

# STAGES OF DEVELOPMENT, METHODS AND INTELLECTUALIZATION OF AUTOMATED SCHEDULING OF METRO PASSENGER TRAINS

Baranov Leonid Avramovich, Safronov Anton Igorevich, Sidorenko Valentina Gennadievna

*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*

Contribution on the State of the Art

<https://doi.org/10.7251/JIT2202077A>

UDC: 621.3.049:069(747).02

**Abstract:** the article examines the underground passenger trains planned schedule automated construction system development stages. The technical means, basic methods and information technologies applied at system development stages aimed at its intellectualization, the ways of its integration into the Unified vehicles control automated traffic intelligent system on urban rail transport systems are described.

**Keywords:** transportation scheduling, automation, autodrivers, speech recognition, machine learning, artificial intelligence, uniformity, information technologies, intelligent transport systems, unified intelligent automated vehicle traffic control system.

## INTRODUCTION

This article discusses the stages of development of an automated system for constructing planned schedules for the movement of metro passenger trains, based on the work performed at the Russian University of Transport (RUT).

The first work on planning the transportation process on the subway dates back to 1975 [1, 2]. In the future, with the development of technical means of automation, computer technology and modern information technologies (IT), the conducted research in the field of automation of the planning of the transportation process on the subway made it possible to combine in one control system the areas associated with the construction of:

- planned schedules for the movement of passenger trains of the subway (PGD PPM) [3],
- graphs of the turnover of electric rolling stock (GO EPS) on metro lines [4, 5],
- work schedules of locomotive crews (GRB) [6, 7].

When solving the problems of automating the preparation of these regulatory documents, the need to integrate algorithms into the Unified Sys-

tem for coordinating various parameters used in planning the movement of trains along metro lines is taken into account. Such an automated building system (ASP) was introduced into commercial operation at the Moscow Metro in 2004 [3].

The experience of implementing and maintaining the ASP PGD RPM made it possible to enrich its content with the knowledge available to the employees of the interacting Services: traffic and rolling stock of the subway.

Taking into account the multivariance of each of the problems being solved, various optimization methods were used: the Hungarian algorithm (Mankres-Kuhn algorithm) [5], the recursive Bellman dynamic programming algorithm [5], the gradient method [8], the Euclid integer division algorithm [9], the algorithm for finding uniform arrangements [9], genetic algorithms (GA) [10], artificial immune system algorithm (IIS) and others, allowing to obtain a set of solutions that satisfy the formulated technical conditions of the real operation of the subway line.

To improve the GA, a rich statistical material available at the Moscow Metro was used - the experience of graphic engineers.

Taking into account the complexity of the task of controlling the movement of urban rail vehicles, the problem of “fitting” the ASP PGD PPM into the Unified Intelligent System for Automated Traffic Control of Vehicles on Urban Rail Transport Systems (GRTS) was simultaneously solved.

Next, the stages of solving the tasks of automating the planning of the transportation process on the subway, the results of the implementation of the ASP PGD PPM on the subway will be considered, and the prospects for its development are outlined.

### **Stage of development of automation technology for the construction of PGD PPM**

In the first works, the problem of constructing “threads” is formalized using recursive equations, the methodology for constructing “threads” of PGD RPM is carried out, the features of the ring model of the metro line are described: the movement of trains along the reverse dead ends during the station turn is considered as movement along an additional stage [1, 2]. The ring model allows you to work with radial lines based on the principles formulated for ring lines. In [2], the model was implemented on the ES-1033 computer for the Koltsevaya and Zhdanovsko-Krasnopresnenskaya (now: Tagansko-Krasnopresnenskaya) lines.

The model for the Zhdanovsko-Krasnopresnenskaya line was implemented on an ES-1030 computer and supplemented with a driver for printing out the PGD PPM on a BENSON graph plotter [11].

At this time, a heuristic matching of PGD PPM with GO EPS was performed without taking into account the actual breakdown of shifts of GRLB [12]. The work was done on the example of the Kalinin line. The experience of using the “BENSON” graph plotter to print out the results of constructing the PGD PPM is described in [11, 12].

### **Stage of trial use of ASP PGD PPM**

The provision of the Moscow Metro with more powerful computer facilities made it possible to continue experimentally research in the field of automation of the planning of the transportation process with the participation of technologists - graphic engineers.

At the stage under consideration, in parallel with the PGD PPM, algorithmic and software are devel-

oped for constructing a schedule of the executed movement (GTS) according to the data coming through the dispatcher control channels.

This experience has shown the need to develop serious tools for manual adjustment of PGD PPM, their coordination with the GO EPS and the need to take into account the GRLB. In addition, the availability of software tools for building PGD PPM on a personal computer (PC) made it possible to use the rich knowledge base available to graph engineers to take into account the features of specific metro lines and the capabilities of the electric depot serving these lines [13].

Already at this stage, as restrictions imposed on the adoption of managerial decisions during planning, when changing the pairing of train traffic, the fact that the drivers can correctly implement no more than 2-3 control modes with the times of the non-parallel schedule [14] is taken into account, which makes it necessary to achieve more accurate alignment intervals of train movement, additionally introduce super-mode exposures (SRV) [14].

When constructing a PGD PPM under conditions of limited control resources [7, 15], qualitative results were achieved using a technique related to the use of a scenario approach to solving the problem of automated construction of a PGD PPM [16].

The limitation of control resources is determined by train movement intervals close to the minimum possible, restrictions on electric depots and inspection points for electric rolling stock.

Scenarios are understood as a set of phase states of an object and the environment, called expertly significant events (ESEs) and the expected conditions for the functioning of the system, contained in the quasi-informational hypotheses of the decision maker (KIG DMP). To develop control actions, logic-transformational rules (LTP) are used, which include imperatives, united by logic, to describe the movement of metro trains.

LTPs contain cause-and-effect relationships between events that are convenient for describing technological processes of PGD RPM based on the apparatus of Petri nets. With their help, imperatives and inverse imperatives are described, which are necessary for recursive enumeration of options in the automated construction of a PGD PPM on a PC [13].

The recursive enumeration of options for constructing a PGD PPM [13] required a thorough study of the issues of organizing an ergonomic graphical user interface of the software for visualizing a PGD PPM [17]. The experience of using the mathematical apparatus of Petri nets became the basis for its use in describing the man-machine procedure for constructing a PGD RPM. This made it possible to increase the speed of the calculations performed when using single-core microprocessor architectures.

In [8], a multi-level semantic model for constructing a PGD PPM is formalized, a method for finding the optimal distribution of train intervals is presented, which works on the principle of gradient descent. The ideas presented in [8] are implemented in the implemented ASP PGD MRP (compiled in Visual Basic 6.0).

### **Stage of organization of information interaction of Metro Services**

At the stage under consideration, the achievements of the second stage were used. The tasks of using the communication channels of the metro line for the correct operation of telecontrol and telesignaling devices during the construction of the GID were solved, and the quality of the construction of the GID was analyzed [17]. Separately, work began on the scheduling of locomotive crews. At the same stage, it became clear that the calculated values obtained as a result of the work of the ASP PGD RPM can be used as input data by other systems, which required the development of software add-ons for fragmentary uploading of information agreed by other Metro Services, as well as with other organizations, monitoring the quality of the work of the subway.

In different years of industrial operation of ASP PGD RPM, the following was implemented:

- transfer of data on the compiler of the PGD PPM, the date of commencement of work according to the PGD PPM, the type of arrangement, days of work, "threads", GO EPS, electric depot, routes, types of repairs / inspections and metro line stations in XML format for scheduling locomotive crews;
- transmission of data on the departure times of passenger trains from stations according to the "threads" for estimating the occupancy of cars, with the current values of passenger

flows (the task of the Information and Computing Center (ICC) of the Moscow Metro and the Department of Transport of the City of Moscow);

- transfer of the PGD PPM in text format for its restoration by the staff of the metro's information and computing center in the AutoCAD computer-aided design system and the subsequent formation of a text adapted for placement on forms of timetable cards issued to machinists;
- transmission of data on the "threads" for predicting the arrival times of trains at the station in order to inform passengers about this by displaying it on the boards placed at the ends of the platforms from the side of the "tails" of arriving trains;
- transfer of data about the "threads" for their restoration in one of the systems created by the Macomnet company, for the implementation of a set of hardware and software tools necessary to launch the Unified Dispatch Center of the Moscow Metro into operation [18].

### **The stage of replication of methods for automating the planning of the transportation process for various lines of the Moscow Metro**

During this period, ASP PGD PPM was put into commercial operation at the Moscow Metro.

Manual construction of a PGD PPM, corresponding to the given dimensions of movement and GO EPS, takes from 1.5 to 3 months, depending on the complexity of the line and the qualifications of the graphic engineer. In this regard, the availability of an automated system that simplifies the performance of these works by replicating control actions, leading to a quick result of constructing a PDM PPM, is an economically justified step.

At this stage, the features of the subway lines that affect the type of PGD PPM were revealed [13]. These features are listed below.

The ring line (ring) of the Moscow Metro belongs to a special type of lines. It consists of two independent paths, each of which is a closed loop [13].

Radial lines are lines on which the main paths are not closed contours. Trains serving the line during the working day make transitions between the main

tracks, turning around at the end or intermediate stations with track development.

Among the many radial lines, a special place is occupied by lines with “fork” movement. “Forklift” movement is such an organization of the work of the line, in which the movement of trains is carried out in various sections after passing through the branching station. A junction station is a station, the path to which is the same for all line trains, and after it is different for some of the line trains. This organization of movement affects the type of PGD PPM [19].

A special case of the “fork” movement is the PGD zone-type PPM (GZT). In [19], the automation of compiling a fragment of the PGD PPM with a “fork” movement is considered on the example of the Filyovskaya line, and the GZT is considered on the example of the Lyublinsko-Dmitrovskaya line [15].

At this stage, the issue of ASP PGD PPM maintenance was especially acute, which included such activities as: personnel training, adjustment of the set of service functions with the ever-increasing requirements of graphic engineers [17], as well as setting up peripheral devices associated with the system.

This period includes the formalization of the tasks of machine construction of the GRLB, “layouts” (template tables) for issuing train schedules, as well as printing train schedule cards issued to train drivers on flights [20].

The stage is associated with the use of energy-saving technologies [21, 22], with the transfer of several lines to the service of the new (at that time) Rusich electric rolling stock (81-740/741; production: 2003-2013) with asynchronous motors that provide opportunities performing regenerative braking [22].

The same period includes the implementation of automated calculation of performance indicators using ASP PGD PPM [17]. When calculating performance indicators manually in the Traffic Service, it is customary to use section travel times, in the ASP PGD RPM, the calculation problem was solved when considering each stage for each constructed “thread”. A different scheme was required for outputting the results of the calculation with the grouping of hauls into sections along which trains move along the “threads” according to the PGD PPM. Changes in the calculation scheme have significantly affected the graphical user interface of the ASP PGD PPM. From the point of view of the development of

service functions, the ability to export calculated data to Microsoft Office Excel spreadsheets was added, which made it possible to print on a printer or plotter, bypassing programming direct interaction with the printer driver through ASP PGD PPM.

The completion of this stage was the development of principles for the inclusion of ASP PGD PPM in the general digital space of the metro line, as well as the applicability of the automated system to the construction of PGD PPM for other types of GRTS.

### **The stage of applying new IT, digitalization and intellectualization of passenger traffic planning processes, operational and shunting work**

At this stage, mainly, the issues of automating the compilation of GO EPS were solved. The main object of management of the HE EPS is repair (inspection). Let’s introduce the definition of the term “repair” in the context of considering GO EPS and PGD PPM. Repair is a tuple whose components determine the type, time and place of technical inspection (TO) or current repair (TR) assigned to the route.

In [5], a flow diagram for constructing a PGD PPM, coupled with the EPS GO using the Event-driven Process Chain (EPC) concept, was drawn up; an algorithm for the automated appointment of technical inspections of the first scope of work (TO-1) was compiled, taking into account the limitations and factors affecting the type of PPM PGD [13]. To solve the problem of automated compilation of GO EPS, the “Hungarian algorithm” (Mankres-Kun algorithm) is proposed, which works well only “in statics”. To obtain a solution to the problem “in dynamics”, a recursive method of dynamic programming (planning) by Bellman is proposed.

The problem of efficient use of parking space is solved on the example of the subway using graph theory. Visualization of the resulting trees and densified graphs is performed by the Graphviz utility package [4].

Greater efficiency in solving the problem of automated compilation of GO EPS made it possible to achieve GA [10]. Later, the automated subsystem for compiling GO EPS, developed on the basis of GA, was contextually considered as IIS.

An analysis was made of the applicability of artificial intelligence and, in particular, machine learn-

ing [6] to the tasks of automating the planning of the transportation process on the subway [7, 10].

Along with the search for a solution to the problem of automating the compilation of GO EPS, the idea expressed in [13] about the possibility of applying the apparatus of parallel computing to the recursive procedure for the automated construction of PGD PPM processes has been developed and put into practice. A multi-threaded model (Threading) based on design patterns is implemented in the Microsoft Visual Studio environment in the Visual C# language in the new generation ASP PGD PPM ("Graphist's Workstation 2.0") [23].

In the process of digitalization, the intensive development of intelligent transport control systems of the GRTS has been outlined [24].

### **The stage of taking into account the peculiarities of compiling PGD PPM in the presence of automatic train guidance systems on metro lines**

The stage is characterized by the possibility of performing a given number of travel times along the haul, implemented by the automatic control system, which made it possible to abandon the RTS when aligning the inter-train intervals during the planning of transients of the DGD PPM. When implementing travel times along the subway line without RTS, a reduction in the energy consumption spent on traction is achieved.

The existing knowledge base is sufficient for today to predict the quality of the work of the Moscow Metro in the conditions of train traffic without drivers according to the fourth degree of automation of the railway infrastructure according to the IEC 62290-1: Grades of Automation 4 (GoA 4) standard. The work is carried out taking into account the possibility of implementing energy-efficient PGD PPM [14].

A significant amount of work is associated with the satisfaction of requests from graphic engineers for the elimination of RTS. Algorithms have been created for redistributing the RTS for travel times along the hauls. It is shown in [14] that this provides an opportunity to save energy at the planning stage of the transportation process, but only if it works according to the automatic guidance system compiled by the PGD PPM, since no experienced driver is able to fulfill that many different travel times of the non-parallel schedule obtained in as a result of the redistribution of the RTS by the travel times along the hauls.

### **CONCLUSION**

1. The analysis of the development of an automated system for constructing planned schedules for the movement of metro passenger trains proves the relevance of introducing this system to work in metro conditions.

2. The development of an automated system for constructing planned schedules for the movement of metro passenger trains is aimed at "fitting" it into the Unified Intelligent System for Automated Control of Vehicle Traffic on Urban Rail Transport Systems.

3. The use of intelligent algorithms in an automated system for constructing planned schedules for the movement of metro passenger trains makes it possible to effectively solve the problems of planning the transportation process.

### **Acknowledgements**

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, NTU Sirius, JSC Russian Railways and the Talent and Success Educational Foundation within the framework of the scientific project No. 20-37-51001 (Application 2020): transport systems (GRTS) based on big data technology.

### **INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**Baranov Leonid Avramovich** - Head of the Department "Management and Information Protection" of the Russian University of Transport (MIIT)  
academic degree: doctor of technical sciences  
academic title: professor  
e-mail: baranov.miiit@gmail.com

**Safronov Anton Igorevich** - Associate Professor of the Department of Information Management and Security, Russian Uni-

versity of Transport (MIIT)  
academic degree: candidate of technical sciences  
academic title: associate professor

**Sidorenko Valentina Gennadievna** - Professor of the Department of Information Management and Security, Russian University of Transport (MIIT)  
academic degree: doctor of technical sciences  
academic title: professor

# ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ, МЕТОДЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОСТАВЛЕНИЯ ПЛАНОВЫХ ГРАФИКОВ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Баранов Леонид Аврамович, Сафронов Антон Игоревич, Сидоренко Валентина  
Геннадьевна

*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, baranov.miit@gmail.com*

Оригинальная научная статья

**Аннотация:** в статье рассмотрены этапы развития автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена. Описаны технические средства, основные методы и информационные технологии, применённые на этапах развития системы, направленные на её интеллектуализацию, пути её интеграции в Единую интеллектуальную систему автоматизированного управления движением транспортных средств на городских рельсовых транспортных системах.

**Ключевые слова:** планирование перевозочного процесса, автоматизация, автоведение, распознавание речи, машинное обучения, искусственный интеллект, равномерность, информационные технологии, интеллектуальные транспортные системы, единая интеллектуальная система автоматизированного управления движением транспортных средств.

## ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассмотрены этапы развития автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена, основанных на работах, выполненных в Российском университете транспорта (РУТ).

Первые работы по планированию перевозочного процесса на метрополитене относятся к 1975 году [1, 2]. В дальнейшем с развитием технических средств автоматизации, вычислительной техники и современных информационных технологий (ИТ) проведённые исследования в области автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене позволили объединить в одной системе управления на правления, связанные с построением:

- плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена (ПГД ППМ) [3],
- графиков оборота электроподвижного состава (ГО ЭПС) на линиях метрополитена [4, 5],

- графиков работы локомотивных бригад (ГРЛБ) [6, 7].

При решении задач автоматизации составления этих нормативных документов учитывается необходимость интеграции алгоритмов в Единую систему для согласования различных параметров, используемых при планировании движения поездов по линиям метрополитена. Такая автоматизированная система построения (АСП) внедрена в промышленную эксплуатацию на Московском метрополитене в 2004 году [3].

Опыт внедрения и сопровождения АСП ПГД ППМ позволил обогатить её содержимое знаниями, имеющимися у сотрудников взаимодействующих Служб: движения и подвижного состава метрополитена.

Учитывая многовариантность каждой из решаемых задач использовались различные методы оптимизации: Венгерский алгоритм (алгоритм Манкреса-Куна) [5], рекурсивный алгоритм динамического программирования Беллма-

на [5], метод градиентов [8], алгоритм целочисленного деления Евклида [9], алгоритм поиска равномерных расположений [9], генетические алгоритмы (ГА) [10], алгоритм искусственной иммунной системы (ИИС) и другие, позволяющие получать множества решений, удовлетворяющих сформулированным техническим условиям реальной работы линии метрополитена.

Для совершенствования ГА использован богатый статистический материал, имеющийся на Московском метрополитене – опыт работы инженеров-графистов.

Учитывая комплексность задачи управления движением городских рельсовых транспортных средств параллельно решалась проблема «вписывания» АСП ПГД ППМ в Единую интеллектуальную систему автоматизированного управления движением транспортных средств на городских рельсовых транспортных системах (ГРТС).

Далее будут рассмотрены этапы решения задач автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене, результаты внедрения АСП ПГД ППМ на метрополитене, намечены перспективы её развития.

### **Этап разработки технологии автоматизации построения ПГД ППМ**

В первых работах проводится формализация задачи построения «ниток» с использованием рекуррентных уравнений, методология построения «ниток» ПГД ППМ, описываются особенности кольцевой модели линии метрополитена: движение поездов по оборотным тупикам во время станционного оборота рассматривается как движение по дополнительному перегону [1, 2]. Кольцевая модель позволяет работать с радиальными линиями на основе принципов, сформулированных для кольцевых линий. В [2] модель реализована на ЭВМ ЕС-1033 для Кольцевой и Ждановско-Краснопресненской (ныне: Таганско-Краснопресненской) линий.

Модель для Ждановско-Краснопресненской линии реализована на ЭВМ ЕС-1030 и дополнена драйвером для распечатки ПГД ППМ на графопостроителе «БЕНСОН» [11].

В это время выполнено эвристическое согласование ПГД ППМ с ГО ЭПС без учёта реальной разбивки смен ГРЛБ [12]. Работа сделана на при-

мере Калининской линии. Опыт использования графопостроителя «БЕНСОН» для распечатки полученных результатов построения ПГД ППМ описан в [11, 12].

### **Этап опытного использования АСП ПГД ППМ**

Обеспечение Московского метрополитена более мощными средствами вычислительной техники позволило в опытном порядке продолжить исследования в области автоматизации планирования перевозочного процесса при участии технологов – инженеров-графистов.

На рассматриваемом этапе параллельно с ПГД ППМ разрабатываются алгоритмическое и программное обеспечение для построения графика исполненного движения (ГИД) по данным, поступающим по каналам диспетчерского контроля.

Этот опыт показал необходимость разработки серьёзного инструментария для ручной корректировки ПГД ППМ, их согласования с ГО ЭПС и необходимостью учёта ГРЛБ. Кроме того, наличие программного инструментария для построения ПГД ППМ на персональном компьютере (ПК) позволило использовать богатую базу знаний, имеющуюся у инженеров-графистов для учёта особенностей конкретных линий метрополитена и возможностей электродепо, обслуживающих эти линии [13].

Уже на этом этапе в качестве ограничений, накладываемых на принятие управленческих решений при планировании, при изменении парности движения поездов учитывается факт возможности безошибочной реализации машинистами не более 2-3 режимов управления со временами хода непараллельного графика [14], что заставляет для достижения более точного выравнивания интервалов движения поездов дополнительно вводить сверхрежимные выдержки (СРВ) [14].

При построении ПГД ППМ в условиях ограниченных ресурсов управления [7, 15] качественных результатов позволила добиться методика, связанная с применением сценарного подхода к решению задачи автоматизированного построения ПГД ППМ [16].

Ограничение ресурсов управления определяется интервалами движения поездов, близки-

ми к минимально возможным, ограничениями по электродепо и пунктам осмотра электроподвижного состава.

Под сценариями понимается совокупность фазовых состояний объекта и внешней среды, называемых экспертно значимыми событиями (ЭЗС) и предполагаемых условий функционирования системы, заключённых в квазиинформационных гипотезах лица, принимающего решения (КИГ ЛПР). Для выработки управляющих воздействий используются логико-трансформационные правила (ЛТП), включающие в себя императивы, объединённые логикой, для описания движения поездов метрополитена.

ЛТП содержат причинно-следственные связи между событиями, удобные для описания технологических процессов ПГД ППМ на базе аппарата сетей Петри. С их помощью описаны императивы и обратные императивы, необходимые для рекурсивного перебора вариантов при автоматизированном построении ПГД ППМ на ПК [13].

Рекурсивный перебор вариантов построения ПГД ППМ [13] потребовал тщательной проработки вопросов организации эргономичного графического пользовательского интерфейса программного обеспечения при визуализации ПГД ППМ [17]. Опыт применения математического аппарата сетей Петри стал основой для использования его при описании человеко-машинной процедуры построения ПГД ППМ. Это позволило повысить быстродействие производимых вычислений при использовании одноядерных микропроцессорных архитектур.

В [8] формализована многоуровневая семантическая модель построения ПГД ППМ, представлен метод поиска оптимального распределения интервалов движения поездов, работающий по принципу градиентного спуска. Идеи, изложенные в [8], реализованы во внедрённой АСП ПГД ППМ (составленной на языке *Visual Basic 6.0*).

### Этап организации информационного взаимодействия Служб метрополитена

На рассматриваемом этапе использованы достижения второго этапа. Решались задачи задействования каналов связи линии метрополитена для корректной работы устройств телеуправле-

ния и телесигнализации при построении ГИД, выполнялся анализ качества построения ГИД [17]. Отдельно начались работы по составлению расписания локомотивных бригад. На этом же этапе стало понятно, что расчётные значения, получаемые в результате работы АСП ПГД ППМ, могут быть использованы в качестве исходных данных другими системами, что потребовало разработки программных надстроек для фрагментарной выгрузки сведений, согласованных другими Службами метрополитена, а также с другими организациями, выполняющими мониторинг качества работы метрополитена.

В разные годы промышленной эксплуатации АСП ПГД ППМ реализовано:

- передача данных о составителе ПГД ППМ, дате начала работы согласно ПГД ППМ, типу расстановки, дням работы, «нитках», ГО ЭПС, электродепо, маршрутах, типах ремонтов/осмотров и станциях линии метрополитена в формате *XML* для составления расписаний локомотивных бригад;
- передача данных о временах отправления пассажирских поездов со станций согласно «ниткам» для оценивания заполняемости вагонов, при действующих значениях пассажиропотоков (задача Информационно-вычислительного центра (ИВЦ) Московского метрополитена и Департамента транспорта города Москвы);
- передача ПГД ППМ в текстовом формате для восстановления его сотрудниками ИВЦ метрополитена в системе автоматизированного проектирования *AutoCAD* и последующего формирования текста, адаптированного к размещению на бланках карточек расписания, выдаваемых машинистам;
- передача данных о «нитках» для прогнозирования времён прибытия поездов на станции с целью информирования об этом пассажиров посредством её вывода на табло, размещаемые в торцах платформ со стороны «хвостов» прибывающих поездов;
- передача данных о «нитках» для восстановления их в одной из систем, созданных компанией «Макомнет», для внедрения



комплекса технических и программных средств, необходимых для запуска Единого диспетчерского центра Московского метрополитена в работу [18].

### **Этап тиражирования способов автоматизации планирования перевозочного процесса для различных линий Московского метрополитена**

В этот период на Московском метрополитене принята в промышленную эксплуатацию АСП ПГД ППМ.

Построение вручную ПГД ППМ, соответствующего заданным размерам движения и ГО ЭПС, занимает от 1.5 до 3 месяцев в зависимости от сложности линии и квалификации инженера-графиста. В связи с этим наличие автоматизированной системы, упрощающей выполнение этих работ посредством тиражирования управляющих воздействий, приводящих к быстрому получению результата построения ПГД ППМ, является экономически оправданным шагом.

На этом этапе выявлены особенности линий метрополитена, оказывающие влияние на вид ПГД ППМ [13]. Далее перечислены эти особенности.

Кольцевая линия (кольцо) Московского метрополитена относится к особому типу линий. В её состав входят два независимых пути, каждый из которых является замкнутым контуром [13].

К радиальным линиям относят линии, на которых главные пути не являются замкнутыми контурами. Поезда, обслуживающие линию, в течение рабочего дня совершают переходы между главными путями, оборачиваясь на конечных или промежуточных станциях с путевым развитием.

Среди множества радиальных линий особое место занимают линии с «вилочным» движением. «Вилочным» движением называется такая организация работы линии, при которой движение составов осуществляется по различным участкам после проследования станции разветвления. Станция разветвления – это станция, путь до которой для всех составов линии не различается, а после – для части составов различен.

Такая организация движения оказывает влияние на вид ПГД ППМ [19].

Частным случаем «вилочного» движения является ПГД ППМ зонного типа (ГЗТ). В [19] автоматизация составления фрагмента ПГД ППМ с «вилочным» движением рассматривается на примере Филёвской линии, а ГЗТ – на примере Люблинско-Дмитровской линии [15].

На этом этапе особенно остро встал вопрос сопровождения АСП ПГД ППМ, заключивший в себе такие мероприятия как: обучение персонала, корректировку набора сервисных функций при всевозрастающих требованиях инженеров-графистов [17], а также настройку сопряжённых с системой периферийных устройств.

К этому периоду относится формализация задач машинного построения ГРЛБ, «раскладок» (шаблонных таблиц) для выписки поездных расписаний, а также печати карточек поездных расписаний, выдаваемых машинистам, вступающим в рейсы [20].

Этап сопряжён с использованием энергосберегающих технологий [21, 22], с переводом нескольких линий на обслуживание новым (на тот момент) электроподвижным составом «Русич» (81-740/741; выпуск: 2003-2013 гг.) с асинхронными двигателями, предоставляющими возможности выполнения рекуперативного торможения [22].

К этому же периоду относится реализация автоматизированного расчёта эксплуатационных показателей с использованием АСП ПГД ППМ [17]. При расчёте эксплуатационных показателей вручную в Службе движения принято использовать участковые времена хода, в АСП ПГД ППМ задача расчёта была решена при рассмотрении каждого перегона для каждой построенной «нитки». Потребовалась иная схема вывода результатов расчёта с группировкой перегонов в участки, по которым происходит движение поездов по «ниткам» согласно ПГД ППМ. Изменения в расчётной схеме существенно сказались на графическом пользовательском интерфейсе АСП ПГД ППМ. С точки зрения развития сервисных функций добавилась возможность экспорта расчётных данных в электронные таблицы *Microsoft Office Excel*, что обеспечило возможность печати на принтере или плоттере, минуя

программирование прямого взаимодействия с драйвером печатающего устройства через АСП ПГД ППМ.

Завершением этого этапа явилась разработка принципов включения АСП ПГД ППМ в общее цифровое пространство линии метрополитена, а также применимости автоматизированной системы к построению ПГД ППМ для других видов ГРТС.

### **Этап применения новых ИТ, цифровизации и интеллектуализации процессов планирования пассажирских перевозок, эксплуатационной и маневровой работы**

На этом этапе, преимущественно, решались вопросы автоматизации составления ГО ЭПС. Основным объектом управления ГО ЭПС является ремонт (осмотр). Введём определение термина «ремонт» в контексте рассмотрения ГО ЭПС и ПГД ППМ. Ремонт – это кортеж, компоненты которого определяют тип, время и место проведения технического осмотра (ТО) или текущего ремонта (ТР), приписанного к маршруту.

В [5] составлена схема технологического процесса построения ПГД ППМ, сопряжённого с ГО ЭПС при использовании концепции *Event-driven Process Chain (EPC)*; составлен алгоритм автоматизированного назначения технических осмотров первого объёма работ (ТО-1) с учётом ограничений и факторов, влияющих на вид ПГД ППМ [13]. К решению задачи автоматизированного составления ГО ЭПС предложен «Венгерский алгоритм» (алгоритм Манкреса – Куна), который хорошо работает только «в статике». Для получения решения задачи «в динамике» предложен рекурсивный метод динамического программирования (планирования) Беллмана.

Решается задача эффективного использования парковочного пространства на примере метрополитена с применением теории графов. Визуализация полученных деревьев и уплотнённых графов выполняется пакетом утилит *Graphviz* [4].

Большей эффективности при решении задачи автоматизированного составления ГО ЭПС позволил добиться ГА [10]. Позже разработан-

ная на базе ГА автоматизированная подсистема составления ГО ЭПС контекстно стала рассматривается как ИИС.

Проведён анализ применимости искусственного интеллекта и, в частности, машинного обучения [6] к задачам автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене [7, 10].

Наряду с поиском решения задачи автоматизации составления ГО ЭПС развитие и практическую реализацию получила идея, высказанная в [13], о возможности применения аппарата параллельных вычислений к рекурсивной процедуре автоматизированного построения процессов ПГД ППМ. Многопоточная модель (*Threading*) на базе паттернов проектирования реализована в среде *Microsoft Visual Studio* на языке *Visual C#* в АСП ПГД ППМ нового поколения («АРМ Графиста 2.0») [23].

В процессе цифровизации обозначилось интенсивное развитие интеллектуальных транспортных систем управления ГРТС [24].

### **Этап учёта особенностей составления ПГД ППМ при наличии систем автоведения поездов на линиях метрополитена**

Этап характерен возможностью выполнения заданного числа времён хода по перегону, реализуемых системой автоматического управления, что позволило отказаться от СРВ при выравнивании межпоездных интервалов в ходе планирования переходных процессов ПГД ППМ. При реализации времён хода по линии метрополитена без СРВ достигается уменьшение расхода энергии, затрачиваемой на тягу.

Имеющейся базы знаний на сегодня достаточно для прогнозирования качества работы Московского метрополитена в условиях движения поездов без машинистов согласно четвёртой степени автоматизации железнодорожной инфраструктуры по стандарту *IEC 62290-1: Grades of Automation 4 (GoA 4)*. Работы проводятся с учётом возможности реализации энергоэффективных ПГД ППМ [14].

Значительный объём работ связан с удовлетворением запросов, поступающих от инженеров-графистов на устранение СРВ. Созданы

алгоритмы для перераспределения СРВ на времена хода по перегонам. В [14] показано, что это предоставляет возможность для экономии электроэнергии на этапе планирования перевозочного процесса, но только при условии работы согласно составленному ПГД ППМ системой автоведения, поскольку ни один опытный машинист не в состоянии выполнить того множества различных времён хода непараллельного графика, получаемого в результате перераспределения СРВ на времена хода по перегонам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведённый анализ развития автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена доказывает актуальность внедрения этой системы для работы в условиях метрополитенов.

2. Развитие автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена направлено на «вписывание» её в Единую интеллектуальную систему автоматизированного управления движением транспортных средств на городских рельсовых транспортных системах.

3. Использование интеллектуальных алгоритмов в автоматизированной системе построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена позволяет эффективно решать задачи планирования перевозочного процесса.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001 (Заявка 2020 года): «Разработка моделей и методов оптимизации производственных ресурсов городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) на основе технологии больших данных (*bigdata*)».

## REFERENCES / Список литературы

- [1] Астрахан, В. И. Алгоритмизация процесса составления графика движения поездов метрополитена / В. И. Астрахан, А. И. Жербина // Труды МИИТа. – 1975. – № 492. – С. 99-105.
- [2] Баранов, Л. А. Построение на ЭВМ графика движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина

- // Вестник ВНИИЖТ. – 1981. – № 2. – С. 17-20.
- [3] Сидоренко, В. Г. Автоматизация синтеза планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 2. – С. 48-57.
- [4] Сидоренко, В. Г. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов / В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Информатизация образования и науки. – 2015. – № 4 (28). – С. 123-132.
- [5] Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир Транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 4. – С. 154-165.
- [6] Сидоренко, В. Г. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / В. Г. Сидоренко, А. В. Маркевич, М. А. Кулагин // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXVII международной конференции. Под общей редакцией Калашникова А.О., Кульбы В.В. – М.: ИПУ РАН. – 2019. – С. 265-270.
- [7] Маркевич, А. В. Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3 (43). – С. 36-49.
- [8] Дегтярёв, Д. П. Проблемы визуального анализа графика движения поездов на метрополитене и методы их решения / Д. П. Дегтярёв, М. Н. Василенко, О. А. Максименко // Неделя науки-2002: Труды научно-практической конференции. – СПб.: ПГУПС. – 2002.
- [9] Сеславин, А. И. Принципы равномерности в задачах управления потоками пассажирского транспорта / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина // Прикладная информатика. – 2009. – № 2 (20). – С. 91-95.
- [10] Сидоренко, В. Г. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 6. – С. 37-40.
- [11] Боровой, К. Н. Математическая модель движения поездов на линии метрополитена для оперативного управления перевозочными процессами / К. Н. Боровой // Моделирование процессов управления транспортными системами. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Владивосток: ДВО АН СССР. – 1977. – С. 128-130.
- [12] Феофилов, А. Н. Математическая модель составления графика движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 10-13.
- [13] Сидоренко, В. Г. Построение планового графика движения для метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 3 (36). – С. 98-105.
- [14] Баранов, Л. А. Минимизация расхода энергии на тягу поездов внеуличного городского транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, А. И. Сафронов // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 26-34.
- [15] Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования движения пассажирского транспорта в условиях ограниченных ресурсов / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова //

- Информатизация образования и науки. – 2012. – № 2 (14). – С. 79-86.
- [16] Кульба, В. В. Формирование сценарных пространств и анализ динамики поведения социально-экономических систем / В. В. Кульба, Д. А. Кононов, С. С. Ковалевский, С. А. Косяченко. – М.: ИПУ РАН. – 1999. – 109 с.
- [17] Сафронов, А. И. Антология задач организации графического пользовательского интерфейса в интеллектуальной системе «АРМ графиста» / А. И. Сафронов, У. А. Старовойтова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. – М.: РУТ (МИИТ). – 2022. – С. 326-337.
- [18] Новиков, В. Г. Микропроцессорные системы управления движением поездов в Московском метрополитене / В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, В. А. Кузюков // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 3. – С. 268-288.
- [19] Сидоренко, В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. – 2010. – № 4. – С. 128-134.
- [20] Сафронов, А. И. Подходы к решению задачи автоматизации документооборота перевозочного процесса в Московском метрополитене / А. И. Сафронов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 425-441.
- [21] Гаев, Д. В. Внедрение энергосберегающих технологий / Д. В. Гаев, А. В. Ершов, Л. А. Баранов, В. А. Гречишников и др. // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 3-8.
- [22] Баранов, Л. А. Оптимальное управление поездом метрополитена по критерию минимума энергозатрат / Л. А. Баранов, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 9-14.
- [23] Петров, А. С. Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов / А. С. Петров, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2020. – Т. 1. – № 45. – С. 21-38.
- [24] Баранов, Л. А. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Транспортное строительство. – 2021. – № 4. – С. 19-23.

Received: June 2, 2022 / Получено: 2 июня 2022 г.

Accepted: September 10, 2022 / Принято: 10 сентября 2022 г.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Баранов Леонид Аврамович** – заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ)  
ученая степень: доктор технических наук  
ученое звание: профессор  
e-mail: baranov.miiit@gmail.com

**Сафронов Антон Игоревич** – доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского

университета транспорта (МИИТ)  
ученая степень: кандидат технических наук  
ученое звание: доцент

**Сидоренко Валентина Геннадьевна** – профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ)  
ученая степень: доктор технических наук  
ученое звание: профессор

## FOR CITATION

Baranov Leonid Avramovich, Safronov Anton Igorevich, Sidorenko Valentina Gennadievna, Stages of Development, Methods and Intellectualization of Automated Scheduling of Metro Passenger Trains, *JITA – Journal of Information Technology and Applications, Banja Luka*, Pan-European University APEIRON, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, JITA 12(2022) 2:77-88, (UDC: 621.3.049:069(747).02), (DOI: 10.7251/JIT2202077A), Volume 12, Number 2, Banja Luka, December (65-172), ISSN 2232-9625 (print), ISSN 2233-0194 (online), UDC 004