

Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ГРАФИКА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Для подвижных объектов железнодорожного транспорта, располагающихся в пристанционных зонах и в пределах путевого хозяйства крупных промышленных предприятий, актуальной является задача определения местоположения подвижного состава с погрешностью не более 1 м. В данном проекте разработана схема планирования поездного положения и алгоритм расчета максимально допустимой скорости поездов, в котором реализован дифференциальный способ вычисления параметров местоположения объекта вблизи зоны его расположения или перемещения. В данном проекте предложено реализовать управление железнодорожными электропоездами на основе модульной сети ZigBee. Применение данного решения позволит сократить энергопотребление всей системы.

**Ключевые слова:** прогнозирование транспортного графика электропоездов, местоположение подвижного состава, аварийный коэффициент, максимальная скорость состава, модульная сеть ZigBee.

### ВВЕДЕНИЕ

Первоочередной задачей организации и функционирования электротранспортного хозяйства на предприятиях считается своевременное и бесперебойное обслуживание производственных участков транспортными средствами по передвижению грузов.

Для предприятий со стабильными, устойчивыми грузопотоками при массовом производстве грузоперевозки осуществляются согласно графикам, по установленным маршрутам и с одинаковой интенсивностью. При нестабильных грузопотоках в условиях серийного или единичного производства транспортировка грузов возможна на основе единичных заданий или укрупненного сменного графика.

В развитых зарубежных странах важным направлением совершенствования работы железнодорожного транспорта является разработка научно обоснованных методов управления железнодорожной сетью [1].

Целью данного проекта является разработка и усовершенствование системы управления железнодорожным электротранспортом предприятия. Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм прогнозирования времени движения состава по заданному участку железнодорожной сети с учетом всех ограничивающих факторов. В качестве ограничивающих факторов будут использоваться следующие параметры: время аварийного простоя поезда и предельно допустимое количество поездов на участке.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТОМ

Для железных дорог США типовой информационно-управляющей системой является система, подготовленная Федеральной железнодорожной администрацией и компанией Миссури Пасифик. В качестве базовой принята система «TransportationControlSystem» (TCS). Ее отличительной чертой принято считать возможность отслежива-

ния перевозки на всем маршруте от пункта погрузки до пункта назначения. Во всех других имеющихся системах данные о погрузке поступают не с грузовой станции, а лишь по факту проследования груженого вагона первой или последней сортировочной станции [1–3].

Для железных дорог Германии в сфере грузовых перевозок важнейшей задачей является комплексное управление потоками вагонов. Основной целью которого является достижение большей эффективности использования подвижного состава. На протяженных участках управление осуществляется с помощью системы типа «участкового автодиспетчера». На сортировочных станциях управление осуществляется с помощью автономных подсистем, обеспечивающих расформирование и формирование составов [4].

Промышленные предприятия имеют сложную структуру путевого развития, с размером межпутевого расстояния около 4 м. Подвижные объекты железнодорожного транспорта располагаются в пристанционных зонах и в пределах путевого хозяйства крупных промышленных предприятий. Для указанных зон существуют повышенные требования к обеспечению безопасности и надежности процессов движения подвижного состава и диспетчерского управления им [5–7]. В связи с этим актуальной является задача определения местоположения подвижного состава с погрешностью не более 1 м.

При формировании системы прогнозирования и контроля движения транспорта нами предложено реализовать дифференциальный способ вычисления параметров местоположения объекта. Для этого вблизи зоны расположения или перемещения объекта следует разместить одну или две базовые станции, обеспечивающие вычисление дифференциальных поправок. Между стационарными элементами системы, такими как базовые станции и диспетчерские пункты, требуется наличие телекоммуникационной инфраструктуры на базе проводных каналов связи. Для информационного обмена с железнодорожными транспортными средствами организуется беспроводной доступ.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ

У грузового электровоза, по сравнению с пассажирским тяговым подвижным составом, имеется ряд особенностей. Данный прототип локомотивов можно использовать на предельной мощности, причем имеется возможность снижения скорости состава на некоторых участках маршрута, даже при наибольшем тяговом усилии. Число ходовых позиций контроллера незначительно: от пятнадцати на электровозах постоянного тока до тридцати шести на электровозах переменного тока. Электровозы постоянного тока имеют области на тяговой характеристике, для которых не имеется ходовых позиций котроллера. Вес состава влияет на перерогное время хода [7–9].

Частым является использование режима движения, который требует адаптации скорости передвижения к сигналам АЛСН (автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа). Предельно допустимые усилия в составе накладывают значительные ограничения на выбор режима управления локомотивом. В связи с этим ускорение поезда не превышает показания 0,1 м/с<sup>2</sup>. Поскольку при ведении грузового состава следует решать и задачи управления пассажирского поезда, то система автоматического управления грузового поезда включает в свой состав и систему автоматического управления пассажирским электровозом. Автоматического ведение грузового состава предполагает выполнение следующих задач:

- управлять тяговым электродвигателем локомотива с максимально возможным использованием его тяговых возможностей;
- в соответствии с планом и профилем пути формировать управляющие сигналы, которые позволяют обеспечивать допустимые продольно динамические силы в подвижном составе на установленном нормами уровне.

Применение микропроцессорной системы автоматического ведения для управления тяговым электродвигателем в зависимости от профиля и плана путей, показателей проскальзывания колесных пар и погодных условий обеспечит максимальное использование мощности тягового электродвигателя локомотива при установленном уровне надежности тягового оборудования, минимизировав расход электроэнергии [9–13].

При создании системы автоматического управления грузового электровоза необходимо планирование поездного положения. При этом следует учитывать такие аспекты, как поток поездов, норматив времени следования, объем грузовых работ, норматив времени стоянок, наличие вагонов. Схема планирования поездного положения показана на рис. 1.

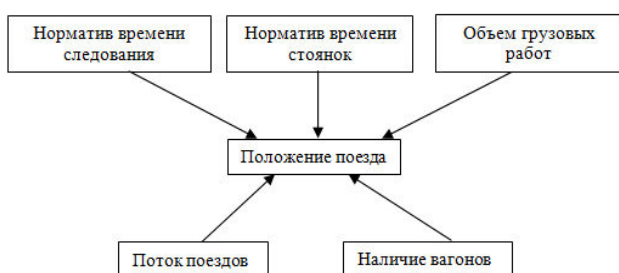


Рис. 1. Схема зависимости положения поезда от ограничивающих факторов

При решении задачи прогнозирования положения поезда в качестве критерия предлагается использовать минимум переработки вагонов. Технология переработки вагонов включает все операции, связанные с расформированием прибывающих поездов, накоплением новых составов, подготовкой их к отправлению и непосредственно отправлению вновь сформированных поездов со станции. Для определения переработки поезда необходимо рассмотреть величину вагонопотоков  $N_{ij}$ , где  $i$  – номер пункта отправления,  $j$  – номер пункта прибытия. Так же устанавливаются кратчайшие маршруты  $s_{ij}$ . Для каждого участка заданы приведенные затраты на накопление  $cm_{ij}$ . По начальным станциям  $l$  вагонопотока задается  $T_{экиj}$  – экономия от проследования одного вагона, проходящего по участку маршрута  $s_{ij}$  через станцию  $l$  без переработки. Для каждой станции также присутствует ограничение по количеству путей  $n_i$  выделенных под накопление составов поездов сетевого плана. Если назначение  $ij$  не входит в план формирования, то его мощность  $n_{ij}=0$ , иначе  $n_{ij}$ , равняется сумме вагонопотоков, включаемых в это назначение:

$$n_{ij} = \sum_{l,m=1}^p N_{lm} \xi_{ij}^{lm}, \quad (1)$$

где  $\xi_{ij}^{lm}=1$ , если вагонопоток  $N_{lm}$  входит в назначение  $ij$ , иначе 0;  $m$  – величина состава;  $p$  – вершины (станции) транспортной сети;  $l$  – длина участка сети.

Приведенные затраты на переработку вагонов на станции  $i$  вычисляются как

$$\sum_{j=1}^p (n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj}.$$

Расчет плана формирования однопутных поездов в целом для сети выделенных станций приводит к решению задачи целочисленного линейного программирования при минимизации функции  $C$ :

$$C = \sum_{l,m=1}^p \{ (cm_{lm} \xi_{ij} + n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj} \}. \quad (2)$$

Задача поиска оптимального плана формирования поездов решается методом улучшения плана. Каждому множеству выделенных назначений  $M_v$  для каждой станции по числу выделенных путей соответствует план формирования однопутных поездов с оптимальным прикреплением вагонопотоков  $N_{ij}$  к этим назначениям  $n_{ij}$  и соответствующим значением целевой функции приведенных затрат  $C$ . Минимальное значение  $C$  соответствует оптимальному варианту.

Для повышения точности вычислений необходимо добавить поправочный аварийный коэффициент  $G_{ав}$ , учитывающий увеличение времени загрузки и разгрузки, наличие аварий на пути следования, а также другие ограничивающих факторы:

$$C = \sum_{l,m=1}^p \{ (cm_{lm} \xi_{ij} + n_{ij} - N_{ij}) T_{экиj} G_{ав} \}. \quad (3)$$

Дополнительными ограничивающими факторами могут быть:

- минимизация затрат времени простоя на всех участках;
- количество поездов на участке должно быть меньше допустимого значения числа поездов;
- груз должен быть транспортирован в установленные сроки (пункт назначения, время хода поезда, время доставки).

Введение поправочного коэффициента позволит точнее спрогнозировать положение железнодорожного транспорта и оптимально составить план формирования поездов.

Для предотвращения столкновений и аварий на железнодорожных путях необходимо точное прогнозирование времени прохождения участков пути локомотивом. При расчете времени нужно брать в расчет количество локомотивов, проходящих через линию сети железных дорог, и время прохождения каждым локомотивом данной линии. Время прохождения складывается из времени разгона, времени движения на максимально допустимой скорости, времени торможения, времени аварийного простоя на линии.

$$\tau_{\text{прох}} = \tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{макс}} + \tau_{\text{торм}} + \tau_{\text{авар}} \cdot \quad (4)$$

Ниже представлена схема расчета максимально допустимой скорости на заданном участке (рис. 2). Время разгона, торможения при максимально допустимой скорости жестко связано с техническими характеристиками тягового электродвигателя локомотива, количества вагонов, а также их загруженностью. В зависимости от времени простоя предыдущего поезда в конечном пункте может быть произведен перерасчет максимальной скорости движения на участке для следующего локомотива. Данный расчет необходим и жестко связан с технологией производства.



Рис. 2. Схема алгоритма расчета максимально допустимой скорости

Приведенный алгоритм позволяет постоянно производить перерасчет скорости движения транспорта. Эта особенность обеспечивает более точное прогнозирование времени движения и местоположения транспорта на всех участках пути, благодаря мгновенному учету поправок плана движения.

СЕТЬ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ЛИНИЯМИ

В зависимости от длины транспортного пути и сложности транспортной сети для управления транспортными линиями применяются комбинированные системы или моносистемы. Широкое применение нашли моносистемы, реализация которых основана на телекоммуникационной инфраструктуре с наличием различного количества телеметрических датчиков [4, 6, 8]. Применение комбинированной системы при закрытых транспортных путях ограничено наличием GPS-сигнала (GPS трекеры).

Для локальных железнодорожных путей межцехового назначения в данном проекте предлагается использовать модульные сети на основе протокола ZigBee. Протоколы ZigBee предоставляют возможность делать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сенсорные сети. Достоинствами использования сети на основе устройств ZigBee являются:

- способность при включении питания самостоятельно находить ближайшие сетевые модули и создавать сеть за счет встроенного программного обеспечения;
- формирование новых маршрутов для передачи данных в случае неисправности какого-либо из узлов сети.

В сеть ZigBee включены три типа логических устройств: координатор ZigBee, маршрутизатор ZigBee и оконечное устройство ZigBee. К основным функциям координатора ZigBee можно причислить сканирование частотных каналов для нахождения свободного канала и формирование сети, создание идентификатора сети (PAN ID), подключение новых сетевых устройств, маршрутизация и буферизация данных для спящих оконечных узлов. Причем в одной сети ZigBee находится лишь один координатор. Ретрансляция пакетов, маршрутизация и буферизация данных для спящих оконечных узлов являются основными функциями маршрутизатора ZigBee. Оконечные узлы ZigBee не выполняют ретрансляцию, а только осуществляют сбор информации и управляют удаленным объектом.

Протоколы ZigBee используются не только для реализации несложных соединений, таких как «точка-точка» и «звезда», но и для создания более сложных сетей с топологиями «дерево» и «ячеистая сеть». На дальность передачи сигнала от узлов ZigBee влияют такие параметры, как чувствительность приемника и мощность передатчика.

В сети ZigBee только оконечные узлы могут переходить в «спящий режим» (сон). Это позволяет сократить энергопотребление всей системы, а также влияет на экономический фактор выбора данной сети [2, 3, 4, 5].

В составе автоматизированных систем управления движением поездов (АСУДП) находятся технические, технологические и организационные средства, которые позволяют повысить уровень диспетчерского руководства движением на всех участках и направлениях железнодорожных путей. Их использование дает возможность придерживаться точного выполнения графика движения, повышения использования пропускной способности участков и направлений, перерабатывающей способности станций, увеличения производительности

труда диспетчеров, рабочих бригад локомотивов, дежурных по станциям. АСУДП включают в свой состав системы автоматического ведения поездов (САВП), интервального регулирования движения поездов (ИРДП), диспетчерского управления [7, 9].

Использование протоколов ZigBee при создании АСУ железнодорожным транспортом производства позволит достичь стабильности работы системы, благодаря самовосстановлению и самореорганизации. Также благодаря спящему режиму оконечных узлов сети ZigBee и возможности использования беспроводных технологий позволит увеличить экономических эффект данной системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизация транспортного потока железной дороги – сложный технологический процесс. Для точного прогнозирования и правильного установления транспортного графика необходимо учитывать все ограничивающие факторы.

В данном проекте:

- формирование улучшенной системы прогнозирования и контроля движения электротранспорта выполняется дифференциальным способом вычисления параметров местоположения объекта вблизи зоны его расположения или перемещения;

- в расчеты для учета аварийных ситуаций, приводящих к увеличению времени нахождения электропоезда, на участке введен коэффициент корректировки по аварийности;

- разработан алгоритм расчета максимально допустимой скорости электропоезда;

- использование беспроводных технологии уменьшит затраты на телекоммуникационные линии. Применение сетей ZigBee увеличит эффективность работы АСУ за счет использования спящего режима оконечных устройств и стабильность ее работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужель А.Л., Шапкин И.Н., Вдовин А.Н. Информационно-аналитические технологии оперативной корректировки и контроля выполнения плана формирования поездов//Железнодорожный транспорт. 2011. № 7. С. 13–20.

2. Шапкин И.Н., Самойлова И.М. О переходе к технологии организации движения грузовых поездов по расписанию // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 14–17.
3. Осьминин А.Т., Никифорова О.А. Определение эффективности организации маршрутов с мест погрузки в современных условиях // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 1. С. 91–100.
4. Верлан А.И. Совершенствование методов стимулирования отправительской маршрутизации на железнодорожном транспорте // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2014. № 1(49). С. 75–85.
5. Березовый Н.И. Перевозка металлургической продукции кольцевыми маршрутами по расписанию с использованием частных локомотивов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(3). С. 51–55.
6. Козаченко Д.Н., Верлан А.И., Германюк Ю.Н. Исследование эффективности организации перевозок металлургических грузов по расписанию // Вестник Белорусского Государственного университета транспорта. 2013. № 1(26). С.52–54.
7. Баланов В.О. Анализ факторов, влияющих на обеспечение движения грузовых поездов по расписанию // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень. 2015. № 10. С. 5–9.
8. Jung J. U, Kim H. S. Strategies for Improving the Profitability of a Korean Unit Train Operator: A System Dynamics Approach. *Advances in Swarm and Computational Intelligence*. 2015. P. 275–283.
9. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.J. C. M. *Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach*. Springer Verlag, LNCS. 2007. Vol. 4359. P. 41–66.
10. Ślaskowski A., Cieśla M. Influence of a potential railway line connecting the Caspian Sea with the Black Sea on the development of Eurasian trade // *Our Sea*. 2015. Vol. 62. №.4. P. 264–271.
11. Kenkel P. An Economic Analysis of Unit-Train Facility Investment // Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University. 2004. P. 3–14.
12. Landex A. Reliability of Railway Operation // *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2013. P. 63–81.
13. Schittenhelm B. Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables // *Processings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2011. P. 47–61.

Поступила в редакцию 23 мая 2017 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### SYSTEM FOR PREDICTING THE TRANSPORT SCHEDULE OF ELECTRIC TRAINS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Inna I. Barankova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Ulyana V. Mikhailova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

George I. Lukyanov

Teaching Assistant, Department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

For the mobile objects of railway transport which are settling down in station zones and within traveling facilities of the large industrial enterprises, the problem of definition of location of the rolling stock with a margin error no more than 1 m is quite urgent. In this project, the research group has developed a planning scheme of train position and the algorithm for computing the maximum permissible train speed, in which a differential method for calculating the parameters of the location of an object near its location or displacement is used. In this project it is offered to carry out the management of railway electrical trains on the basis of the modular network ZigBee. The application of this solution will reduce the energy consumption of the entire system.

**Keywords:** Forecasting of transport schedule of electric trains, train location, emergency ratio, the maximum speed of trains, modular network of ZigBee

REFERENCES

1. Kuzhel A.L., Shapkin I.N., Vdovin A.N. Information and analytical technologies of expeditious adjustment and control of implementation of the plan of formation of trains. *Railway transport*. 2011, no. 7, pp. 13–20. (In Russian)
2. Shapkin I.N., Samoylova I.N. Transition to technology of organization of cargo train movement on the schedule. *Railway transport*, 2012, no. 3, pp. 14–17. (In Russian)
3. Osminin A.T., Nikiforova O.A. Determination of efficiency of the organization of routes from shipping places in modern conditions. *The Bulletin of Rostov state transport university*, 2008, no. 1, pp. 91–100. (In Russian)
4. Verlan A.I. Stimulation methods improvement of exit route on railway transport. Science and transport progress. *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 1(49), pp. 75–85. (In Russian)
5. Berezovy M.I. Transportation of steel products by circular route on schedule with private locomotives. *East European Journal of advanced technologies*, 2014, no. 2(3), pp. 51–55.
6. Kozachenko D.N., Verlan A.I., Germanyuk Yu.N. Research of efficiency of organization of transportation of metallurgical cargoes on schedule. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport*, 2013, no. 1(26), pp. 52–54. (In Russian)
7. Balanov V.O. Analysis of factors affecting the provision of freight Trains on timetable. *Collection of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Transport systems and transport technologies*, 2015, no. 10, pp. 5–9.
8. Jung J.U., Kim H.S. *Strategies for Improving the Profitability of a Korean Unit Train Operator: A System Dynamics Approach* [Advances in Swarm and Computational Intelligence]. 2015, pp. 275–283.
9. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.J. C. M. Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach. Springer Verlag. LNCS. 2007, vol. 4359, pp. 41–66.
10. Śładkowski A., Cieśla M. Influence of a potential railway line connecting the Caspian Sea with the Black Sea on the development of Eurasian trade. *Our Sea*. 2015, vol. 62, no. 4, pp. 264–271.
11. Kenkel P. An Economic Analysis of Unit-Train Facility Investment. *Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University*. 2004, pp. 3–14.
12. Landex A. Reliability of Railway Operation. *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2013, pp. 63–81.
13. Schittenhelm B. Planning with Timetable Supplements in Railway Timetables. *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*. 2011, pp. 47–61.

Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И. Система прогнозирования транспортного графика электропоездов промышленного предприятия // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 66–70. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-66-70](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-66-70)

Barankova I.I., Mikhailova U.V., Lukyanov G.I. System For Predicting The Transport Schedule Of Electric Trains Of Industrial Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 66–70. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-66-70](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-66-70)