

Моделирование работы железнодорожного разъезда средствами Е-сетей

Грошев Василий Александрович,
*инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных
дорогах»*

Аннотация. Моделирование работы транспортной инфраструктуры позволяет определить узкие места технологии работы железнодорожных станций для ее усовершенствования. Существуют различные методы для математического представления объектов. Одним из них являются сети Петри. Их применение позволяет отобразить синхронные и асинхронные процессы и системы, что может быть удобно для железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: сети Петри, железнодорожный разъезд, Е-сети.

Modeling the operation of a railway siding by means of E-networks

Annotation. Modeling the operation of the transport infrastructure allows you to identify the bottlenecks of the technology of railway stations for its improvement. There are various methods for the mathematical representation of objects. One of them is Petri nets. Their use allows you to display synchronous and asynchronous processes and systems, which can be convenient for railway transport.

Keywords: Petri nets, railway sidings, E-nets.

Сети Петри являются математическим аппаратом, предназначенным для описания динамических систем и процессов. Впервые описаны в 1962 году.

К достоинствам сетей Петри относят [1]:

- возможность моделирования динамических процессов;
- представление недетерминированности, асинхронности и параллельности процессов;
- простота синтаксиса;
- наглядность модели.

За время своего существования они применялись для решения задач моделирования в различных областях [2].

Формально сеть Петри задается набором вида:

$$N = \langle V, D, E, M \rangle,$$

где V – конечное множество позиций, D – конечное множество переходов, E – множество дуг, M – начальная маркировка сети. Множество E , в свою очередь, подразделяется на Φ – множество прямых функций инцидентности и H – множество обратных функций инцидентности.

Графически сеть представляется в виде двудольного ориентированного графа, являющегося совокупностью позиций (вершин) и переходов (дуг) (рис. 1). Для представления динамики функционирования объекта моделирования в сеть Петри вводят функцию маркировки (M), которая является присвоением меток (фишек) конкретным позициям.

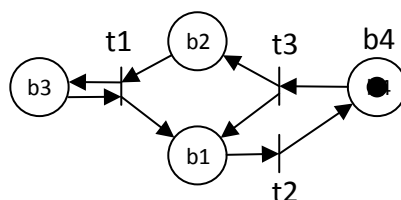


Рисунок 1 – Пример сети Петри

Ограниченность функционала классических сетей Петри обусловила разработку различных вариантов сетей Петри. Среди них выделяют:

- раскрашенные сети;
- приоритетные сети и сети с проверкой на нуль;
- сеть Мерлина;
- временные сети;
- Е-сети.

В представленной работе будет сделана попытка моделирования работы железнодорожного разъезда с помощью аппарата Е-сетей. Читателю, интересующемуся вопросами построения сетевых моделей других подклассов, стоит обратить свое внимание на работы [3-5].

Применение Е-сетей позволяет расширить возможности моделирования за счет применения дополнительно четырех типов переходов: разветвление, объединение, управляемое разветвление и приоритетное объединение (рис. 2). Также аппарат Е-сетей позволяет детализировать представление метки с помощью n описателей. Каждый описатель содержит количественную информацию об объекте ξ .

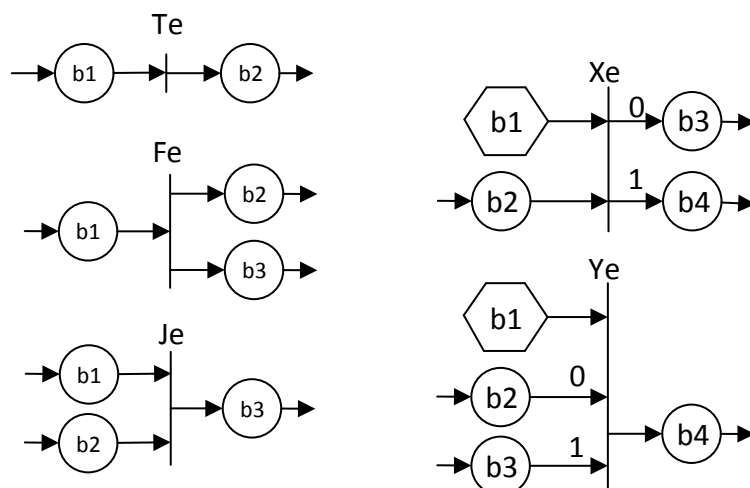


Рисунок 2 – Представление переходов в Е-сетях

Разъезд – раздельный пункт, расположенный на однопутном участке железной дороги и предназначенный для скрещения и обгона поездов. Для пропуска поездов и пассажирской работы на разъездах имеются следующие устройства: путевое развитие, помещения для дежурного и пассажиров, пассажирские платформы. В случаях, когда производится грузовая работа, оборудуется грузовой склад и погрузочно-выгрузочный путь.

Работа разъезда состоит из сквозного пропуска поездов по главному пути и пути приема с остановкой и отправлением поездов с бокового пути.

Постановка задачи

Представить работу разъезда с помощью аппарата Е-сетей. Сформировать множества позиций (В) и переходов (D), определить прямые (Ф) и обратные (Н) функции инцидентности и функцию маркировки сети (М).

В рамках решения задачи будем считать, что разъезд (рис.3) оборудован одним главным путем и двумя боковыми приемо-отправочными путями. Все пути – обозначенные. На третьем приемо-отправочном пути (3П) расположена пассажирская платформа, устройства для погрузки и выгрузки грузов отсутствуют.

При решении задачи считаем, что есть возможность приема поезда хотя бы на один путь.

Не рассматривается ситуация, когда поезда по пути следуют пакетным графиком.

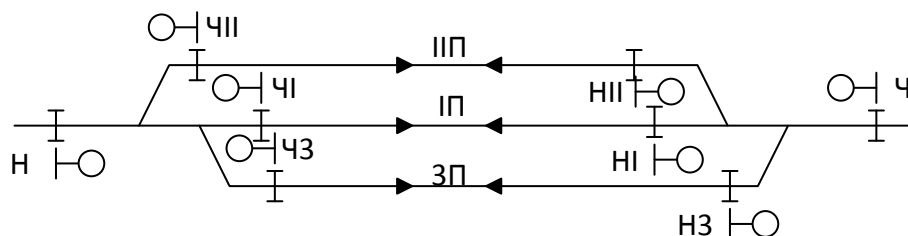


Рисунок 3 – Схема разъезда

Модель разъезда

Всю работу разъезда можно представить как совокупность операций по приему и отправлению поездов четного и нечетного направлений.

$$W = Re + Ro$$

$$Re = Rdei + Raei$$

$$Ro = Rdoi + Raoi$$

где W – работа разъезда;

Re, Ro – множество маршрутов четного и нечетного направлений;

Rdei, Raei, Rdoi, Raoi – маршруты отправления и приема четного и нечетного направлений по i-ому пути.

Различия между реализациями маршрутов заключаются в их характеристиках, среди которых: наличие и длительность остановки на разъезде, необходимость посадки высадки пассажиров.

В таком случае модель работы представленного на рисунке разъезда можно описать следующим множеством: {Rde1; Rae1; Rdo1; Rao1; Rde2; Rae2; Rdo2; Rao2; Rde3; Rae3; Rdo3; Rao3}.

На рис. 4 приведен граф Е-сетевой модели процессов приема и отправления четного поезда по пути 1П (Rde2 и Rae2). Поток поездов, прибывающих на станцию, задается генератором Ge, интервалы между поездами задаются внешней функцией ξ_1 .

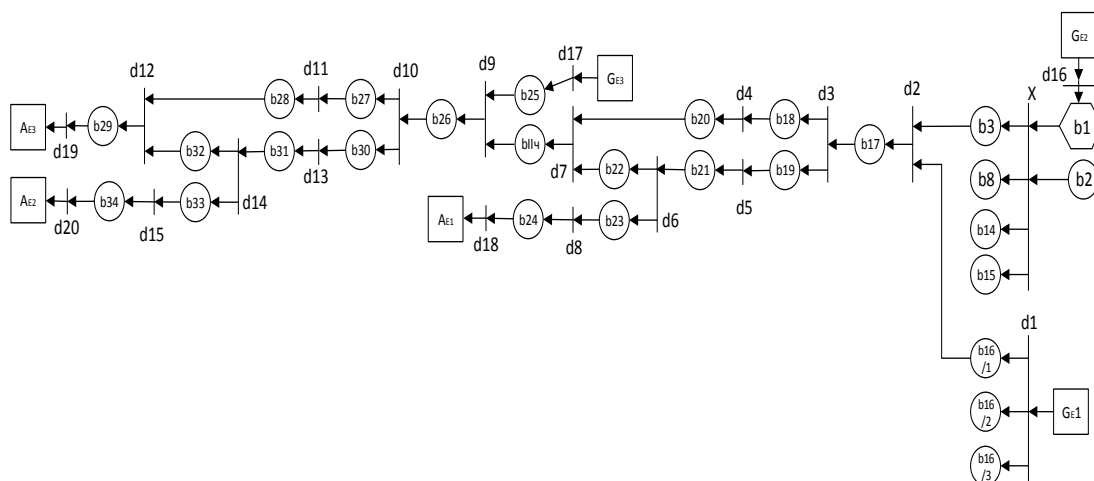


Рисунок 4 – Е-сетевой граф работы разъезда для приема и отправления поездов четного направления по пути ИП

Для построения графа необходимо указать позиции и переходы. В начале, определим множество позиций В:

- bii – поезд находится на приемо-отправочном пути;
- b1 – состояние устройств допускает установку маршрута на ИП;
- b2 – необходимо установить маршрут на ИП;
- b3 – маршрут установлен на ИП;
- b4 – необходимо установить маршрут на другой путь;
- b5 – функция приоритетности ИП и ЗП;
- b6 – необходимо установить маршрут на ИП;
- b7 – состояние устройств допускает установку маршрута на ИП;
- b8 – маршрут установлен на ИП;
- b9 – фиксация проверки возможности установки маршрута на ИП;
- b10 – необходимо установить маршрут на ЗП из-за приоритета;
- b11 – необходимо установить маршрут на ЗП из-за невозможности установить на ИП;
- b12 – состояние устройств допускает установку маршрута на ЗП;
- b13 – необходимо установить маршрут на ЗП;
- b14 – маршрут на ЗП установлен;
- b15 – установка маршрута на ЗП невозможна (установка маршрута приема невозможна);
- b16/1, b16/2, b16/3 – наличие поезда на участке приближения;
- b17 – начало приема поезда;
- b18 – поезд на маршруте приема Ч-ИП;
- b19 – входной сигнал Ч перекрыт;
- b20 - первая колесная пара вступила на приемо-отправочный путь ИП;
- b21 – последняя колесная пара вступила на маршрут;

- b22 – последняя колесная пара вступила на приемо-отправочный путь;
- b23 – освобождение последней секции маршрута;
- b24 – размыкание последней секции маршрута;
- b25 – светофор ЧП открыт;
- b26 – начало отправления поезда;
- b27 – поезд на маршруте отправления ЧП – УУ;
- b28 – первая колесная пара заняла УУ;
- b29 – поезд отправился со станции;
- b30 – выходной сигнал ЧП перекрыт;
- b31 – последняя колесная пара вступила на маршрут;
- b32 – последняя колесная пара на УУ;
- b33 – последняя секция свободная;
- b34 – последняя секция разомкнута;
- G_{E1} – генератор меток с функцией (E1) – поступление поездов на станцию;

- G_{E2} – генератор меток с функцией (E2) – характеристика технической возможности установки маршрута на путь приема (отсутствие отказов технических средств, свобода секций в маршруте приема и т.д.);

- G_{E3} – генератор меток с функцией (E3) – генерация метки установленного маршрута отправления;

- A_{E1} – терминатор меток с функцией (E1) – уничтожение метки после размыкания маршрута приема;

- A_{E2} – терминатор меток с функцией (E2) – уничтожение метки после проследования поезда по маршруту отправления;

- A_{E3} – терминатор меток с функцией (E3) – уничтожение метки после размыкания маршрута отправления;

Далее определим множество переходов D:

- X – макропереход, описывающий процесс выбора маршрута приема;

- d1 – фиксация занятия участка приближения;
- d2 – фиксация начала приема поезда;
- d3 – вступление поезда на маршрут приема Ч-ПП;
- d4 – вступление первой колесной пары на приемо-отправочный путь;

- d5 – освобождение УП (вступление последней колесной пары на маршрут);

- d6 – освобождение последней секции маршрута;
- d7 – фиксация прибытия поезда;
- d8 – размыкание последней секции маршрута;
- d9 – фиксация начала отправления поезда;
- d10 – вступление поезда на маршрут отправления;

- d11 – вступление первой колесной пары на УУ;
- d12 – фиксация отправления поезда;
- d13 – освобождение прямо-отправочного пути;
- d14 – освобождение последней секции маршрута;
- d15 – размыкание последней секции маршрута.

Моделирование процесса приема поезда на ИП. При поступлении метки от генератора Ge она поступает в позиции b16/1, b16/2, b16/3. Далее, в зависимости от установленного маршрута приема (результат выполнения макроперехода X (рис. 5), который описан подробнее далее), начинается моделирование приема поезда на путь (переход d2 и позиция b17). Время, затраченное на процесс выбора и установки маршрута $t(X)$, задается функцией ξ_2 . Моделирование передвижения включает в себя отображение перемещение первой (позиции b18, b20 и переходы d4, d7) и последней колесных пар (позиции b19, b21 – b23 и переходы d5, d6, d8). По первой паре фиксируется занятие секций и прямо-отправочного пути (позиции b18, b20), по последней – освобождение и размыкание секций (позиции b23, b24). Время следования по маршруту $t(d7)$ задается функцией ξ_3 . Занятие меткой позиции bii означает занятие прямо-отправочного пути прибывшим поездом[6].

Нахождение метки в позиции bii определяется необходимостью и длительностью остановки поезда на пути. Время этой остановки $t(d9)$ задается функцией ξ_{Pe} .

Отправление этого поезда в том же направлении (позиция b26 и переход d9) начинается после открытия выходного светофора ЧП (позиция b25). Моделирование производится аналогично операции приема поезда и строится на представлении проследования первой и последней колесных пар по маршруту. Окончанием моделирования является поступление метки в позицию b29.

Макропереход выбора пути приема X четного поезда имеет две входные позиции и четыре выходные. В случае технической возможности установки маршрута приема на ИП (позиция b1), например, исправности устройств ЖАТ и выполнимости условий безопасности движения поездов, а также при необходимости установки маршрута приема (позиция b2) производится установка маршрута приема на второй путь (позиция b3). Иначе, при отсутствии технической возможности (например, занятость ИП) возникает необходимость установки маршрута на другой путь (позиция b4). Позиция b5 задает приоритет ИП над ЗП при выборе маршрута приема для поездов четного направления. Выполнение этой функции (переход dx2) обуславливает необходимость установки маршрута на ИП. Переход dx2/1 позволяет поставить в позицию b9 метку о попытке установки маршрута приема по ИП. Далее проверяется техническая возможность установки маршрута (позиция b7). При наличии возможности маршрут устанавливается (позиция b8). При невозможности установки этого маршрута, производится проверка возможности установки маршрута на ЗП

(позиции b9-b13 и переходы dx4, dx5). Если маршрут установлен, метка переходит в позицию b14, иначе – в позицию b15, соответствующую невозможности установки маршрута.

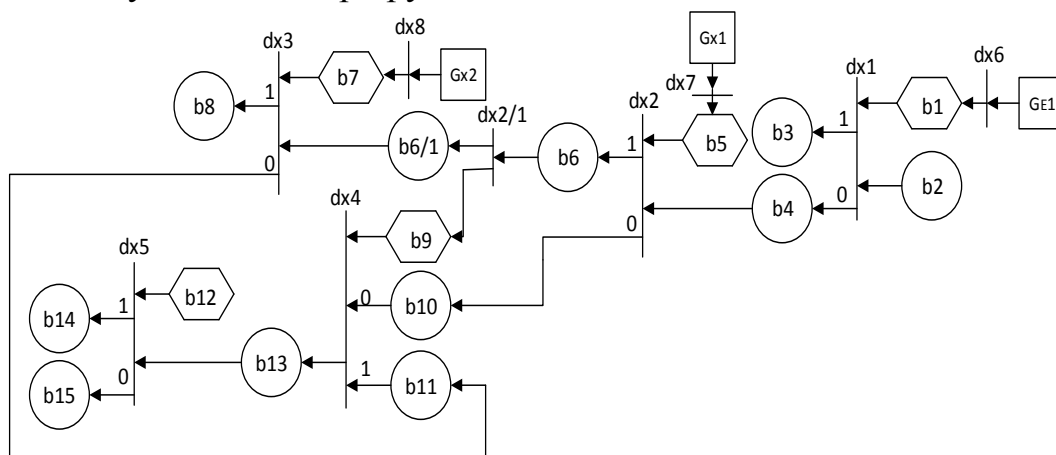


Рисунок 5 – Макропереход X

Аналогично строятся графы для моделирования следования поездов по четным маршрутам по 1-ому и 2-ому путям. Графы для нечетного направления следования зеркальны относительно представленных.

Опишем работу модели на следующем примере. В качестве исходных данных для работы модели, кроме технологии работы станции, выступает график движения поездов, в котором указаны номера поездов и времена прибытия и отправления с разъезда. Пример такого графика для временного интервала с 06-00 до 12-00 приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример графика движения поездов по разъезду

Нечетное направление			Четное направление		
№ поезда	Время прибытия	Время отправления	№ поезда	Время прибытия	Время отправления
693	06-30	06-35	3624	06-55	06-56
3395	07-20	07-21	3638	08-30	08-31
2397	07-30	07-31	694	08-45	08-55
125	07-55	08-15	52	09-40	09-41
79	09-15	09-16	3328	10-15	10-40
3755	10-10	10-45	144	10-25	10-26

Целью моделирования является заполнение таблицы 2 – состояние объектов инфраструктуры с помощью условных изображений. Строками обозначены объекты инфраструктуры: Н – нечетная горловина, Ч – четная горловина, 1П – первый путь, 2П – второй путь, 3П – третий путь, подход Н/Ч – подход с нечетной/четной стороны. Занятость объекта инфраструктуры будем фиксировать установкой значения “1” в ячейку объект/время[6].

Процедура начинается с имитации прибытия поезда №693 и отправляющегося в 06-35 в нечетном направлении. Т.к. это поезд нечетный,

следующий с остановкой, то его прием должен быть осуществлен на путь ЗП. Попадание метки в позицию установленного маршрута приема на ЗП фиксируется в ячейке Н/06-30. Т.к. следование по маршруту занимает время не более пары минут, то фиксация занятости пути осуществляется установкой “1” в ячейку ЗП/06-30 при попадании метки в позицию занятости приемо-отправочного пути. Фиксация отправления происходит по перемещению метки в позицию “Начало отправления”.

Моделирование следования остальных поездов происходит аналогично представленному.

Заключение

На основе предложенного подхода можно сделать следующие выводы:

1. Е-сети могут быть применены для моделирования работы инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Таблица 2 – Состояние объектов инфраструктуры

	06					07					08					09					10					11				
	00	10	20	30	40	50	00	10	20	30	40	50	00	10	20	30	40	50	00	10	20	30	40	50	00	10	20	30	40	50
Подход Н																														
Нечетная горловина																														
ІІП																														
ІП																														
ЗП																														
Четная горловина																														
Подход Ч																														



- занятость элемента прибытием/отправлением поезда



- занятость элемента остановкой поезда

2. При построении модели необходимо применение макропереходов, позволяющих снизить ее размеры за счет типового представления группы событий.

3. В качестве макропереходов станционной модели могут быть использованы подмодели отдельных технологических операций (например, прием или отправление поездов).

Список литературы

1. Мараховский В.Б. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. / В. Б. Мараховский, Л. Я. Розенблюм, А. В. Яковлев. – СПб.: Профессиональная литература, 2014. – 400 с.: ил.

2. Скородумов П.В. Моделирование экономических систем с помощью аппарата сетей Петри / П. В. Скородумов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2014. - №4. – с. 253–258.

3. Советов Б. Я. Моделирование систем : учебник для академического бакалавриата / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 7-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 343 с.

4. Панков С. В. Моделирование организации железнодорожного движения на основе сетей Петри / С. В. Панков, В. И. Складов // Вестник РГУПС. – 2002. - №1. – с. 108-112

5. Потехин А. И. Супервизорное управление железнодорожной системой на основе сетей Петри / А. И. Потехин, С. А. Браништов, С. К. Кузнецов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ - 2014) материалы науч.-практ. конф. – М.: Инст-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – 2014. – с. 4956 – 4965.

6. Яшин, М. Г. Вопросы безопасности железнодорожных транспортных систем / М. Г. Яшин // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2016 : материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29–30 ноября 2016 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2016. – С. 162-165.

7. Вилков В.Б., Большакова Л.В., Черных А.К., Яковлева Н.А. Применение методов оптимизации при выработке решений в обучении курсантов в образовательных организациях силовых структур //Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2017. № 2 (74). С. 165-172.

Данные об авторе:

Грошев Василий Александрович – инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФБГОУ ВО ПГУПС Императора Александра I

e-mail: was.groshev@yandex.ru