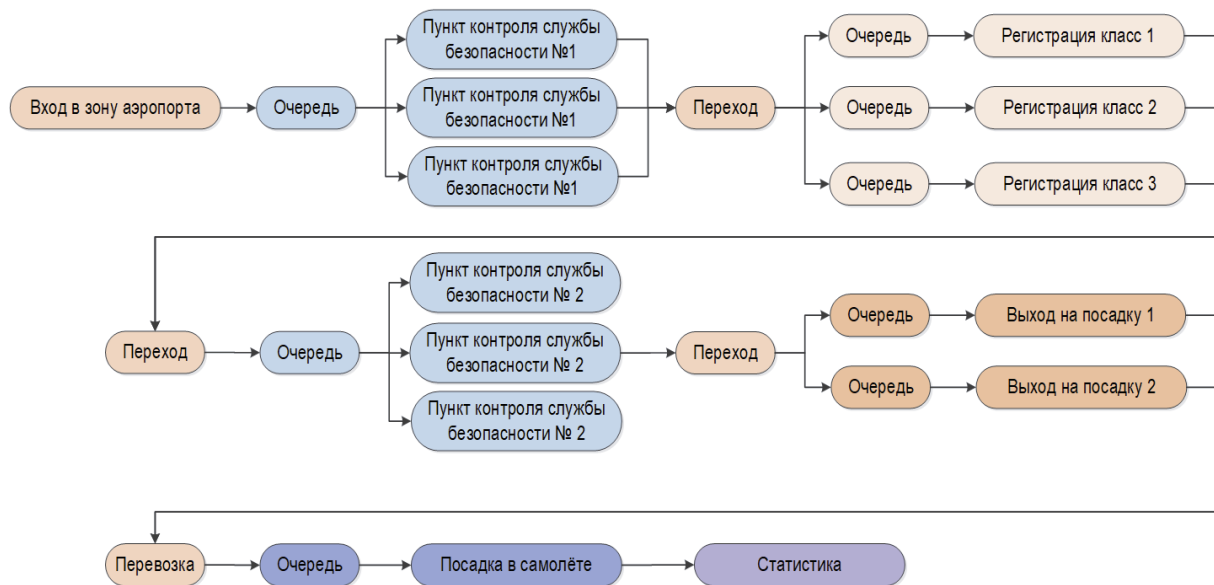


Рис. 3. Модель обслуживания авиапассажиров в аэропорту

Учитывается влияние личных качеств, усталости персонала на производительность и вероятность возникновения ошибки. Модель позволяет оценить время, проводимое пассажирами в аэропорту в зависимости от имеющихся ресурсов и интенсивности входного потока пассажиров.

Новые возможности с GPT.

Генеративные модели серии GPT могут существенно повлиять на моделирование логистических систем, где процессы многомерны, динамичны и насыщены взаимозависимостями. Процесс моделирования можно разделить на три ключевых этапа – построение модели, имитационное моделирование и интерпретация результатов. На каждом из этих этапов GPT играет уникальную, но взаимосвязанную роль.

На этапе построения модели GPT выступает как архитектор процессов, помогая перевести бизнес-описание в техническую модель.

Основные возможности GPT здесь:

- формализация неструктурированных описаний – выделение состояний (ожидание, комплектация, погрузка), событий (поступление заказа, сбой транспорта), ресурсов (грузчики, рампы, транспорт) и ограничений (временные окна, ёмкость);
- рекомендация типа моделирования в зависимости от характера задачи и целей анализа;
- генерация шаблонов и псевдокода – например, структура сети Петри для документооборота или блок-схема для AnyLogic с описанием переходов;
- автоматизация документации – создание технического задания, глоссариев, аннотаций к переменным, описаний входов/выходов.

На этапе имитационного моделирования GPT становится инженером-исследователем, который, конечно, не может заменить симулятор, но делает подготовку в разы быстрее и точнее.

Ключевые функции на этом этапе:

- генерация рабочего кода – под Python (SimPy, Mesa), Java (AnyLogic), CPN ML и другие среды, с учётом специфики задачи;
- создание синтетических, но реалистичных данных – заказы с весом, приоритетом, временем поступления, пунктом назначения;
- подбор параметров распределений и генерация соответствующего кода;
- автоматизация сценариев «что если» – «что будет при добавлении рампы?»;

«что при сокращении времени обработки?» – с генерацией конфигураций и параметров;

- помощь в отладке – анализ ошибок, предложение гипотез, генерация исправленного кода и логирования.

На этапе обработки и интерпретации результатов GPT проявляет себя как аналитик, интерпретатор и коммуникатор, способный превратить сырые данные в понятные, обоснованные и действенные выводы.

Основные преимущества:

- автоматическая генерация аналитических отчётов – на основе таблиц с результатами: сравнение сценариев, выделение лучших вариантов, объяснение причин различий, рекомендации;

- генерация кода для визуализаций с указанием, какие именно графики нужны: гистограммы, тепловые карты, диаграммы Ганта;

- диалоговая интерпретация результатов – ответы на вопросы в свободной форме: «Почему выросли издержки?», «Какой сценарий оптимален по времени и бюджету?»;

- адаптация выводов под аудиторию. Для инженера – технические метрики, для менеджера – ROI и издержки, для руководства – executive summary;

- генерация презентаций и дашбордов – структура слайдов, тексты, визуальные метафоры, описания виджетов.

Однако GPT не может заменить эксперта, так как:

- GPT не принимает решения, он предлагает варианты, но выбор, верификация и ответственность остаётся за человеком;

- существует риск галлюцинаций; модель может выдать правдоподобный, но ошибочный код или вывод. Всё требует проверки экспертом;

- не выполняет real-time расчёты; для оптимизации в реальном времени нужны специализированные алгоритмы и системы;

- зависит от качества промптов (заданий для GPT): «мусор на входе – мусор на выходе». Чёткость и контекст критически важны.

Модели GPT способны генерировать код для CPN Tools и делают это достаточно уверенно, особенно если речь идёт о создании логических структур, объявлении типов данных или описании поведения переходов и позиций. Однако, как и в любом применении ИИ для технических задач, здесь есть важные нюансы: GPT может стать мощным ускорителем работы, но только при условии, что пользователь понимает его возможности и ограничения, а также умеет правильно формулировать запросы и верифицировать результат.

В среде разработки CPN Tools GPT могут работать с языком CPN ML [8] и это открывает широкие возможности для автоматизации проектирования логистических моделей:

С помощью GPT можно:

- писать объявления цветных множеств (color sets), что позволяет сразу задать типы объектов, с которыми будет работать модель;

- определять переменные и функции – включая логические условия, например, функцию для расчёта времени обработки заказа в зависимости от веса или приоритета;

- создавать переходы (transitions) и позиции (places) с привязкой к цветным фишкам, что особенно полезно при моделировании разнородных потоков – например, разных типов грузов или заказов;

- генерировать гарды (guards) и выражения (expressions) – то есть условия, при которых срабатывает тот или иной переход, что критично для точного воспроизведения бизнес-логики;

- строить простые и средней сложности модели – например, модель обработки заказа, маршрутизации груза, управления складом, включая ветвления, циклы и синхронизацию.

Пример запроса к GPT: «Напиши CPN ML-код для модели, где заказ поступает, проверяется наличие на складе, и если есть – отправляется на сборку, если нет – в очередь на закупку». В результате GPT выдаст структуру с цветными множествами, позициями, переходами, переменными и функциями которая готова к импорту и доработке в CPN Tools.

Кроме того, GPT может выступать в роли «ассистента по отладке»: если у вас есть фрагмент кода, который не работает, он способен:

- объяснить ошибку – например, почему не срабатывает условие перехода или возникает несоответствие типов;
- предложить исправление – переписать выражение, добавить аннотацию типа, изменить порядок аргументов;
- дать альтернативные реализации – если текущий подход неэффективен, сложен или содержит логическую ошибку;
- также GPT может помочь в создании шаблонов и библиотек повторного использования:
 - фрагменты для типовых логистических операций – приёмка, сортировка, погрузка, документооборот – с возможностью параметризации;
 - параметризованные функции – например, расчёт времени в пути в зависимости от веса, расстояния и типа транспорта;

Существуют существенные ограничения и риски применения GPT в CPN Tools:

- GPT не знает специфику вашей задачи полностью – он генерирует код на основе общих паттернов и вашего описания, но может упустить важные бизнес-правила, если они не были чётко сформулированы, или неправильно интерпретировать требования, особенно при расплывчатых формулировках. Необходимо всегда уточнять детали в промпте: типы данных, ограничения, приоритеты, исключения – чем конкретнее запрос, тем точнее ответ;
 - GPT может «галлюцинировать» синтаксис или функции – хотя он обучен на SML. CPN Tools имеет свои особенности и расширения (например, GUI-привязки, тайминги, мониторы), которые GPT может неправильно воспроизвести – использовать несуществующие функции или пропустить обязательные элементы, например, объявление `init` для начальной маркировки. Необходимо всегда проверять сгенерированный код в CPN Tools; лучше использовать GPT как «черновик», а не финальное решение;
 - GPT не может визуально построить сеть в GUI – CPN Tools – это не только код, но и графический интерфейс, где вы вручную соединяете позиции и переходы. GPT не может нарисовать диаграмму или экспортировать `.crn` файл, хотя может описать, как это сделать вручную;
 - отсутствие доступа к состоянию вашей модели — GPT не видит вашу текущую модель, не знает, какие модули уже созданы, какие переменные используются. Поэтому он может предложить дублирующие или конфликтующие имена, или не учесть контекст – например, что в вашей модели уже есть глобальная переменная `current_time`. Необходимом всегда в промпте указывать контекст и конкретные имена переменных;
- Упрощённая модель автомобильного терминала, показанного на рис. 2, может быть создана в CPN Tools с помощью промпта для GPT, приводимого ниже.

Пример промпта:

- Построй модель автомобильного логистического терминала в CPN Tools, где:
- Грузы поступают в полуприцепах на поддонах.
- Каждый полуприцеп содержит фиксированное число поддонов (например, 20–33 шт.).
- На терминале осуществляется разгрузка полуприцепов → промежуточное хранение на складе → отгрузка на другие транспортные средства.
- Склад имеет ограниченную вместимость (в поддонах).
- Разгрузка и погрузка выполняются погрузчиками – их количество задаётся как параметр.
- Каждый погрузчик может обрабатывать один поддон за фиксированное время (например, 5 минут).
- Число прибывающих машин в день – параметр (например, 10–50 машин/день).
- Если склад переполнен – новые поддоны не принимаются, машина ждёт или уезжает (реализуй как блокировку).
- При отгрузке поддоны забираются со склада – если склад пуст, отгрузка приостанавливается.
- Модель должна учитывать динамику потоков: прибытие → разгрузка → хранение → отгрузка.
- Требования к коду (CPN ML):
 - Определи цветное множество PALLET как (pallet_id : string, product_type : string, weight : int).
 - Определи цветное множество TRUCK как (truck_id : string, pallets_count : int).
- Создай позиции:
 - TrucksArriving – прибывающие машины,
 - UnloadingQueue – очередь на разгрузку,
 - Warehouse – склад (ограниченная ёмкость),
 - LoadingQueue – очередь на отгрузку,
 - TrucksDeparting – уезжающие машины.
- Создай переходы:
 - StartUnloading – начало разгрузки (требует свободного погрузчика),
 - StorePallets – перемещение поддонов на склад (проверка свободного места),
 - StartLoading – начало отгрузки (требует свободного погрузчика и наличия поддонов),
 - ShipPallets – отправка поддонов в отъезжающий транспорт.
- Используй ресурсы – погрузчики (например, Forklifts : int), реализуй как цветное множество или через переменную с мьютексом.
- Добавь начальную маркировку: 2 машины в TrucksArriving, 3 погрузчика, вместимость склада = 100 поддонов.
- Реализуй ограничение склада: если $\text{размер}(\text{Warehouse}) + \text{pallets_count} > \text{вместимость}$ — переход StorePallets блокируется.
- Добавь комментарии на русском ко всему коду.
- Убедись, что код синтаксически корректен для CPN Tools и может быть скопирован напрямую в Declaration.
- Дополнительно: опиши, как соединить элементы в графическом интерфейсе CPN Tools (какие дуги, куда вести, какие переменные использовать).
- Дополнительно:
 - Если какие-то функции не могут быть реализованы без внешней логики (например, генерация ID), используй заглушки с пояснением.
 - Предложи, как можно расширить модель: добавить статистику (время ожидания,

загрузка погрузчиков), тайминги, несколько типов грузов.

Обсуждение

Из примера видно, что для написания корректного работоспособного промпта необходимо знание языка Standart ML, который лежит в основе CPN Tools. Нужно отметить, что этот язык устаревший и не поддерживает языковых конструкций присущих современным языкам – объекты, классы, иерархии типов данных и т.д.

Одним из ключевых преимуществ CPN Tools является наличие интуитивно понятного графического интерфейса (GUI), реализующего формальную модель сетей Петри. Предполагается, что модель разрабатывается человеком в терминах и понятиях сетей Петри – позиции и переходы. Созданная сеть является первоосновой, по которой создаётся код на внутреннем языке. GPT не может сгенерировать графическое представление, он создаёт сразу код на внутреннем языке. Разработчику предлагается вручную воссоздать графическое представление модели, что может оказаться весьма затруднительным особенно при сложных иерархических моделях.

Среда разработки CPN Tools реализована как интерпретатор языка высокого уровня – раскрашенных сетей Петри. Такой подход предоставляет комфортную среду для разработки, отладки и моделирования. Так, например некоторые изменения можно вносить в модель непосредственно в процессе моделирования. Но обратной стороной такой реализации является крайняя неэффективность интерпретируемой модели, что затрудняет создание сложных иерархических моделей с большим числом переходов и одновременно перемещающихся токенов (фишек). Некоторые аспекты моделирования сложных систем такие как ограничения числа уровне иерархии и количества токенов одновременно находящихся в одной позиции рассмотрены автором в работе [9].

Выводы

Сети Петри – наглядный и универсальный инструмент моделирования дискретных, параллельных и логистических процессов. Их графическая природа и семантика маркеров идеально подходят для визуализации потоков объектов – грузов, заказов, данных.

CPN Tools, поддерживающий раскрашенные сети, позволяет строить детализированные, типизированные модели реальных систем. Пошаговое моделирование даёт возможность «вживую» отслеживать динамику, упрощая анализ и обучение.

Однако интерфейс CPN Tools устарел – он не интуитивный, основан на Standard ML, слабо документирован, малое сообщество. Это затрудняет освоение, особенно новичками и специалистами без опыта функционального программирования.

Современные ИИ-ассистенты (например, GPT) способны частично нивелировать эти недостатки. Они помогают генерировать код, объяснять синтаксис, находить ошибки и создавать инструкции под задачу. GPT может переводить бизнес-требования в формальные конструкции сетей Петри.

Такой симбиоз классического формализма и ИИ открывает новые возможности для моделирования. Объединение сетей Петри, CPN Tools и ИИ является эффективной гибридной средой для анализа процессов, идеальной для исследований, обучения и практических задач в логистике и автоматизации.

Статья публикуется в рамках бюджетной темы НИР FFZF-2025-0020.

Литература

1. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL:<http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started>.
2. Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN

- Tools: учеб. пособие. Одесса: Одесская национальная академия связи, 2006. 60 с.
3. **Jensen K., Kristensen M.** Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
 4. **Стыскин М.М., Степанов П.В., Желтов С.Ю., Соколов Б.В., Ронжин А.Л.** Средства оптической и радиочастотной идентификации в технологическом процессе автоматизированного контроля оборота мобильного бортового оборудования. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10. № 1 (36).
 5. **Степанов П.В., Атаев К.И.О.** Имитационная модель автомобильного терминала // В сборнике: Интеграция систем управления и логистики на транспорте. материалы Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых. Москва, 2025. С. 56-58.
 6. **Степанов П.В.** Выбор оптимальной комбинации технологии идентификации для системы контроля оборота мобильного оборудования // Информатизация и связь, 2024, Номер 5, С. 47-59
 7. **Зайцев Е.Н., Пашкевич А.Г., Тецлав И.А., Шайдуров И.Г.** Разработка и применение имитационных моделей при управлении потоками пассажиров в аэровокзалах // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов межрегиональной конференции и Санкт-Петербургской международной конференции. 2018. С.131-136.
 8. The Standard ML Basis Library [Электронный ресурс]. – URL: <https://smlfamily.github.io/Basis/manpages.html>.
 9. **Степанов П.В.** Реализация алгоритма поиска оптимального решения в имитационной модели // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2025. № 6. С.38-49.
 10. **Дзюба Ю.В., Павловский А.А.** Применение сетей Петри при управлении движением // Наука и технологии железных дорог. 2019. Т. 3. № 2 (10). С. 77-88.
 11. **Santos F.P., Teixeira A.P., Soares C.G.** Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates // Simulation. 2018. Vol. 95. Pp. 461-478
 12. **Stepanov P. V., Zakharov V. V., Markov V. P., & Andrianov Y.** (2025). Simulation of the mobile objects identification processes in the supply chains // Journal of Applied Engineering Science, 23(2), 412–420. <https://doi.org/10.5937/jaes0-57511>.
 13. **Юдаев В.В., Богданов А.В., Королёв О.А.** Моделирование систем физической безопасности на основе аппарата сетей Петри // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2019. № 4. С. 82-88.
 14. **Алампиев Н.С.** Разработка мультиагентной системы для контроля дорожного движения в городе Новосибирск на основе сетей Петри // В сборнике: SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH - 2023. Сборник статей III Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2023. С.51-56.
 15. **Брёхин А.А., Домнин Е.О.** Оптимизация блокчейн бизнес-процессов на основе сетей Петри // Научный аспект. 2020. Т. 14. № 2. С. 1814-1820.
 16. **Воевода А.А., Романников Д.О.** Алгоритм параллельного объединения массивов с использованием сетей Петри // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 3 (85). С. 131-138.
 17. **Воевода А.А., Романников Д.О.** Асинхронный алгоритм сортировки массива чисел с использованием ингибиторных сетей Петри // Труды СПИИРАН. 2016. № 5 (48). С. 198-213.
 18. **Волошко А.Г., Крюков О.С.** Методы формирования допустимых решений задачи оптимизации моделей производственных процессов на базе расширенных сетей

- Петри // В сборнике: Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития. Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Отв. редактор Д.Ю. Карандеев. Абакан, 2021. С.8-9.
19. **Дворянский Л.В., Ломазов И.А.** Имитационное моделирование и верификация вложенных сетей Петри и с использованием CPN Tools // Моделирование и анализ информационных систем. 2011. Т 19. № 5. С.1-16.
20. **Климов Ар.В.** Цветные сети Петри и языки распределённого программирования UPL: их сравнение и перевод // Программные системы: теория и приложения. 2023. Т 14. №4(59). С.91-122.
21. **Корнеев А.М., Огаджанян О.И., Сметанникова Т.А., Огаджанян М.О.** Управление процессом обслуживания высокотехнологичного оборудования с использованием сетей Петри // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 35-40.
22. **Митькин А.А.** Применение сетей Петри для моделирования производственных систем и оптимизации их производительности // В сборнике: Ключевые позиции и точки развития экономики и промышленности: теория и практика. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Липецк, 2023. С. 445-447.
23. **Наумов В.С.** Использование сетей Петри при моделировании процесса транспортно-экспедиционного обслуживания // Автомобильный транспорт (Харьков). 2009. № 24. С. 120-124.