

УДК 656.222.4

В. Г. КОЗЛОВ, заведующий НИЛ УПП, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ И УЗЛОВ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Оценка перевозочного потенциала железнодорожного транспорта является сложной научно-практической задачей, которая может решаться методом имитационного моделирования перевозочного процесса. Одним из математических аппаратов, позволяющих осуществлять моделирование динамических систем, к которым относятся транспортные потоки на объектах железнодорожной инфраструктуры, является сеть Петри. Рассматриваются имитационные модели сетей Петри, на основе которых можно определять загрузку объектов инфраструктуры или их отдельных элементов, а также прогнозировать эксплуатационные затруднения в работе железнодорожных станций и узлов, а также области применения сетей Петри.

Железнодорожный транспорт как объект научного исследования является сложной иерархической системой, которая состоит из множества компонентов, выполняющих отдельные бизнес-процессы перевозочного процесса. По железнодорожной сети одновременно осуществляется перевозка широкой номенклатуры груза и пассажиров по различным маршрутам и назначениям. При этом совокупность технологических операций по организации вагонопотоков и движения поездов различных категорий осуществляется параллельно с синхронизацией их выполнения на железнодорожных станциях и в узлах.

Параллельность выполнения операций, в частности пропуск транзитного вагонопотока с переработкой и без переработки, не позволяет традиционными аналитическими методами осуществить достоверную оценку интегрированной наличной пропускной способности железнодорожного узла, а также технической станции с развитой инфраструктурой. Существующие методики расчета пропускной и перерабатывающей способностей железнодорожных сооружений и устройств не учитывают специфику их взаимного размещения. В отдельных случаях могут появляться затруднения в эксплуатационной работе станции, но при этом по отдельности объекты и устройства станции имеют значительный резерв пропускной способности. Затруднения происходят на элементах, где осуществляется синхронизация процессов и имеется ограниченность ресурсов и, как следствие, образуется ожидание завершения параллельных операций.

Для комплексной оценки перевозочного потенциала и возможных эксплуатационных затруднений железнодорожной станции целесообразно применять имитационное моделирование перевозочного процесса, учитывающее структуру и технологию пропуска транспортного потока, а также взаимное размещение сооружений, устройств, объектов и отдельных элементов в топологии станции. При моделировании недетерминированных динамических систем с параллельными взаимодействующими компонентами, которыми являются железнодорожная станция и узел, рационально использовать сетевую асинхронную модель, построенную на основе иерархической временной раскрашенной сети Петри.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов: позиций и переходов, соединенных между собой дугами. Вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети [1].

Для моделирования бизнес-процессов работы железнодорожной станции в качестве позиций и переходов выступают элементы станции и процессы, а метками обозначается транспортная нагрузка (поток), которая может отличаться исходными входными параметрами (цветом метки). Например, для моделирования работы однопутного перегона, который можно рассматривать как общий ресурс при выполнении параллельных процессов (пропуск поездов), необходимо использовать механизм синхронизации процессов в сети Петри (рисунок 1).

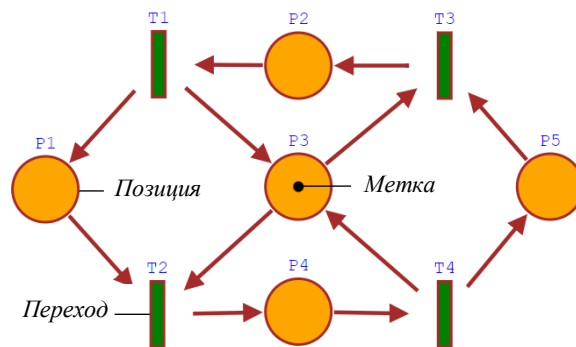


Рисунок 1 – Модель железнодорожного однопутного перегона на основе сети Петри

Позиции P1 и P5 являются одновременно входной и выходной позициями сети, которые обозначают начало и конец перегона. При более сложной структуре, например перегон вместе с горловиной станции, входом или выходом на перегон могут выступать несколько позиций. Позиция P3 является служебным элементом сети и отвечает за реализацию механизма синхронизации процессов. В исходном состоянии сети позиция P3 имеет только одну метку, что означает свободу моделируемого перегона.

На рисунке 2 приведены три последовательных состояния сети Петри при моделировании пропуска поезда по железнодорожному перегону.

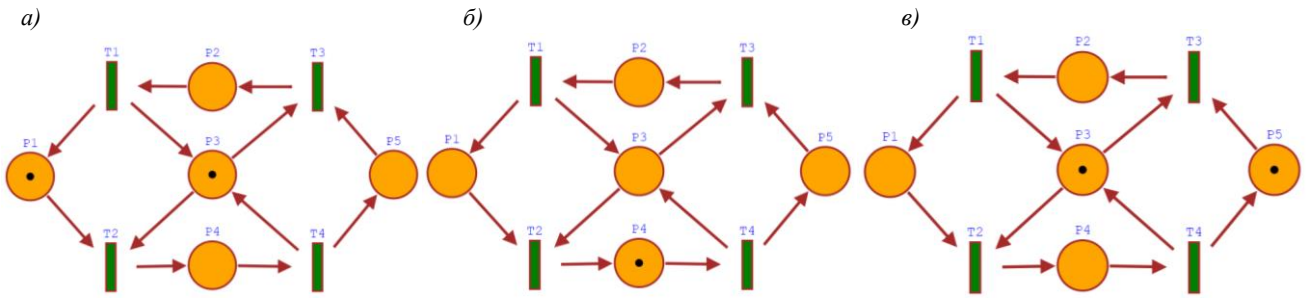


Рисунок 2 – Моделирование пропуска поезда по однопутному перегону

В первой итерации на сети срабатывает переход T2, т. к. в двух входных позициях P1 (начало перегона) и P3 (синхронизация) есть соответствующие метки (см. рисунок 2, а). После этого сеть переходит в следующее состояние, где помечена меткой выходная позиция P4, что соответствует движению поезда по перегону (см. рисунок 2, б). При этом в позиции P3 отсутствует метка, что означает занятость перегона и, следовательно, невозможность срабатывания переходов T2 и T3. В следующей итерации активирован переход T4. После его активации метки устанавливаются в позициях P3 (перегон свободен) и P5 (выход из перегона) (см. рисунок 2, в).

Приведенная сеть Петри разработана с применением механизма синхронизации параллельных процессов и может использоваться для моделирования схожих элементов железнодорожной станции, где есть параллельные процессы и точки их соприкосновения. На-

пример, для моделирования работы горловины парка станции в модели подобная структура сети Петри.

При создании имитационной модели эксплуатационной работы железнодорожной станции или узла производится декомпозиция системы на элементарные самостоятельные элементы: перегон, горловина, парк, вытяжной путь, сортировочная горка и др. Разрабатывается соответствующая модель сети Петри для каждого отдельного элемента, осуществляется непосредственно моделирование их работы, чтобы получить и проанализировать соответствующую логику на возникновение недопустимых ситуаций типа коллизий или блокировок. Далее осуществляется композиция отдельных моделей каждого элемента и разрабатывается единая иерархическая модель общей системы [2].

На рисунке 3 приведена сеть Петри, моделирующая пропуск трех поездов по двум путям станции.

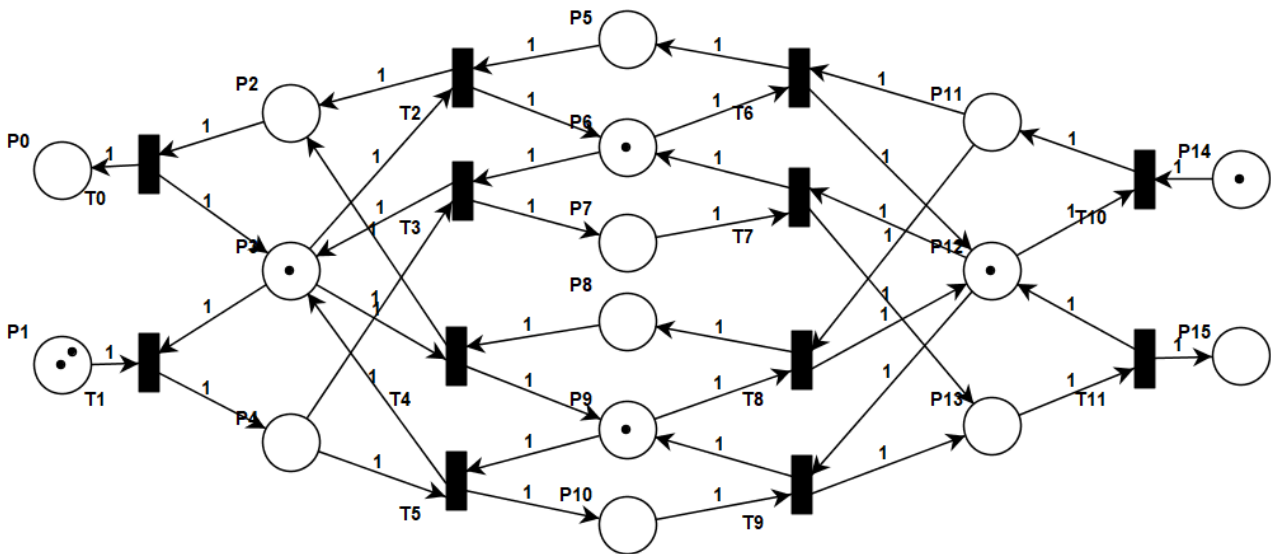


Рисунок 3 – Модель парка станции с соответствующей разметкой для моделирования пропуска (обработки) поездов

Позиции P0, P1, P14 и P15 являются входными и выходными позициями, моделирующими соответственно четный и нечетный подходы поездов. Первоначальная разметка позиций P1 (2 метки) и P14 (1 метка) определяет исходный транспортный поток (количество поездов на подходах), который требуется пропустить по соответствующим направлениям.

Позиции P2–P4 и P11–P13 и соответствующие им переходы моделируют работу горловины парка станции, где позиции P3 и P12 являются технологическими (служебными) и предназначены для реализации механизма синхронизации параллельных процессов при использовании общего ресурса (горловины парка).

Фрагмент сети Петри, заданный позициями P5–P10 и переходы T2–T9 моделирует работу двух путей парка и их взаимодействие с горловинами. Позиции P6 и P9 также отвечают за синхронизацию параллельных процессов (занятость путей).

На основе приведенной сети Петри (см. рисунок 3) осуществляется моделирование пропуска транспортного потока по путям парка с целью определения всех возможных состояний в работе модели. Для этого строится соответствующее дерево достижимости сети Петри (рисунок 4), которым описывается множество достижимых состояний модели.

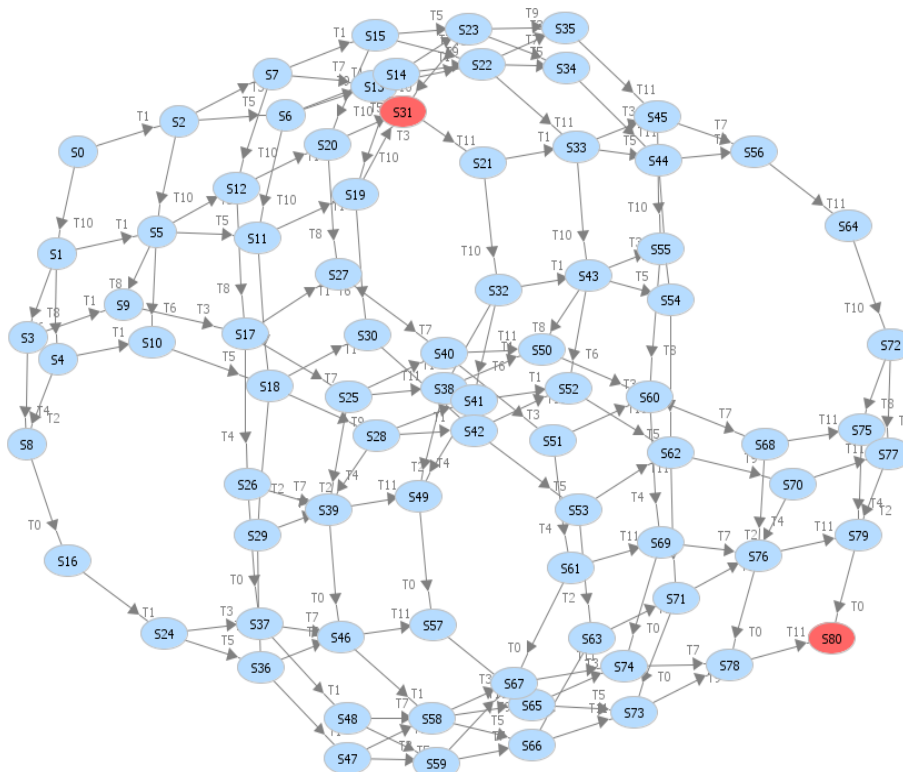


Рисунок 4 – Дерево достижимости сети Петри, моделирующей работу парка станции

Дерево достижимости по существу является графом состояний, который содержит множество вершин и дуг, их соединяющих. Каждая вершина соответствует достижимой маркировке (состоянию) модели. Дуги графа указывают на переходы, которые должны сработать для достижимости советующей маркировки.

Анализ дерева достижимости (см. рисунок 4) показывает, что модель может находиться в 80 различных состояниях, ряд из которых повторяется и достигается разной последовательностью срабатывания переходов. Выделенные вершины S31 и S80 указывают на тупиковое состояние работы сети Петри, когда ни один переход не срабатывает и работа модели останавливается. Маркировка S80 {1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,2} является конечным состоянием модели, когда осуществлен пропуск всех поездов. Маркировка S31 {0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0} соответствует состоянию, когда парк станции имеет технологическое затруднение в пропуске поезда («заши»), т. е. все пути парка заняты одновременно с приемом поезда встречного направления.

Необходимо отметить, что приведенная на рисунке 3 имитационная модель имеет упрощенное представление путей и горловин парка станции, но позволяет показать принцип механизма описания и композиции элементов станции на основе сетей Петри. На практике определить узкие места и затруднения можно без приведенной выше модели. Если необходимо исследовать сложную динамическую систему с рядом параллельных процессов, которой являются техническая железнодорожная станция и

узел, тогда модели, построенные на основе сетей Петри, позволяют точно определять все возможные эксплуатационные затруднения.

Для более детального описания эксплуатационной работы станций, с учетом нормы времени на выполнение различных технологических операций, категории и характеристик транспортного потока, необходимо использовать возможности временной раскрашенной сети Петри. В такой сети переходы имеют затраты времени на выполнение, что приближает модель к поведению реальной системы или процесса. Метки могут отличаться и иметь собственные параметры, которые учитываются при активации и выполнении перехода. При этом раскрашенную сеть можно представить (привести) в виде простой сети Петри с одним видом маркера, что позволяет проводить анализ структуры сети, основанный только на его свойствах.

Список литературы

- 1 **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. – СПб.: Профессиональная литература, АйТи-Подготовка, 2014. – 400 с.
- 2 **Кузнецов, С. К.** Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем / С. К. Кузнецов, А. И. Потехин // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 937–946.

Получено 20.09.2022

V. G. Kozlov. Simulation of operational work railway stations and nodes based on Petri nets.

The evaluation of the transportation potential of railway transport is a complex scientific and practical task that can be solved by the method of simulation modeling of the transportation process. One of the mathematical tools that allows for the modeling of dynamic systems, such as transportation flows on railway infrastructure objects, is the Petri network. The simulation models of Petri networks are considered, based on which it is possible to determine the loading of infrastructure objects or their individual elements, as well as to predict operational difficulties in the operation of railway stations and nodes.