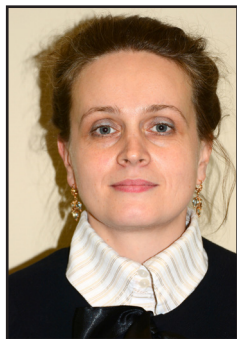


# Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена



Валентина СИДОРЕНКО  
Valentina G. SIDORENKO

АНТОН САФРОНОВ  
Anton I. SAFRONOV



Константин ФИЛИПЧЕНКО  
Constantine M. FILIPCHENKO

*Сидоренко Валентина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*  
*Сафронов Антон Игоревич – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.*  
*Филипченко Константин Михайлович – ассистент МИИТ, Москва, Россия.*

**Automation of Operations Scheduling of Metro Electric Rolling Stock**  
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 161)

**Рассмотрены вопросы автоматизации составления графика оборота электроподвижного состава метрополитена, организации отдельных его этапов. Описан алгоритм автоматизированного назначения технического обслуживания подвижного состава первого объёма. Определены атрибуты линии, оказывающие влияние на реализацию алгоритма, на примере Московского метрополитена.**

*Ключевые слова:* метрополитен, электроподвижной состав, технологический процесс, автоматизация, плановый график движения, график оборота.

**М**осковский метрополитен остается одним из самых высоко-нагруженных транспортных предприятий мира. Постоянно растущие потребности в перевозках подталкивают к рациональному использованию ресурсов (в частности, энерго мощностей парка подвижного состава), совершенствованию организации планирования движения электропоездов.

Согласно правилам технической эксплуатации основной организации движения поездов является плановый график движения (ПГД), объединяющий работу всех подразделений метрополитена [1]. Для создания ПГД необходимо определить его составные элементы, в число которых входит график оборота (ГО) подвижного состава. График оборота – это план работы электроподвижного состава (ЭПС), то есть график проведения осмотров и ремонтов, а также ночной расстановки маршрутов [5]. Составление ГО и ПГД требует обработки большого объема информации, поступающей из различных служб метрополитена.

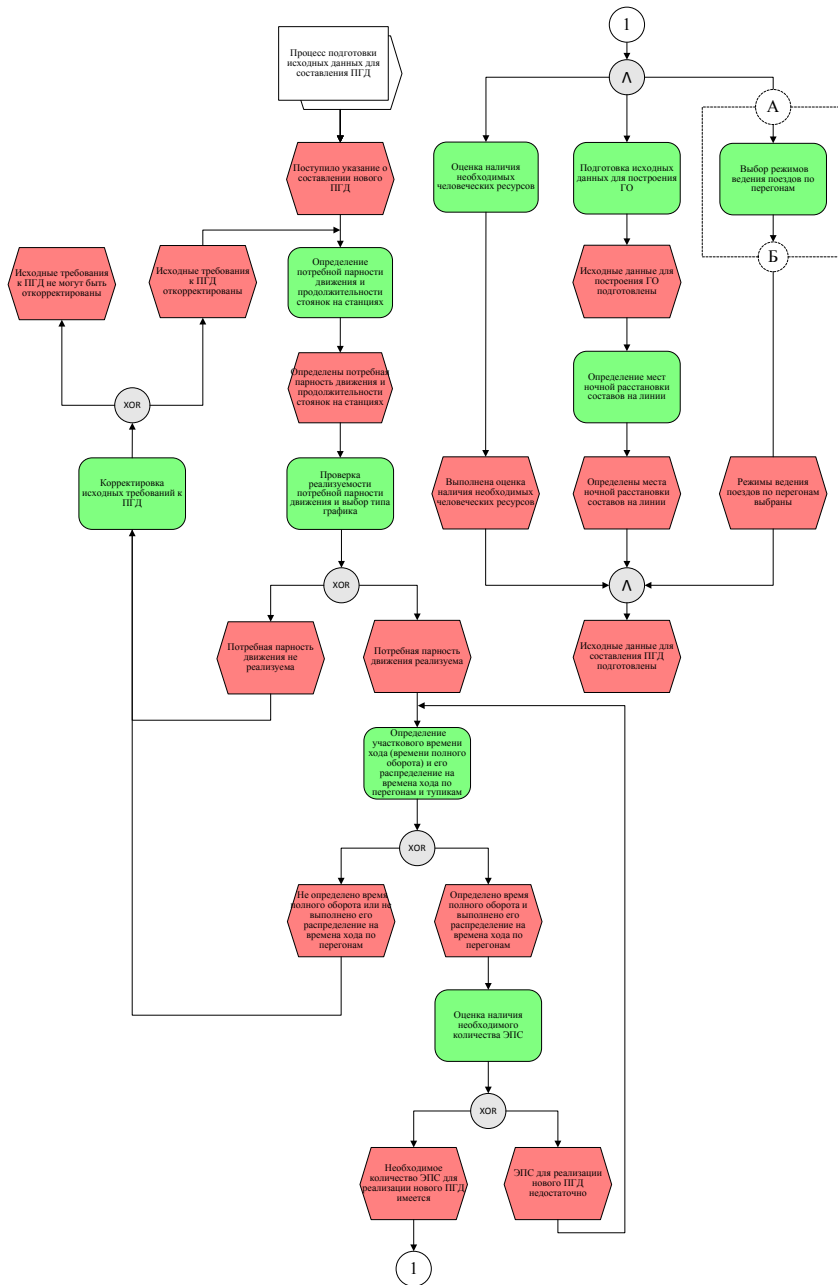


Рис. 1. Схема технологического процесса.

Предлагаемая статья касается только части стоящих за всем этим задач — автоматизации составления графика оборота подвижного состава. Процесс подготовки такого графика включает в себя несколько этапов:

- сбор и анализ данных, являющихся исходными для построения ГО и ПГД;
- составление предварительного варианта (эскиза, макета, прототипа) ГО;
- модификацию ГО в процессе составления ПГД.

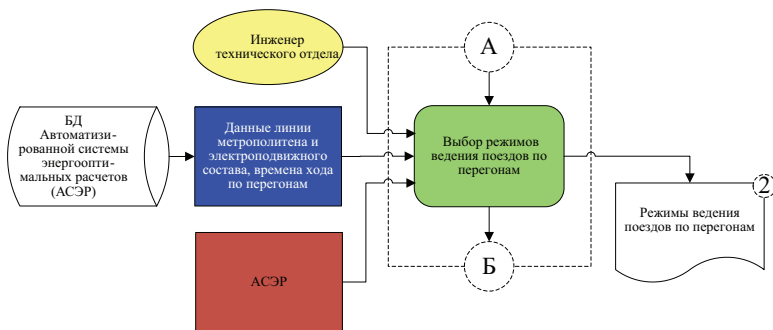
Рассмотрим каждый из этих этапов детально.

### 1.

Начнем с технологического этапа сбора и анализа исходных данных. Диаграмма этого процесса, выполненная с использованием нотации *EPC* (*Event-driven Process Chain* — событийная цепочка процессов) [2], была построена в электронном виде. Она формализует процесс, описывает информационные потоки, позволяет определить



Рис. 2. Пример полного графического описания.



множества задействованных в процессе лиц и необходимых им для решения поставленных задач инструментов. С формализованной основой удобно работать, рассматривая её на разных уровнях детализации. Укрупненная диаграмма (схема) представлена на рис. 1. В выбранной нотации два типа элементов: события и функции.

Функции – активные элементы, обозначающие действия, выполняемые в течение некоторого промежутка времени. Образом функции на диаграмме является прямоугольник с закруглёнными углами. Функция может быть декомпозирована.

Событием выступает состояние, которое встречается перед или после функции, оно фиксирует значения определённых параметров в определенный момент времени. Образом события на диаграмме обозначен шестиугольник. Подобные диаграммы всегда должны начинаться с события и заканчиваться событием.

Функции и события соединяются в поток управления, задающий им хронологическую последовательность и логическую взаимосвязь.

Процесс, реализующий поток управления, может быть не только линейным, но и содержать ветвления разного рода. В таком случае функции и события связываются не при помощи рёбер, а посредством логического соединителя – элемента управления, определяющего ветвление потока управления в зависимости от завершения выполнения функции или возникновения событий. На рис. 1 использованы следующие логические соединители (взаимосвязи):

- строгая дизъюнкция (XOR) означает, что после завершения выполнения функции произойдет только одно из событий;
- конъюнкция ( $\wedge$ ) может иметь одно из двух значений: а) ветвление означает,

что поток управления делится на подпотоки, которые запускаются одновременно и параллельно; б) объединение означает, что подпотоки управления синхронизируются, чтобы слиться в единый поток управления.

Условные обозначения «ветвление» и «объединение» совпадают с условным обозначением конъюнкции ( $\wedge$ ). Графика, примыкающая к знаку, позволяет различать эти логические соединители.

Цифрой 1 в круге обозначается разрыв потока управления. Данная фигура применена для компактного размещения диаграммы на листе.

С целью определения множества задействованных в процессе лиц и необходимых для решения поставленных задач инструментов, а также информационных потоков полное описание функций должно содержать следующие атрибуты:

- владелец процесса – лицо, выполняющее функции;
- данные – входная информация для выполнения функции;
- источник данных – документ или база данных, из которых получается входная для выполнения функции информация;
- средства автоматизации – программное обеспечение, при помощи которого выполняется данная функция;
- исходящий документ – документ или база данных, содержащие информацию, полученную после выполнения функции.

На рис. 2 изображен пример полного графического описания функции выбора режимов ведения поездов по перегонам. Точки А и Б соответствуют одноимённым точкам на рис. 1. Овалом обозначен *владелец процесса*, цилиндром – *источник данных*, темным прямоугольником – *данные*, серым прямоугольником – *средства авто-*

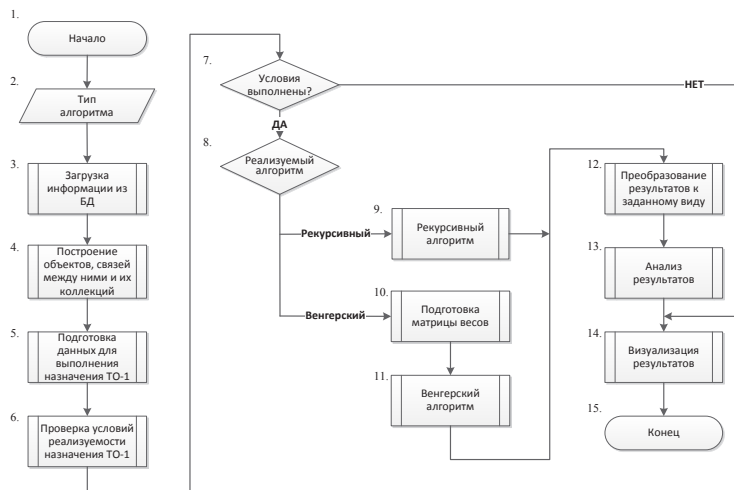
Таблица 1.

## Структурное описание процесса сбора и анализа данных для построения ППД

№ п/п	Процесс	Владелец процесса	Данные	Источник данных	Используемые средства автоматизации	Исходящие документы
1	Определение потребной парности движения и продолжительности стоянок на станциях	Сотрудник лаборатории исследования пассажиропотока службы движения	Данные о пассажиропотоке	БД системы автоматизированного учета пассажиропотока	Автоматизированная система контроля оплаты проезда	Потребная парность движения и продолжительности стоянок на станциях
2	Проверка реализуемости потребной парности движения и выбор типа графика	Инженер-графист службы движения	Потребная парность движения и продолжительности стоянок на станциях, данные линии метрополитена	БД АСП ПГД ППМ	АСП ПГД ППМ	Решение о реализуемости потребной парности движения и типе графика
3	Определение участкового времени хода (времени полного оборота) и его распределение на времена хода по перегонам	Сотрудник депо	Данные линии метрополитена и ЭПС, продолжительности стоянок на станциях	БД АСЭР	АСЭР	Время полного оборота, время на хода по перегонам и тулкам
4	Оценка наличия необходимого количества ЭПС	Сотрудник депо	Потребная парность движения и время полного оборота	БД АРМ инженера по эксплуатации депо (АРМ ИДЭ)	АРМ ИДЭ	Данные о наличии ЭПС
5	Подготовка исходных данных для построения ГО	Сотрудник депо	Потребная парность движения и время полного оборота, емкость депо	БД АРМ ИДЭ	АРМ ИДЭ	Места ночевки маршрутов, назначение ремонтов и осмотров
6	Определение мест ночной расстановки составов на линии	Инженер-графист службы движения	Данные линии метрополитена, места ночевки маршрутов	БД АСП ПГД ППМ	АСП ПГД ППМ	Схема ночной расстановки составов на линии
7	Оценка наличия необходимых человеческих ресурсов	Сотрудник депо	Потребная парность движения, необходимого количества ЭПС, исходные данные	БД АРМ инженера по эксплуатации депо	Система интерактивного составления расшифровок смен локомотивных бригад	Отчет о наличии человеческих ресурсов, исходные данные для построения графика работы локомотивных бригад
8	Выбор режимов ведения поездов по перегонам	Сотрудник депо	Данные линии метрополитена и ЭПС, времена хода по перегонам	БД АСЭР	АСЭР	Режимы ведения ЭПС по перегонам
9	Корректировка исходных требований к ГО и ПГД	Инженер-графист службы движения	Данные линии метрополитена	БД АСП ПГД ППМ	АСП ПГД ППМ	Скорректированные требования



**Рис. 3. Схема алгоритма автоматизированного назначения ТО-1.**



матизации, фигурой (2) – исходящий документ.

В таблице 1 представлены атрибуты всех функций рассматриваемого процесса.

На Московском метрополитене внедрено несколько целевых автоматизированных систем:

- автоматизированная система контроля оплаты проезда;
- автоматизированная система построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена [3];
- автоматизированная система энергооптимальных расчетов (АСЭР) [4];
- система интерактивного составления расшифровок смен локомотивных бригад.

## 2.

Задачей составления ГО является реализация системы плановых технических осмотров и различных видов технического обслуживания и ремонтов, проводимых периодически в соответствии с наработкой (пробегом) вагонов.

Техническое обслуживание 1-го объема (ТО-1) проводится по прибытии поезда в депо (парк) для проверки технического состояния оборудования и подготовки вагонов к последующей работе, а также поддержания санитарно-гигиенического состояния подвижного состава. Отказы оборудования и систем вагонов, а также неисправности, влияющие на безопасность движения, устраняются немедленно. Неисправности, не влияющие на безопасность движения, не связанные с удобством перевозки пассажиров и требующие значитель-

ного времени на их устранение, фиксируются в специальном журнале и устраняются при проведении последующих видов технического обслуживания большого объема или в процессе реализации текущего ремонта.

Информация о проведении технического обслуживания большого объема, чем ТО-1, или текущего ремонта в соответствии с описанным технологическим процессом сбора и анализа данных поступает в группу инженеров-графистов из депо. Работы упомянутых выше разновидностей обслуживания выполняются в депо специализированными ремонтными бригадами. Осмотры старших объемов (ТО-2, ТО-3, ТО-4) назначаются сотрудниками депо. У инженеров-графистов есть возможность выбора времени начала проведения таких осмотров с учетом изменения парности движения в течение дня.

Для всех маршрутов (состав с присвоенным ему на сутки номером), ночующих в депо, там проводится ТО-1. Для маршрутов, оставшихся ночевать на линии в линейных пунктах отстоя подвижного состава, встает задача назначения ТО-1 в процессе работы составов на линии с заданной периодичностью. Таким образом, при составлении инженерами-графистами предварительного варианта ГО основной задачей становится назначение ТО-1.

В качестве критерия оценки качества построения ГО выбран средний квадрат рассогласования желаемого и реального



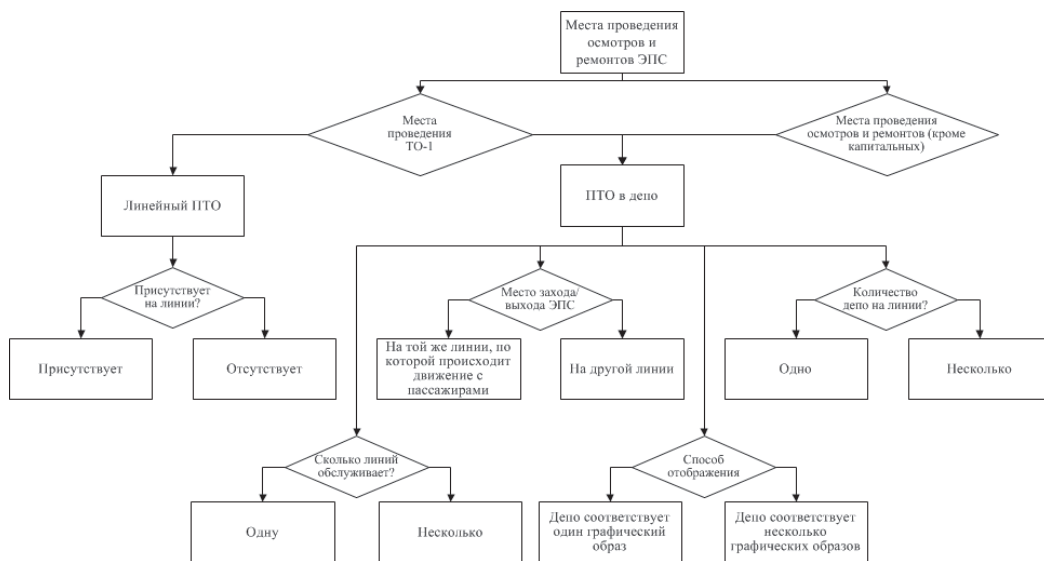


Рис. 4. Набор атрибутов линий метрополитена.

времен начала осмотра. Под желаемым временем будем понимать время, доставляющее равномерность назначения ТО-1. Тогда критерий призван указывать величину отклонения от равномерного назначения без учёта знака.

Решая задачу автоматизированного построения ГО, целесообразно использовать «венгерский алгоритм» (алгоритм Манкреса–Куна) [5], который обеспечивает оптимальное по выбранному критерию назначение. Вместе с тем при согласовании ПГД с оптимальным решением задачи назначения ТО-1 может возникнуть потребность в значительном изменении ПГД, что нежелательно. Отсюда актуально иметь всё множество возможных назначений, позволяющее выбрать то, которое, с одной стороны, будет соответствовать построенному ПГД, а с другой – минимально отличаться от оптимального, полученного в результате применения венгерского алгоритма.

Для решения задачи в такой постановке целесообразно использовать метод, реализующий рекурсивное построение назначения. Рекурсивный метод основывается на аппарате дискретного варианта динамического программирования Беллмана [6].

В зависимости от этапа процесса автоматизированного составления ГО пользователь может выбрать один из двух способов решения.

Схема, учитывающая приведённое только что суждение, представлена на рис. 3.

Алгоритм начинает работу в блоке 1. В блоке 2 осуществляется ввод выбранного типа алгоритма (венгерский или рекурсивный) назначения ТО-1. В блоке 3 выполняется загрузка информации для алгоритма. В блоке 4 формируются множества (коллекции) объектов, определяются связи между ними. В блоке 5 предусмотрены действия по преобразованию исходных данных, необходимые для анализа возможности реализации всех потребных ТО-1 при заданных условиях. В блоке 6 анализируется сама эта возможность реализации (реализуемость) ТО-1. Если условия реализуемости выполняются, то управление передается из блока 7 в блок 8, где осуществляется выбор алгоритма, в ином случае управление передается в блок 14.

В случае выбора рекурсивного алгоритма управление из блока 8 передается в блок 9, в котором этот алгоритм реализован. При выборе венгерского алгоритма управление переходит в блок 10, там идет подготовка матрицы весовых коэффициентов. В блоке 11 непосредственно реализуется венгерский алгоритм.

После решения задачи назначения ТО-1 одним выбранным способом управление передается в блок 12, в котором полученные результаты преобразуются в вид, удобный для их анализа и визуализации.



зации. В блоке 13 выполняется анализ полученных результатов, а блок 14 реализует действия по визуализации этих результатов. Алгоритм заканчивает свою миссию в блоке 15.

### 3.

Устанавливаемые в блоке 4 рассмотренного алгоритма связи между объектами задаются, в частности, атрибутами линии. Одной из задач, решаемых в блоке 5, является определение ресурсов, имеющихся для подготовки назначений ТО-1. Наличие этих ресурсов также зависит от атрибутов линии. Есть свой их набор, влияющий на построение ГО (см. рис. 4).

Набор атрибутов, приведённых на рис. 4, мотивирован следующими соображениями. Техническое обслуживание 1-го объёма может проводиться не только в депо, но и линейных пунктах технического осмотра (ПТО). ГО определяется атрибутами обслуживающих линию депо и линейных ПТО. На линии метрополитена отсутствует линейный ПТО, когда ёмкость депо достаточна для проведения всех видов технического обслуживания. В зависимости от условий эксплуатации, при изменении топологии линии (её продлении, закрытии участков, соединении с другими линиями) ПТО могут открываться или закрываться.

Некоторые линии обслуживаются составами, приписанными только к одному депо. Линии, для обслуживания которых ёмкости одного депо недостаточно, используются несколькими (на Московском метрополитене – не более трёх).

Как правило, парковые пути депо подходят к станционным путям той линии, которую оно обслуживает. Однако есть случаи, когда выход составов из депо осуществляется на пути другой линии с последующей перегонкой (чаще всего в режиме резервного поезда) на обслуживаемую линию. Этот атрибут модификации учитывается на этапе согласования ГО и ПГД.

Имеют место случаи, когда депо обслуживает более чем одну линию. Этот факт

важен при подготовке исходных данных для построения ГО в рамках технологического процесса сбора и анализа данных, базовых при создании и ГО, и ПГД (см. рис. 1). Для каждой из обслуживаемых линий график оборота ЭПС строится отдельно.

На этапе согласования ГО и ПГД существенное значение приобретает информация о том, на какой главный путь выходят составы из депо. На радиальных линиях отображение всех перемещений составов между депо и главными путями выполняется совместно. Особым случаем является организация движения на Кольцевой линии. В её состав входят два независимых пути, каждый из которых остается замкнутым контуром. В связи с этим отображение перемещений составов между депо и каждым из двух путей рационально разделить, введя понятие «виртуального» депо, дополняющего физическое. При этом строится единый ГО [3].

*Разработан программный продукт, реализующий представленную в статье процедуру автоматизированного назначения ТО-1. Идет его апробация применительно к различным линиям Московского метрополитена.*

*Проведенные расчёты показали приемлемость процедур и сроков получения результатов и соответствие итоговых ГО эксплуатационным требованиям.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технической эксплуатации метрополитенов РФ / Г. И. Минаев, С. Б. Сухов, А. Г. Фёдоров, М. В. Фурсаев, С. Н. Мизгирёв. – М.: Изд. центр ТА Инжиниринг, 2003. – 128 с.
2. Anni Tsai et al. (2006). EPC Workflow Model to WIFA Model Conversion. In: 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, pp. 2758–2763.
3. Сафронов А. И., Сидоренко В. Г. Построение планового графика движения для метрополитена // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 98–105.
4. Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена / Л. А. Баранов, М. А. Васильева, А. В. Ершов, В. М. Максимов, И. С. Мелёшин // Вестник МИИТ. – 2008. – № 19. – С. 3–10.
5. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Потоки в сетях. – М.: Мир, 1966. – 276 с.
6. Белман Р. Э. Динамическое программирование. – Л.: Иностранная литература, 1960. – 400 с. ●

Координаты авторов: **Сидоренко В. Г.** – valenfalk@mail.ru, **Сафронов А. И.** – safronov-ai@mail.ru, **Филипченко К. М.** – konstantin-649@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.12.2014, принята к публикации 16.04.2015.

# AUTOMATION OF OPERATIONS SCHEDULING OF METRO ELECTRIC ROLLING STOCK

**Sidorenko, Valentina G.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Safronov, Anton I.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Filipchenko, Constantine M.**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

## ABSTRACT

The authors consider issues of automation applicable to scheduling turnaround of metro electric rolling stock, organization of its individual stages. Complementing theoretical analysis of interaction of processes, data exchange organization, optimal al-

gorithm searching, an algorithm for automated appointment of rolling stock maintenance of the first volume as well as supporting software are developed and proposed which are now tested. Attributes of the line are determined, affecting algorithm implementation, at the example of the Moscow Metro.

**Keywords:** metro, electric rolling stock, process, automation, planned traffic schedule, turnaround schedule.

**Background.** The Moscow Metro is one of the most highly-loaded transport companies in the world. Constantly growing demand for transportation push to the rational use of resources (in particular, power capacity of rolling stock), improvement of planning organization for electric trains movement.

According to the rules of technical operation, the foundation of trains movement organization is planned via traffic schedule (hereinafter – PTS), which unites the work of all departments of metro [1]. To create a PTS, it is necessary to define its components, which include turnaround schedule (hereinafter – TS) of rolling stock. Turnaround schedule is a plan of operations for electric rolling stock (hereinafter – ERS), i.e. timetable for inspection of ERS and for repair of tracks, as well as night route scheduling [5]. Drawing up TS and PTS requires processing of large amounts of information from a variety of metro departments.

This article concerns only a part of those tasks which is automation of drawing up electric rolling stock turnaround schedule.

The process of preparing this schedule includes several steps:

- Collection and analysis of data, which serve as a starting point for drawing up TS and PTS;
- Drafting a preliminary version (sketch, layout, prototype) of TS;
- Modification of TS in preparing PTS.

**Objective.** The objective of the authors is to consider different issues concerning automation of work planning of metro electric rolling stock.

**Methods.** The authors use general scientific and engineering methods, comparative analysis, simulation, graph construction.

## Results.

### 1.

While considering developing of PTS, let's start with a technological stage of collection and analysis of input data. The diagram of the process, performed by using the notation EPC (Event-driven Process Chain) [2], was built in electronic form. It formalizes the process, describes information flows, allows determining a set of individuals involved in the process, and tools they need to achieve the objectives. It is easy to work with a formalized basis, considering it at different levels of specification. The enlarged diagram (scheme) is shown in Pic. 1. In the chosen notation, there are two types of elements: functions and events.

Functions are active elements for actions performed within a certain period of time. Function image in the diagram is a rectangle with rounded corners. The function can be decomposed.

Event is a state that occurs before or after the function, it records the values of certain parameters at a certain time. Event image in the diagram is a hexagon. These diagrams should always begin with an event and end with an event.

Functions and events are connected to a control flow, giving them chronological sequence and logical interrelation.

The process, implementing the control flow, may be not only linear but may also contain different kinds of branching. In this case, functions and events are linked not by edges, but through a logical connector that is a control element, which determines branching of control flow depending on function completion or occurrence of events. In Pic. 1 there are following logical connectors (interrelations):

– strict disjunction (XOR) means that after the completion of functions only one of the events will occur;

– conjunction ( $\wedge$ ) can have one of two values: a) branching means that control flow is divided in sub-flows, that run simultaneously and in parallel; b) combination means that control sub-flows are synchronized to merge into a single control flow.

Symbols «branching» and «combination» match with the symbol of conjunction ( $\wedge$ ). Graphics, adjacent to sign, allows us to distinguish logical connectors.

Numeral 1 in the circle denotes a gap of control flow. This figure is used for compact placement of the diagram on a worksheet.

In order to determine a plurality of persons involved in the process and tools necessary for solution of tasks and information flows, complete description of functions must contain following attributes:

– Process owner is a person, performing functions;

– Data is input information to perform the function;

– Data source is a document or a database from which input information to perform functions is received;

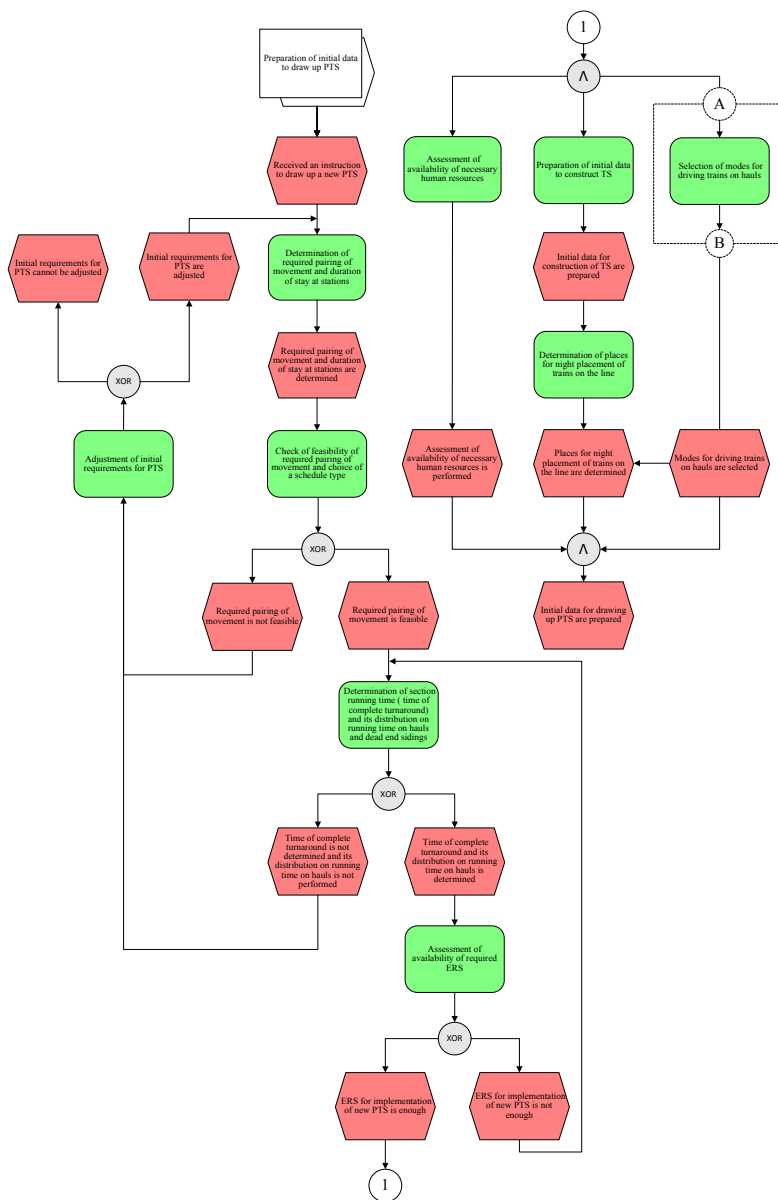
– Automation tools is software with which this function is performed;

– Outgoing document is a document or a database, containing information received after the function is performed.

Pic. 2 shows an example of a full graphical description of the function of selection of mode for driving trains on hauls. Points A and B correspond to the same name points in Pic. 1. Oval designates process owner, cylinder is data source, dark rectangle is for data, gray rectangle is automation means, figure (2) is for outgoing document.







**Pic. 1. Process Flow Diagram.**

Table 1 shows the attributes of all functions of the process.

In the Moscow metro several targeted automated systems are introduced:

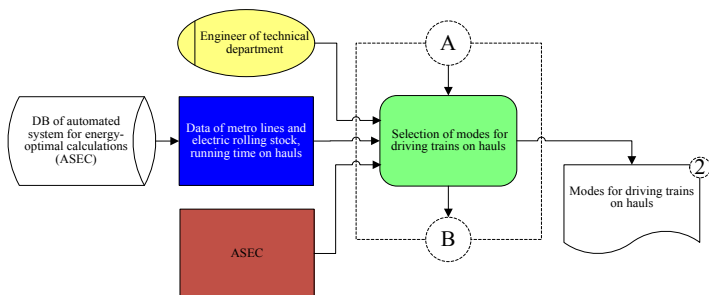
- automated fare payment control system;
- automated system of construction of planned traffic schedule of metro passenger trains (ASC PTS MPT) [3];
- automated system of energy-optimal calculations (ASEC) [4];
- system of interactive drawing up transcripts of shifts of locomotive crews.

**2.**

A task to draw up TS is implementation of the system of planned technical inspection and different kinds of maintenance and repairs, carried out periodically in accordance with operating time (mileage) of cars.

Maintenance of the 1<sup>st</sup> volume (M-1) is carried out upon arrival of the train at the depot («park») to check technical condition of equipment and preparation of cars for subsequent work, as well as maintenance of sanitary conditions of rolling stock. Failures of equipment and systems of cars, as well as faults, affecting traffic safety, are eliminated immediately. Faults that do not affect safety and are not associated with convenience of passenger transportation and require considerable time to eliminate them, are recorded in a special register and are eliminated during subsequent maintenance of a larger volume or during running repairs.

Information on maintenance of a larger volume than M-1, or running repairs in accordance with the described process of collecting and analyzing data from the depot is received by a group of engineers responsible for developing schedules. The works of



**Pic. 2. Example of a full graphical description.**

the above types of services are performed at the depot by specialized maintenance crews. Inspections of older volumes (M-2, M-3, M-4) are assigned by depot employees. Engineers responsible for scheduling can choose start time of such inspections, taking into account changes in pairing of movement during the day.

For all routes (train with the assigned number for a day), staying at night at the depot, M-1 is carried out. For routes, staying at night on the line at field stations of rolling stock layover, the task arises to appoint M-1 in the process of train operations on the line at specified intervals. Thus, in the preparation of preliminary version of TS by engineers responsible for scheduling, the main task is to appoint M-1.

As a criterion for assessing the quality of TS construction mean square error of desired and actual time of inspection start is selected. The desired time is time, delivering uniformity of M-1 appointment. Then the criterion is intended to indicate magnitude of deviation from uniform appointment without regard to sign.

Solving a problem of automated building of TS, it is advisable to use «Hungarian algorithm» (algorithm Munkres-Kuhn) [5], which provides for optimal appointment on the selected criterion. However, in adjustment of PTS with optimal solution of the task of M-1 assignment, a need may arise for significant change in PTS, which is undesirable. Hence, it is important to have a whole set of possible appointments, allowing you to select the one that, on the one hand, will correspond to the built PTS, on the other hand, will differ minimally possible from the optimum, resulting in the application of Hungarian algorithm.

To solve the problem in this wording, it is advisable to use a method that implements a recursive building of appointment. A recursive method is based on the unit of digital version of Bellman dynamic programming [6].

Depending on the stage of the process of automated drawing up TS the user can choose one of two ways of solution.

The scheme, taking into account the above statement, is shown in Pic. 3.

The algorithm starts in block 1. In block 2 input of selected algorithm type (Hungarian or recursive) to appoint M-1 is performed. In block 3 occurs loading of information for the algorithm. In block 4 sets of (collection) of objects are formed, involved in the algorithms that determine links between them. Block 5 assumes actions to convert raw data needed to analyze feasibility of all required M-1 under given conditions. In block 6 the very realization of this possibility (feasibility) of M-1 is analyzed. If feasibility conditions are met, then control is transferred from block 7 to block 8, where the algorithm to appoint M-1 is selected, otherwise control is passed to block 14.

In case of selection of a recursive algorithm control from block 8 is transmitted to block 9, in which the

algorithm is implemented. In case of selection of Hungarian algorithm, control passes to block 10, where matrix of weighting coefficients for the algorithm is prepared. In block 11 Hungarian algorithm is directly implemented.

After solving a task of appointing M-1 by one selected method, control is passed to block 12 where the results obtained are converted into a form convenient for their analysis and visualization. In block 13 analysis of the results is performed, and block 14 implements the actions on visualization of results. The algorithm completes its mission in block 15.

### 3.

Installed in block 4 of the considered algorithm links between objects are defined, in particular, by the attributes of the line. One of the tasks, solved in block 5, is to determine resources available for preparation of M-1 appointment. The availability of these resources also depends on the line attributes. There is a set of them, affecting TS construction (see Pic. 4).

A set of attributes, given in Pic. 4, is motivated by the following considerations. Maintenance of the 1<sup>st</sup> volume can be carried out not only at the depot, but in linear maintenance points (hereinafter – MP). TS is determined by the attributes of depot and linear MP, serving the line. On the metro line linear MP is absent, when the depot capacity is sufficient for all types of maintenance. Depending on operating conditions, when the topology of the line changes (its extension, closure of areas, joining to other lines), MP can be opened or closed.

Some lines are served by trains assigned to only one depot. The lines for which service depot capacity is not enough, are used by several depots (in the Moscow metro – no more than three).

As a rule, depot body tracks approach station tracks of the line, which it serves. However, there are occasions when the trains after the depot get on tracks of the other line, followed by ferrying (often as a reserve train) to the serving line. This attribute of modification is taken into account at the stage of harmonization of TS and PTS.

There are cases when the depot serves more than one line. This fact is important in preparing raw data for construction of TS as a part of the process of collecting and analyzing data, basic in TS and PTS (see Pic. 1). For each of the lines served by ERS turnaround schedule is constructed separately.

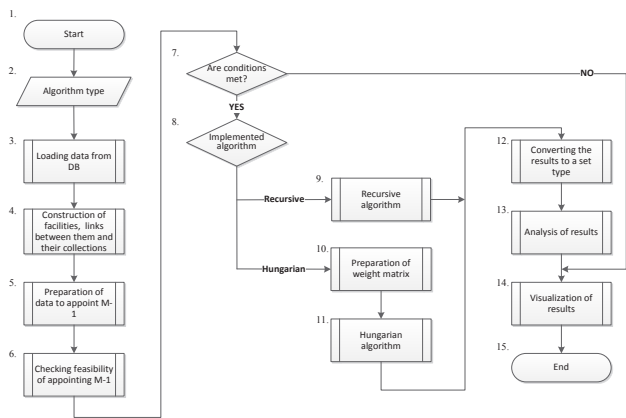
At the stage of harmonization of TS and PTS, information becomes essential concerning a main route, to which a train get after the depot. On radial lines display of all movements of trains between depots and main tracks is performed together. A special case is organization of traffic on the Circle Line<sup>1</sup>. It consists of two independent

<sup>1</sup> Moscow metro consists of a circle line and several lines that cross that circle line. New circle line of a bigger diameter is under construction. – Ed.note.

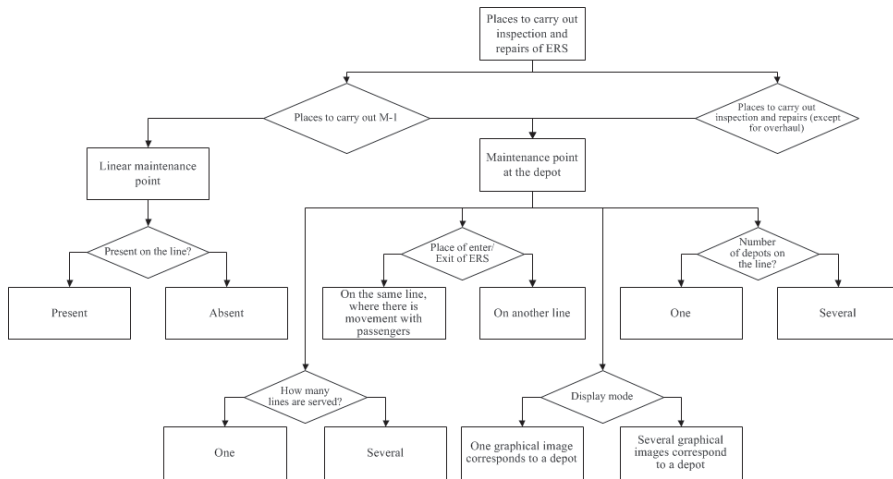


**Table 1.**
**Structural description of the process of collecting and analyzing data for drafting PTS**

Nº	Process	Process owner	Data	Data source	Used automation means	Outgoing documents
1	Determination of required pairing of movement and duration of stay at stations	Employee of passenger traffic research laboratory of traffic department	Data on passenger traffic	DB of automated passenger traffic accounting system	Automated fare payment control system	Required pairing of movement and duration of stay at stations
2	Check of feasibility of required pairing of movement and choice of a schedule type	Engineer responsible for scheduling of traffic department	Required pairing of movement and duration of stay at stations, data of the line	DB ASC PTS MPT	ASC PTS MPT	Decision on feasibility of required pairing of movement and choice of a schedule type
3	Determination of section running time (time of complete turnaround) and its distribution on running time on hauls	Depot employee	Data of metro line and ERS, duration of stay at stations	DB ASEC	ASEC	Time of complete turnaround, running time on hauls and dead end sidings
4	Assessment of availability of required ERS	Depot employee	Required pairing of movement and time of complete turnaround	DB of automated working station of depot operating engineer (AWS DOE)	AWS DOE	Data on availability of ERS
5	Preparation of initial data to construct TS	Depot employee	Required pairing of movement and time of complete turnaround, depot capacitance	DB AWS DOE	AWS DOE	Places of overnight stop of the routes, assignment of repairs and inspections
6	Determination of places for night placement of trains on the line	Engineer responsible for scheduling of traffic department	Data of metro line, places of overnight stop of the routes	DB ASC PTS MPT	ASC PTS MPT	Scheme of night placement of trains on the line
7	Assessment of availability of necessary human resources	Depot employee	Required pairing of movement, required ERS, initial data	DB AWS DOE	System of interactive drawing up transcripts of shifts of locomotive crews	Report on availability of human resources, initial data to construct work schedule of locomotive crews
8	Selection of modes for driving trains on hauls	Depot employee	Data of metro line and ERS, running time on hauls	DB ASEC	ASEC	Modes for driving ERS on hauls
9	Adjustment of initial requirements for TS and PTS	Engineer responsible for scheduling of traffic department	Data of metro line	DB ASC PTS MPT	ASC PTS MPT	Adjusted requirements



**Pic. 3. Scheme of algorithm of automated appointment of M-1.**



**Pic. 4. A set of attributes of metro lines.**

tracks, each of which is a closed contour. In this regard, it is advisable to divide displaying movements of trains between the depot and each of two tracks, introducing a concept of «virtual» depot, supplementing the physical one. On this basis a single TS is constructed [3].

**Conclusion.** Calculations that were done, have shown the acceptability of procedures and timing of results and compliance of final TS with operation requirements. A software product is developed that implements automated M-1 appointment, described in the article. Its approbation and testing are now in progress regarding various lines of the Moscow Metro.

## REFERENCES

1. Minaev, G.I., Sukhov, S.B., Fedorov, A.G., Fursaev, M.V., Mizgiriev, S.N. Rules of technical operation of metro in Russia [Pravila tehnicheckoj ekspluatacii

metropolitenov RF]. Moscow, Publishing Center TA Engineering, 2003, 128 p.

2. Tsai, Anni et al. EPC Workflow Model to WIFA Model Conversion. In: 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, pp. 2758–2763.

3. Safronov, A.I., Sidorenko, V.G. Scheduling of Metro Traffic. *World of Transport and Transportation*, Vol. 9, 2011, pp. 98–105.

4. Baranov, L.A., Vassilieva, M.A., Ershov, A.V., Maksimov, V.M., Melieshin, I.S. Automated system for selection of energy-optimal modes for metro train control [Avtomatizirovannaja sistema vybora energooptimal'nyh rezhimov upravlenija dvizheniem poezda metropolitena]. *Vestnik MIIT*, 2008, Iss. 19, pp. 3–10.

5. Ford, L.R., Fulkerson, D.R. Flows in Networks [Potoki v setjah]. Moscow, Mir publ., 1966, 276 p.

6. Bellman, R.E. Dynamic programming [Dinamicheskoe programirovanie. Translated from English]. Leningrad, Inostrannaja literatura, 1960, 400 p.

Information about the authors:

**Sidorenko, Valentina G.** – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, valenfalk@mail.ru.

**Safronov, Anton I.** – Ph.D. (Eng.), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, safronov-ai@mail.ru.

**Filipchenko, Constantine M.** – assistant lecturer of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, konstantin-649@mail.ru.

Article received 24.12.2014, accepted 16.04.2015.

