

УДК 656.022.5

**А. М. Горбачёв**Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА РАСПИСАНИЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Необходимость оперативно принимать решения и повышать эффективность работы обуславливают внедрение современных систем повременного и порейсового учета работы подвижного состава. Основным документом для организации учета подвижного состава является расписание движения. Построение расписания вручную занимает от нескольких часов до нескольких дней и является слабо формализованным процессом. Для автоматизации составления расписаний была разработана система автоматизированного построения расписаний движения трамваев и троллейбусов (САПР РДТТ). Программа строит расписания в различных режимах и формирует выходные документы на основе базы технической документации.

городской транспорт, расписание, автоматизация.

### **Введение**

Высокие темпы технического прогресса и необходимость повышения эффективности работы предприятий городского электротранспорта побуждают к внедрению современных систем порейсового учета работы подвижного состава. При этом основным документом, который регламентирует работу транспортных средств на линии, является расписание движения (аналог графика движения на железной дороге).

Построение расписаний представляет собой длительный процесс: в зависимости от сложности расписания (число парков, число нарядов) – от нескольких часов до нескольких дней. Учитывая большое количество маршрутов (в общей сложности более 40 трамвайных и столько же троллейбусных), автоматизация этого процесса обеспечивает значительную экономию времени инженеров производственно-технических отделов.

Общепринятой формой представления расписания городского электрического транспорта в России является таблица, строками которой являются наряды движения, а в ячейках

содержится время прибытия и отправления с конечных станций и из парков (рис. 1).

Ручная технология построения расписаний представляет собой сложный итерационный процесс, отдельные этапы которого практически не формализованы, и результат в значительной мере зависит от квалификации составителя.

## **1 Технология построения расписаний**

### **1.1 Исходные данные**

Исходные данные для построения расписания:

- $\{S\}$  – множество контрольных точек (парков, отстойных площадок и конечных станций), между которыми осуществляется движение (географическая информация и дополнительные атрибуты контрольных точек);
- $\{T\}$  – множество матриц, представляющих время хода по периодам суток между контрольными точками;
- $\{N\}$  – вектор, в котором содержится распределение подвижного состава по категориям. Категории определяют время работы на

САПР РДТ: D:\projects\GET\Docs\2014\Расписания\раб+вых\_11.02.13+16.02.13 база\ТМ\_6\_P\_2013-02-11.txt

Файл Исходные данные Редактирование Настройки Расчет Книга пробегов Справка

	Тип	3	Вып.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Приб.	Прод. смены		
	ЛМ	1р	0446	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	тестрон	т.Ленин	2230	0839/0905		
1	ЛМ	1р	0446			41		10		54		44		19	1906		41								
2	ЛМ	2б	1533											1626	1752	1906	2031	2139	2301	0008		0103	0930		
3	ЛМ	2а	0457			0546	0702	0812	0935	1046	1223													1246	0749
4	ЛМ	3р	0508			0557	0714	0824	0947	1058	1235	1349	1523	1637	1807	1921	2045	2153					2250	0841/0901	
5	ЛМ	4б	1554			0603		34		1118		1406		50	33	2201								2341	0747
6	ЛМ	4а	0519			0608	0725	0835	0959	1112	1247													1310	0751
7	ЛМ	6р	0530			0619	0736	0846	1012	1126	1259	1413	1545	1659	1835	1947	2110	2217						2312	0843/0859
8	ЛМ	8а	0541			0630	0747	0857	1024	1138	1311													1334	0753
9	ЛМ	10р	0552			0641	0758	0908	1039	1153	1323	1437	1607	1721	1849	2001	2124	2231	2346					0006	0845/0929
10	ЛМ	5а	0522			0545	0652	0809	0919	1052	1206	1335												1358	0836
11	ЛМ	7р	0533			0556	0703	0823	0933	1105	1219	1348	1502	1628	1742	1903	2012	2137	2244					2338	0929/0836
12	ЛМ	8б	1612											1638	1752	1916	2025	2150	2257	0011				0031	0819
13	ЛМ	9ду	0544			0607	0714	0835	0945	1119	1233	1400												1423	0839
14	ЛМ	11р	0555			0618	0725	0847	0957	1132	1246	1413	1527	1648	1802	1930	2039	2203	2310					0004	0932/0837
15	ЛМ	12р	0606			0629	0738	0859	1009	1145	1259	1426	1540	1704	1818	1941	2050	2215	2322	0036				0056	0934/0916
16	ЛМ	5б	1646			046		28		1309		47		27	2105		26							0030	0744
17	ЛМ	13р	0617			0640	0749	0911	1021	1158	1312	1439	1553	1720	1834	2007	2116	2241	2348					0046	0936/0853
						58		41		22		1603		53		31		57							

Рис. 1. Таблица расписания движения

линии подвижного состава, количество смен в данном наряде и другие характеристики, относящиеся к режиму труда и отдыха (рис. 2).

Элементы в матрицах  $\{T\}$  (время движения по периодам суток) уже содержат в себе всю необходимую информацию о плановых задержках в движении (время стоянки на остановках общественного транспорта, планируемые задержки, вызванные заторами в движении, и т. д.).

Использование в построении расписания дискретных значений времени (с точностью до минуты) по разным периодам суток ведет к появлению задачи обратного отсчета, т. е. задачи, когда необходимо рассчитать время отправления по заданному времени прибытия  $T_{dep}$  и матрицам из множества  $\{T\}$ . Учитывая,

что в  $\{T\}$  значения дискретные, может оказаться, что в прошлом не существовало такого значения времени, при котором выполнялось бы равенство. Для решения этой задачи был разработан итерационный алгоритм, минимизирующий ошибку.

Применение при построении расписания показателя времени пробега между контрольными точками обусловлено необходимостью учета различных задержек в движении – прежде всего, заторов из-за движения электропоезда в общем потоке вместе с автомобилями. Это является одним из основных отличий исходных данных отечественной технологии построения расписаний от зарубежной. В частности, в Германии время пробега между конечными станциями маршрута является ве-

Данные для категорий	Количество		Время начала выхода на линию	
	Парк 1	Парк 2	Часть 1	Часть 2
Смешанные (сдд)	1	0	0530	
Коренные ранние (р)	0	0	0530	
Коренные поздние (п)	0	2	0730	
Коренные с перерывом (а,б)	0	0	0530	1630
Двенадцатичасовые без перерыва (сд)	0	0	0600	
Двенадцатичасовые с перерывом (са, сб)	3	0	0600	1500
Добавочные на утро (ду)	0	0	0530	
Добавочные на день (дд)	0	0	1300	
Добавочные на вечер (дв)	0	0	1630	
Добавочные с перерывом (да, дб)	0	0	0700	1630

Рис. 2. Информация о подвижном составе по категориям

личной, которую рассчитывает исходя из особенностей подвижного состава (допустимых скоростей), верхнего строения пути (уклонов, радиусов кривых и т. д.) и пассажиропотока, или – в упрощенном случае – на основе средних скоростей. Влияние заторов в движении, вызванных, прежде всего, потоком автомобильного транспорта, не учитывают в связи с тем, что рельсовый транспорт в Европе, как правило, движется по выделенным линиям.

Далее на основе множеств  $\{S\}$ ,  $\{T\}$  и  $\{N\}$  и – при необходимости – дополнительной информации об организации движения строят таблицу расписания, т. е. рассчитывают значения времени прибытия на контрольные точки и отправления с них, исходя из равномерности интервалов между отправками с конечных станций и правилами предоставления различных типов стоянок (обедов, технических стоянок и т. д.).

## 1.2 Технология построения расписания

Перед построением расписания для обеспечения равномерности движения рассчитывают начальный интервал:

$$I = \frac{Tr + St1 + St2}{n}, \quad (1)$$

где  $I$  – рекомендуемый интервал;  $Tr$  – время пробега по трассе между первой и второй конечными станциями, которые содержатся в  $\{T\}$ ;  $St1$  и  $St2$  – рекомендуемые стоянки на первой и второй конечных станциях, соответственно, являются атрибутами соответствующих конечных станций из множества  $\{S\}$ ;  $n$  – число единиц подвижного состава, которые планируется выпустить утром из вектора  $\{N\}$ .

Далее организуют выпуск подвижного состава наутро с учетом рассчитанного начального интервала. Для этого выбирают приоритетную станцию выпуска для каждого парка – ту, которая расположена ближе всего к данному парку.

Время первого отправления для каждой конечной станции  $Tst$  рассчитывают как

$$Tst = \max (Tendstj; Tpist + RunTime (Tpist, Tij)), \quad (2)$$

где  $Tendstj$  – время начала работы  $j$ -й станции;  $Tpist$  – время начала работы  $i$ -го парка;  $RunTime (Tstart, M)$  – функция прямого отсчета времени пробега от парка до конечной станции, в которой  $Tstart$  – время начала отправления,  $M$  – соответствующая матрица

времени пробега;  $T_{ij}$  – матрица времени пробега между парком  $i$  и станцией  $j$ .

После выпуска первой единицы подвижного состава выпускают последующие с интервалом, равным начальному. Выпуск на линию из различных парков осуществляют исходя из необходимости обеспечения равномерных интервалов на линии (с учетом точки слияния парковых трасс с основой), принимая во внимание действующие ограничения (начало работы первой и второй конечных станций, открытие парков).

После выхода утром подвижной состав движется с равномерными интервалами до момента выпуска следующих категорий подвижного состава из множества  $\{N\}$ . Новые единицы подвижного состава выпускают в промежутках между транспортными средствами, работающими на линии, как правило, в полуинтервале.

При этом в середине рабочей смены (если смена не предполагает разрывов в работе) поездной бригаде (водителю и кондуктору) должен быть предоставлен обеденный перерыв. В связи с тем, что подвижной состав одной категории выпускался последовательно с заданным интервалом, обеденный перерыв, как правило, тоже предоставляется последовательно (во время одного и того же круга движения). Таким образом, возникает понятие серии обедов. Серия обедов – это последовательность перерывов водителей и кондукторов, как правило, подвижного состава одной категории. Наиболее типичными для трамвайных и троллейбусных расписаний являются серии утренних и вечерних обедов.

### 1.3 Проблема неравномерности интервалов движения

Во время обеденных перерывов поездных бригад подвижной состав простаивает на конечных станциях. Закрепление водителей за подвижным составом является еще одной важной технологической особенностью построения расписаний на постсоветском пространстве. Это связано, в первую очередь,

со значительным физическим и моральным устареванием вагонов и неравномерным качеством подвижного состава, эксплуатируемого на линии. Увеличенные стоянки во время перерывов создают неравномерные интервалы движения.

Для решения этой проблемы используют различные подходы: предоставляют сокращенные перерывы, входящие во время работы водителей и кондукторов для трамваев, выпускают на линию новые единицы подвижного состава взамен вставших на обед. Использование различных методов выравнивания интервалов на практике в различных сочетаниях ведет к тому, что процесс составления расписания становится эвристическим и неформализованным, когда решение об использовании того или иного метода составитель принимает в зависимости от индивидуальных особенностей расписания (например, возможность наложения спусков и выпусков подвижного состава для различных категорий) и квалификации самого составителя.

## 2 Автоматизация синтеза расписаний городского электротранспорта

### 2.1 Зарубежная и отечественная практика решения проблемы равномерности интервалов

В практике работы железных дорог и метрополитенов, а также на городском электрическом транспорте за рубежом (в частности, в Европе), отсутствует закрепление поездных бригад за подвижным составом: во время перерывов в работе одной бригады движением транспортного средства управляет другая бригада. В результате организации смен бригад интервалы в расписании могут быть одинаковыми на протяжении всего движения и регулироваться в зависимости только от пассажиропотока. Однако в этом случае большую сложность приобретает составление расписания водителей, появляется задача распределить поездные бригады по транспортным средствам и минимизировать число во-

дителей и кондукторов. Указанные различия в технологии составления расписаний в России и за рубежом обуславливают необходимость создания специализированного программного обеспечения для решения этой задачи.

Полное повторение ручной технологии построения расписания при создании алгоритмов автоматизированного и автоматического построения расписаний невозможно в силу разделения задачи на большое количество индивидуальных случаев и большой эвристической составляющей.

## 2.2 Алгоритмизация синтеза расписаний движения

Для решения задачи составления расписаний используют различные математические методы, подробнее изложенные в [1, 2]. Большинство этих методов основано на различных технологиях поиска и перебора вариантов, требующих значительных затрат машинного времени при выполнении расчетов.

Задачу построения разделили на две подзадачи: синтез структуры расписания и выравнивание интервалов. На первом этапе синтезируется структура расписания в соответствии с технологией ручного построения расписания, время прибытия рассчитывается исходя из времени пробега по трассе, время отправления – на основе рекомендуемых стоянок без учета требования равномерности интервалов, время выпуска подвижного состава из парков и спуска подвижного состава в парк – на основе рассчитанных значений прибытия и отправления с конечных станций.

На втором этапе выравнивают интервалы.

В цикле по каждой конечной станции для каждого времени отправления  $Tdep_{ij}$ , где  $i$  – номер наряда в таблице расписания,  $j$  – номер стоянки, рассчитывают новое значение времени отправления – такое, чтобы обеспечивать максимально равномерные интервалы по всему расписанию и выполнять ограничения сверху и снизу:

$$Tdep1 < Tnewdep_{ij} < Tdep2, \quad (3)$$

где  $Tdep1$  – ограничение снизу (например, время отправления предыдущего транспортного средства с данного конечной станции);  $Tdep2$  – ограничение сверху (например, время отправления следующего транспортного средства с данной конечной станции).

При этом отправки различных типов  $Tnewdep_{ij}$  были распределены по группам в зависимости от приоритетов  $Pr$ . Приоритеты  $Pr$  назначают в зависимости от типа конечной станции. Конечные станции могут быть распорядительными, т. е. такими, на которых возможна относительно большая стоянка (как правило, около 5–10 минут), и оборотными (как правило, стоянка 0–2 минуты).

Максимальное значение приоритета  $Pr$  принимают для значений времени отправления с приоритетной распорядительной конечной станции на другую распорядительную или оборотную:

$$Pr(Tnewdep_{ij}) = \max, \quad (4)$$

где  $Tnewdep_{ij}$  – время отправления с приоритетной распорядительной конечной станции.

Минимальное значение приоритета принимается для значений времени отправления с конечной станции в парк:

$$Pr(Tnewdep_{ij}) = \min,$$

где  $Tnewdep_{ij}$  – время отправления с конечной станции в парк.

Значения отправок выравнивают в порядке снижения приоритетов.

После выравнивания времени отправок пересчитывают зависимые параметры: время прибытия на конечные станции, отправления из парков прибытий и т. д.

Указанные алгоритмы были реализованы в САПР РДТТ, где возможны следующие режимы построения расписания движения:

- ручной – пользователь вручную добавляет наряды и рейсы, автоматически рассчитывается только время пробега на основе  $\{T\}$  и  $\{S\}$ ;

- автоматизированный – пользователь вручную формирует структуру расписания, интервалы выравниваются автоматически;
- автоматический – пользователь задает  $\{T\}$ ,  $\{S\}$ ,  $\{N\}$  и – при необходимости – дополнительную информацию об организации движения, а система автоматически формирует расписание движения.

## Заключение

На основе построенного сотрудниками производственно-технического отдела службы движения ГУП «Горэлектранс» расписания формируется более 50 различных документов, наиболее важными из которых являются «Водительская карточка», «Контрольные засечки», «Наряд выпуска подвижного состава» и некоторые другие. В числе прочего благодаря этим документам осуществляются сверки времени выхода подвижного состава с конечных станций и из парков, а также одно-временного предоставления обеденных перерывов на конечных станциях.

«Водительское расписание» (или «водительская карточка») является основным документом, на основе которого поездная бригада работает при движении по маршруту. При нынешней технологии построения расписаний с закреплением поездных бригад за транспортными средствами содержимое этого документа однозначно определяется расписанием.

Учитывая текущую потребность в импортозамещении, разработанная система полностью состоит из библиотек с открытым исходным кодом и компонент, права на которые принадлежат отечественным разработчикам.

САПР РДТТ используется в СПб ГУП «Горэлектротранс» для построения расписаний трамвайных и троллейбусных маршрутов с 2008 г. По результатам последних испытаний, проведенных сотрудниками производственно-технического отдела службы движения СПб ГУП «Горэлектротранс» совместно с разработчиками программы в 2013 г., производительность труда при составлении расписания повысилась в 6–8 раз в зависимости от типа расписания.

## Библиографический список

1. **Искусственный** интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люггер. – Москва : Вильямс, 2005. – 864 с.
2. **Полиномиальный** алгоритм построения расписания грузовых перевозок одним локомотивом между тремя железнодорожными станциями / А. А. Карпычев. – URL: <http://www.orsot.ru/index.php/ru/blog/item/polinomialnyi-algoritm-postroeniya-raspisaniya-gruzovykh-perevozok-odnim-lokomotivom-mezhdu-tremya-zheleznodorozhnyimi-stantsiyami> (дата обращения 1.11.2014).