

УДК 656.212:519.87

Д. Н. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.diit.edu.ua

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

**Цель.** Статья направлена на создание математической модели функционирования железнодорожной станции для решения задач разработки станционной технологии на основании плана-графика. **Методика.** В качестве методов исследования использовались методы теории графов и объектно-ориентированного анализа. Модель плана-графика работы станции включает в себя: модель технического оснащения станции (сетка плана-графика) и модель процесса функционирования станции, которые формализованы на основании параметрических графов. **Результаты.** Представленная модель реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Программное обеспечение разработано на языках Visual LISP и Visual Basic. Учитывая, что построение плана-графика представляет преимущественно традиционный процесс добавления, удаления и модификации значков, то разработанный интерфейс является интуитивно понятным технологу и практически не требует дополнительного обучения. **Научная новизна.** На основании методов теории графов и объектно-ориентированного анализа создана математическая модель для оценки технико-технологических показателей работы железнодорожных станций, ориентированная на решение задач разработки технологии их работы. **Практическая значимость.** Предложенная математическая модель реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Наличие математической модели позволяет выполнять автоматический анализ плана-графика и, за счет этого, сократить продолжительность его создания более чем в два раза.

*Ключевые слова:* железнодорожная станция; технологический процесс; план-график работы; математическая модель

### Введение

Железнодорожные станции представляют собой многофазные многоканальные системы массового обслуживания. Оценка их технико-технологических показателей представляет достаточно сложную задачу и обычно осуществляется с помощью аналитических, графических и имитационных моделей. Аналитические модели позволяют использовать прямые методы оптимизации, однако отличаются низкой точностью, математический аппарат теории массового обслуживания не может адекватно описать реальные транспортные потоки и структуру обслуживаемых устройств. Различные имитационные модели, в которых технологический процесс формализован в виде сетей Петри [10–13], сетевых графиков [1], конечных автоматов [2–4, 6, 7] и др. позволяют детально исследовать влияние различных факторов на условия работы станций. В то же время слож-

ность формализации и необходимость больших затрат времени на описание технологии работы реальных станций существенно ограничивает возможность использования таких моделей на этапе разработки технологических процессов станций. В этих условиях основным методом оценки технико-технологических показателей функционирования железнодорожных станций является графическая модель в виде плана-графика. План-график имеет ряд существенных преимуществ, таких как: относительная простота построения, изменения и анализа. Поэтому разнообразные графики широко используются в железнодорожной практике с момента зарождения железнодорожного транспорта и по настоящее время. Вместе с этим графическое моделирование имеет и существенный недостаток – низкую скорость построения. С появлением персональных ЭВМ для построения планов-графиков работы станций начали широко использоваться универсальные графические редакторы, такие как: AutoCAD, CorelDraw и



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

изменение масштаба сетки и скрывание отдельных строк.

Функционирование станции представляется как процесс обслуживания объектов отдельными исполнителями. В качестве объектов могут рассматриваться вагоны, составы, локомотивы и др. Моделью обслуживания объекта является ориентированный граф  $G(O, L)$ . Вершинам графа соответствуют отдельные операции занятия исполнителей объектами во время обслуживания, а дугам – причинно-следственные связи между операциями. Каждой операции в соответствие поставлены идентификатор  $d_0$ , тип  $t_0$ , момент начала выполнения  $x_0$  и продолжительность  $w_0$ , резервные значения начала выполнения  $x_{0r}$  и продолжительности  $w_{0r}$ , ордината  $h_0$ , а также дополнительные параметры, соответствующие типу операции  $t_0$ . Структура графа  $G$  в памяти ЭВМ представляется списками инцидентности. При этом каждой вершине  $0$  в соответствие ставятся списки предшествующих  $p_0$  и последующих  $n_0$  вершин. Графическим отображением отдельной операции являются значки, которые реализованы в виде параметрических блоков AutoCAD [9]. Пример параметрического блока, отображающего значок прибытия поезда, представлен на рис. 2.

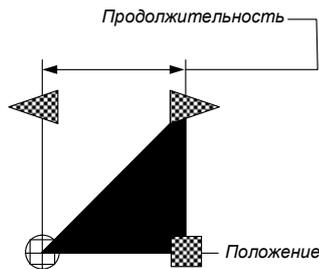


Рис. 2. Параметрический блок значка прибытия поезда

Добавление значка на план-график осуществляется в результате выбора манипулятором «мышь» его типа на панели инструментов и последующего указания точки вставки. При добавлении значка осуществляется поиск такой строки, для которой  $y_r \leq y_0$  и  $y_0 - y_r \rightarrow \min$ . В последствии осуществляется модификация параметра  $y_0$  так, что  $y_0 = y_r$ , обеспечивая тем

самым автоматическое позиционирование значка на строке.

Изменение положения и ширины значков может осуществляться с помощью «мыши» и соответствующих «ручек», которые появляются при выделении блока (см. рис. 2). Детальная настройка параметров значка осуществляется с помощью диалогового окна «Свойства», появляющегося при двойном щелчке «мышью» на соответствующем блоке (рис. 3).

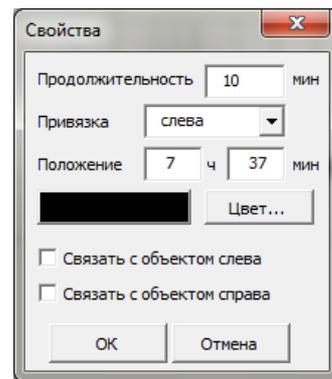


Рис. 3. Диалоговое окно редактирования свойств значка прибытия поезда

Создание последовательностей значков обеспечивается с помощью списков  $p_0$  и  $n_0$ . Заполнение списков  $p_0$  и  $n_0$  для выделенной группы объектов осуществляется автоматически. В процессе создания плана-графика выполняется контроль равенства параметров  $x_0$  и  $x_{0r}$ , а также  $w_0$  и  $w_{0r}$ . При обнаружении значка  $j$ , для которого данные условия нарушены, производится автоматическая модификация связанных с ним значков. При этом для всех значков, имеющих тот же идентификатор, что и значок  $j$ , значения параметров  $x_0$  и  $x_{0r}$  устанавливаются равными  $x_{0j}$ , а для параметров  $w_0$  и  $w_{0r}$  – равными  $w_{0j}$ . Далее рекуррентно производится модификация связанных значков. Модификация последующего значка осуществляется в том случае, когда  $x_{0j} + w_{0j} \neq x_0$ , а предшествующего – если  $x_0 + w_0 \neq x_{0j}$ . При этом, если значок обозначает простой или накопление, то выполняется изменение его продолжительности  $w_0$ , а модификация связанных значков производится только в том случае если

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$w_0 = 0$ . Для значков всех остальных типов модификация производится путем изменения параметра  $x_0$ .

### Результаты

В процессе исследований представленная модель была реализована в виде специализированного графического редактора на языке C++ [5] и в виде приложения к графическому пакету AutoCAD на языках Visual LISP и Visual Basic. Опыт эксплуатации программных комплексов показал, что более предпочтительным является вариант с адаптацией универсального графического пакета AutoCAD для решения задач разработки станционной технологии. Учитывая, что разработка плана-графика представляет преимущественно традиционный процесс добавления, удаления и модификации значков, то разработанный интерфейс является интуитивно понятным технологу и практически не требует дополнительного обучения. В то же время формальное представление процесса функционирования железнодорожной станции позволяет автоматически определять загрузку технических средств и исполнителей, а также в автоматизированном режиме формировать описание технологии в виде конечных автоматов [6].

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в создании математической модели для оценки технико-технологических показателей функционирования железнодорожных станций, ориентированной на решение задач разработки технологии их работы. Предложенная модель практически реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Полученный специализированный графический редактор позволяет автоматизировать часть рутинных операций, связанных с модифицированием графика и оценкой его показателей, снизить нагрузку на технологов при выполнении графических работ и высвободить их время для решения задач совершенствования станционной технологии.

### Выводы

1. Использование методов теории графов и методов объектно-ориентированного анализа позволяет реализовать математическую модель функционирования железнодорожной станции в виде плана-графика, ориентированного на решение задач разработки технологических процессов.

2. Реализация математической модели в графической среде AutoCAD позволяет создать специализированный графический редактор, ориентированный на задачи разработки станционной технологии. Использование универсального редактора обеспечивает получение интуитивно понятного интерфейса, не требующего от технологов существенных трудозатрат на обучение. В то же время за счет автоматизации задач модификации плана-графика и оценки его показателей на основании формализованных процедур с математической моделью достигается сокращение времени разработки технологии работы станции более чем в два раза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобровский, В. И. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно – диспетчерского персонала / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора // Математичне моделювання. – 2000. – № 2 (5). – С. 68–71.
2. Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Зб. наук. праць КУЕТТ : Сер. «Транспортні системи і технології». – К., 2004. – Вып. 5. – С. 80–86.
3. Бобровский, В. И. Техничко-економическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 6. – С. 17–21.
4. Вернигора, Р. В. Моделирование работы систем станционной автоматики в эргатических имитационных моделях железнодорожных станций / Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень». – Д., 2011. – Вип. 2. – С. 31–37.
5. Козаченко, Д. Н. Комплексный анализ железнодорожной инфраструктуры металлургического

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- комбината на основе графоаналитического моделирования / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень». – Д., 2011. – Вип. 4. – С. 55–60.
6. Козаченко, Д. М. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану - графіку / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 4 (70). – С. 18–20.
  7. Коробйова, Р. Г. Адекватність математичних моделей для визначення техніко-експлуатаційних показників роботи станцій / Р. Г. Коробйова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 28. – С. 29–33.
  8. Коробьева, Р. Г. Информационная модель для анализа станционных процессов на ЭВМ / Р. Г. Коробьева // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 50–54.
  9. Орлов, А. AutoCAD 2013 (+CD) / А. Орлов – СПб. : Питер, 2013. – 384 с.
  10. Сукач, Е. И. Стенд имитационного моделирования сортировочной станции железнодорожной сети / Е. И. Сукач // Проблемы програмування. – 2009. – № 3. – С. 81–89.
  11. Giua, A. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets / A. Giua, C. Seatzu // IEEE Trans. on Automation Science and Engineering. – 2008. – Vol. 5, № 3. – P. 431–445.
  12. Milinkovic, S. A fuzzy Petri net model to estimate train delays / S. Milinkovic, M. Markovic, S. Veskovic, M. Ivic, N. Pavlovic // Simulation Modeling Practice and Theory. – 2013. – № 33. – P. 144–157.
  13. Szűcs, G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System / G. Szucs // Journal of Computing and Information Technology – CIT. – 2001. – Vol. 9, № 2. – P.133–142.

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upr.diit.edu.ua

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

**Мета.** Стаття спрямована на створення математичної моделі функціонування залізничної станції для вирішення задач розробки станційної технології на підставі плану-графіка. **Методика.** В якості методів дослідження використовувалися методи теорії графів і об'єктно-орієнтованого аналізу. Модель плану-графіка роботи станції включає в себе модель технічного оснащення станції (сітка плану-графіка) і модель процесу функціонування станції, які формалізовані на підставі параметричних графів. **Результати.** Представлена модель реалізована у вигляді додатку до графічного пакету AutoCAD. Програмне забезпечення розроблене на мовах Visual LISP і Visual Basic. Враховуючи, що побудова плану-графіка являє переважно традиційний процес додавання, видалення та модифікації значків, то розроблений інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим технологу і практично не вимагає додаткового навчання. **Наукова новизна.** На підставі методів теорії графів і об'єктно-орієнтованого аналізу створена математична модель для оцінки техніко-технологічних показників роботи залізничних станцій, яка орієнтована на вирішення завдань розробки технології їх роботи. **Практична значимість.** Наведена математична модель реалізована у вигляді додатку до графічного пакету AutoCAD. Наявність математичної моделі дозволяє виконувати автоматичний аналіз плану-графіка і, за рахунок цього, забезпечує скорочення тривалості його створення більше ніж у два рази.

*Ключові слова:* залізнична станція; технологічний процес; план-графік роботи; математична модель

D. M. KOZACHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua

## MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL INDICATORS OF RAILWAY STATIONS OPERATION

**Purpose.** The article aims to create a mathematical model of the railway station functioning for the solving of problems of station technology development on the plan-schedule basis. **Methodology.** The methods of graph theory and object-oriented analysis are used as research methods. The model of the station activity plan-schedule includes a model of technical equipment of the station (plan-schedule net) and a model of the station functioning, which are formalized on the basis of parametric graphs. **Findings.** The presented model is implemented as an application to the graphics package AutoCAD. The software is developed in Visual LISP and Visual Basic. Taking into account that the construction of the plan-schedule is mostly a traditional process of adding, deleting, and modifying of icons, the developed interface is intuitively understandable for a technologist and practically does not require additional training. **Originality.** A mathematical model was created on the basis of the theory of graphs and object-oriented analysis in order to evaluate the technical and process of railway stations indicators; it is focused on solving problems of technology development of their work. **Practical value.** The proposed mathematical model is implemented as an application to the graphics package of AutoCAD. The presence of a mathematical model allows carrying out an automatic analysis of the plan-schedule and, thereby, reducing the period of its creation more than twice.

*Keywords:* railway station; the manufacturing process; plan-schedule of work; mathematical model

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Vernigora R.V. Funktsionalnoye modelirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy v trenazherakh operativno - dispetcherskogo personala [Functional modeling of railway stations in simulators of operational - dispatching personnel]. *Matematychnye modelivannia – Mathematical modeling*, 2000, no. 2 (5), pp. 68-71.
2. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Ergaticheskiye modeli zheleznodorozhnykh stantsiy [Ergatic models of railway stations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Seriya "Transportni systemy i tekhnolohii"* [Proc. of State Economy and Technology University of Transport: Series "Transportation Systems and Technology"], 2004, issue 5, pp. 80-86.
3. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Tekhniko-ekonomicheskoye upravleniye zheleznodorozhnyimi stantsiyami na osnove ergaticheskikh modeley [Technical and economic management of railway stations on the basis of ergatic models]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information management systems for railways transport*, 2004, no. 6, pp. 17-21.
4. Vernigora R.V., Malashkin V.V. Modelirovaniye raboty sistem stantsionnoy avtomatiki v ergaticheskikh imitatsionnykh modelyakh zheleznodorozhnykh stantsiy [Modelling of the station automation systems operation in ergatic simulations of railway stations]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen* [Transport systems and technologies of transportation], 2011, issue 2, pp. 31-37.
5. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Berezovyy N.I. Kompleksnyy analiz zheleznodorozhnoy infrastruktury metallurgicheskogo kombinata na osnove grafoanaliticheskogo modelirovaniya [Comprehensive analysis of railway infrastructure in iron and steel mill on the graphic-analytical modelling base]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen* [Transport systems and technologies of transportation], 2011, issue 4, pp. 55-60.
6. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Korobiova R.H. Prohramnyi kompleks dlia imitatsiynoho modelivannia roboty zaliznychnykh stantsii na osnovi dobovoho planu – hrafiku [Software system for simulation of railway stations operation based on a daily plan - schedule]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2008, no. 4 (70), pp. 18-20.
7. Korobiova R.H. Adekvatnist matematychnykh modelei dlia vyznachennia tekhniko-eksploatatsiynykh pokaznykiv roboty stantsii [Adequacy of mathematical models for determining the technical and process indicators of station activity]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 29-33.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Korobeva R.G. Informatsionnaya model dlya analiza stantsionnykh protsessov na EVM [The information model for the analysis of station processes on a computer]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 50-54.
9. Orlov A. AutoCAD 2013 (+CD). Saint Petersburg, Piter Publ., 2013, 384 p.
10. Sukach Ye.I. Stend imitatsionnogo modelirovaniya sortirovochnoy stantsii zheleznodorozhnoy seti [The stand of freight yard simulation model in rail network]. *Problemy prohramuvannia – Problems in programming*, 2009, no. 3, pp. 81-89.
11. Giua A., Seatzu C. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 431-445.
12. Milinkovic S., Markovic M., Veskovic S., Ivic M., Pavlovic N. A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2013, no. 33, pp. 144-157.
13. Szücs G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System. *Journal of Computing and Information Technology, CIT*, 2001, vol. 9, no. 2, pp.133-142.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. И. Бобровским (Украина); д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.11.2012

Принята к печати 03.06.2013