



Автоматическое управление движением поездов метрополитена



Леонид БАРАНОВ

Leonid A. BARANOV

Automatic Control of Metro Trains

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 162)

Анализируется опыт развития отечественных систем автоматического управления движением поездов метрополитена с учётом высокой интенсивности и небольшой избыточности пропускной способности линий, необходимой для компенсации возмущений. Приведён краткий обзор становления АСУ, показана динамика изменений в системах автоведения. Дан анализ трансформации алгоритмов централизованного управления движением метropоездов, особенностей регуляторов времени хода, требований к построению технических средств определения пройденного пути и скоростного режима.

Ключевые слова: метрополитен, система автоматического управления движением, динамика развития, безопасность, автоведение, регуляторы времени хода, алгоритмы.

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Системы автоматического управления движением поездов метрополитена (САУ ДПМ) содержат подсистемы диспетчерского управления, автоведения и обеспечения безопасности движения.

Система автоведения предназначена для качественного выполнения заданного объёма под контролем системы обеспечения безопасности движения. Качественное выполнение заданного объёма перевозок трансформируется в требования точного выполнения заданного графика движения поездов при компенсируемых возмущениях, автоматического перестроения графика движения и его выполнения при некомпенсируемых возмущениях [1].

Подсистемы обеспечения безопасности движения функционируют либо совместно с системами автоведения, либо самостоятельно при «ручном» управлении поездом. С точки зрения автоматизации управления движением системы обеспечения безопасности накладывают ограничения на управление. Их команды пользуются высшим приоритетом.

ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ И АВТОНОМИЯ

Эффективность системы автоматического управления движением поездов предлагает:

— повышение использования пропускной способности и увеличение провозной способности за счёт более точного выполнения графика движения;

— повышение безопасности движения за счёт уменьшения вероятности опасного сближения поездов;

— уменьшение затрат энергии на тягу поезда за счёт выбора энергооптимальных режимов управления поездом и оптимального по критерию минимума энергозатрат распределения времени хода по линии на время движения по перегонам.

По уровню централизации системы автоматического управления движением поездов метрополитена делят на централизованные и автономные. Централизованные САУ ДПМ получают информацию о моментах прибытия и отправления всех поездов по всем станциям и вырабатывают команды управления каждому поезду. Эти команды реализуются поездными устройствами автоведения. Автономные САУ ДПМ в соответствии с заданным расписанием осуществляют управление только одним поездом. Компенсация возмущений реализуется системой автоматического управления каждого поезда независимо от расположения остальных поездов на линии и определяется алгоритмами управления, наличием ресурса регулирования и ограничениями, накладываемыми системой обеспечения безопасности движения.

Централизованные системы обладают большими возможностями, так как наличие информации о положении всех поездов на линии позволяет более гибко и эффективно компенсировать различные возмущения. На метрополитенах в условиях интенсивного движения, при малых ресурсах нагона, высокой степени использования пропускной способности централизация добавляет системе необходимые свойства для обеспечения требуемого качества управления.

Централизованная система автоведения содержит два взаимосвязанных функциональных уровня управления. Верхний уровень определяет рассогласование между плановым и исполненным графиками движения и при компенсируемых возмущениях выбирает способы управления (длительность стоянок и оптимальное время хода для каждого поезда линии). В случае не-

компенсируемых возмущений верхний уровень рассчитывает новый график движения и осуществляет управление в соответствии с этим графиком. Нижний уровень реализует управление, задаваемое верхним уровнем. Аппаратно роль нижнего уровня играют поездные устройства автоведения. В соответствии с таким способом построения системы автоведения её разработка и внедрение имеют два этапа. На первом этапе обрабатываются поездные устройства автоведения в автономном режиме, на втором — алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечения верхнего уровня и совместное функционирование обоих уровней.

Международный союз общественного транспорта рассматривает пять уровней автоматизации управления движением поездов (от G0A0 до G0A4) [2]. Обзор развития систем автоведения приведён в [3], где в свою очередь отмечено, что наиболее полный список метрополитенов, оборудованных САУ ДПМ, содержится в [4].

ВЫСОКАЯ ПРИЦЕЛЬНОСТЬ ТОРМОЖЕНИЯ

Первая автономная система автоведения разработана НИИ УВМ г. Пензы и испытана на Московском метрополитене в 1961 году. Поездные устройства были реализованы на базе управляющей вычислительной машины, построенной на феррит-транзисторных модулях. Сразу же после этого начали создание централизованных систем. В конце 60-х годов прошлого века разработана и внедрена программно-моделирующая система автоведения Ленметро (ПМСАУ ДПМ) на Невско-Васильевской и Петроградской линиях (ею занимались Ленинградский метрополитен и институт «Гипротрансигнализация»), затем появилась система автоведения Московского метрополитена (САММ) на Калужско-Рижской линии (разработчики Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) и столичный метрополитен). Системы использовали аппаратные средства на дискретных полупроводниковых элементах — транзисторах и диодах.

Программа торможения в ПМСАУ ДПМ была реализована с помощью шлейфа проводов, расположенных на пути. Управление временем хода на перегоне осуществлялось



временем выбора дополнительного движения в режиме тяги относительно контрольной точки. Выбор времени хода по перегону вычислялся при этом с помощью сравнения планового и исполненного графиков движения (графиковый алгоритм управления).

Централизованная система автоведения САММ, построенная на транзисторно-диодной системе элементов серии «Спектр», имела трёхуровневую структуру (центральный пост управления, станционные и поездные устройства). Положение поезда в этой системе находили индуктивными датчиками, расположенными на пути. При проезде датчиков в стационарное устройство поступали импульсы, сумма которых определяла координату поезда. Время выключения тягового двигателя вычислялось станционным устройством, команда отключения с целью выполнения заданного времени хода по перегону передавалась на поезд также через индуктивные датчики, расположенные в зоне выключения тяги. Централизованное управление реализовывалось методом сравнения плановых и исполненных интервалов движения поездов (интервальный алгоритм управления) [1].

В 1979–1980 годах внедрены комплексные системы автоматического управления движением поездов на Московском, Ленинградском, Харьковском и Ташкентском метрополитенах. Отличительными чертами этих систем являются наличие управляющего вычислительного комплекса на центральном посту и функциональное объединение систем автоведения с системами безопасности движения (АРС). Термин «комплексная» отражал как раз это объединение. В числе разработчиков комплексных систем кроме самих метрополитенов были МИИТ, ВНИИЖТ, «Гипротранссылсвязь».

Развитие средств микропроцессорной техники, повышение надёжности и экономичности вычислительных комплексов сделали актуальной разработку нового поколения систем автоматического управления движением поездов. К 1985 году в МИИТ создали АСУ, в которой были широко представлены микропроцессорные средства вычислительной техники. Последние позволили использовать более сложные и эффективные алгоритмы управления,

повысить надёжность и «живучесть» системы за счёт разумного резервирования, убрать с пути шлейфы проводов, индуктивные датчики. Совместно с НПО «Алмаз» было разработано и специальное поездное устройство [5]. В 1990 году проведены в автономном режиме автоведения эксплуатационные испытания бортовых устройств поездов с пассажирами на Харьковском метрополитене. Погрешность в выполнении заданных временных ходов по перегону во всем диапазоне их изменения не превышала $\pm 2,5$ с, погрешность остановки поезда на станции укладывалась в 30 см. При этом интенсивность прицельного торможения составляла порядка $0,75\text{--}0,8$ м/с² [6].

Распад СССР не дал возможность продолжить эту работу. Вместе с тем её результаты были использованы в совместном проекте МИИТ и НИИ точной механики (Санкт-Петербург). Вариант бортового устройства автоведения внедрён в рамках системы «Движение» на метрополитенах Санкт-Петербурга и Казани. В 90-е годы МИИТ начал аналогичную работу с Научно-исследовательским институтом приборостроения (НИИП) им. В. В. Тихомирова.

НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ

НИИП им. В. В. Тихомирова создана и внедрена автоматизированная система управления, диагностики и безопасности движения нового поколения «Витязь» [7]. Логическим её продолжением явилось использование бортовых микропроцессорных поездных устройств в режимах автоведения, работающих на первом этапе в автономном режиме. Поездные устройства реализуют автоматический пуск поезда, выбор заранее фиксированных режимов управления тягой, прицельное торможение поезда у платформы, подтормаживание поезда по скоростным ограничениям, автоматизированное управление дверьми.

Принцип построения и алгоритмы функционирования поездного устройства автоведения используют опыт, полученный при проектировании АСУ ДПМ. Информация о пути, пройденном поездом, его скорости получается бортовым устройством от частотно-импульсного датчика вращения колёсной пары. Для компенсации погрешности измерения в фиксированных точках пути расположены радио-

датчики RFID, не требующие подключения питания. Энергия для функционирования RFID выделяется из высокочастотного сигнала, генерируемого на поезде при проезде датчика. В свою очередь RFID генерирует сигнал, передающий поезду сообщение о своей координате, номере перегона. Разрядность сообщения позволяет передавать дополнительную информацию о характеристиках перегона.

Ответный сигнал, генерируемый датчиком, имеет колоколообразную диаграмму направленности. С точки зрения необходимости передачи большого объёма информации на высоких скоростях движения поезда это положительное качество. Вместе с тем «размытость» фиксации корректирующей точки отрицательно сказывается на повышении точности измерения пройденного пути поездом. Дополнительное расположение датчиков RFID на станции при более низких скоростях движения поезда позволяет уменьшить влияние «размытости». Как показали испытания, проведённые на Московском метрополитене, сегодня требуемая точность остановки может быть достигнута [8, 9].

Тем не менее необходимая точность прицельной остановки получена дорогой ценой – уменьшением интенсивности и связанным с этим увеличением времени торможения. При заданном времени хода по перегону увеличение времени торможения приводит к значительному перерасходу энергии на тягу. Проведённые специалистами МИИТ исследования показали, что увеличение времени торможения только на 1 секунду поднимает расход энергии приблизительно на 1 %. Этот показатель практически не меняется как при использовании рекуперативного тормоза, так и без него. Требование максимизации интенсивности торможения для обеспечения минимума расхода энергии при заданном времени хода по перегону обосновано в целом ряде работ [напр.: 1, 10].

Перспективным, по мнению автора, является комплексное использование RFID и инфракрасных датчиков коррекции пути (ДКП) [1, 11], состоящих из приёмо-передатчика, установленного на поезде, и пассивных уголкового отражателя, прикреплённых к стенке тоннеля. Передатчик, работающий в инфракрасном диапазоне,

формирует сигнал – ИК-луч, направленный в сторону боковой стенки тоннеля. При проезде пассивного многоэлементного оптического уголкового отражателя (катафота) происходит отражение луча, который попадает на приёмник, где фиксируется прохождение корректирующей точки. Кроме того, при расположении двух ДКП на фиксированном расстоянии, например 100 м, бортовое устройство, суммируя число импульсов, поступающих с частотно-импульсного датчика, каждый раз автоматически определяет радиус колеса, что позволяет исключить погрешность измерения радиуса колеса во время эксплуатации [1]. Достоинством ДКП является и точность определения координаты корректирующей точки.

Имеется положительный опыт использования этого датчика при испытании АСУ ДПМ на Харьковском метрополитене и длительной эксплуатации ДКП в системе автоведения метрополитена Санкт-Петербурга. Комплексное использование RFID и ДКП позволяет реализовать достоинства обоих датчиков: возможность передачи большого объёма информации с пути и точности фиксации корректирующей точки. Одновременно можно повысить функциональную надёжность тракта измерения пути и скорости поезда.

Учитывая исключительно важное значение точности измерения пройденного пути и скорости поезда, актуальным становится разработка доплеровских измерителей. Минимизация погрешности измерения пути и скорости оказывает существенное влияние на современные системы обеспечения безопасности движения на базе радиоканала. Пропускная способность в этом случае однозначно связана с точностью измерения пути и скорости. Анализ возможности внедрения систем обеспечения безопасности движения на базе радиоканала рассмотрен в [12].

В разработанных НИИП им. В. В. Тихомирова поездных устройствах предусмотрена связь по радиоканалу со стационарными системами. Принятые принципы построения бортового устройства автоведения и объединяемой с ним автоматизированной системы управления, технической диагностики и безопасности движения





вагонов метро нового поколения (система «Витязь») [7] позволяют реализовать новые возможности, выходящие за рамки автоматизации управления движением. По радиоканалу в центр управления может быть передана диагностическая и текущая информация о составе, которая помогает значительно повысить эффективность работы метрополитена. Проведённые испытания бортовых устройств автоведения на Московском метрополитене дали положительные результаты [8, 9].

К настоящему времени в Российском университете транспорта (МИИТ) существенно развиты алгоритмы верхнего уровня – алгоритмы централизованного управления движением всех поездов линии. В том числе разработаны графико-интервальные алгоритмы управления движением при компенсируемых возмущениях [14, 15]. При небольших рассогласованиях планового и исполненного графиков движения требуемые длительности стоянок и времена хода поездов линии рассчитываются в соответствии с графическим алгоритмом. Переход на управление по интервалам движения осуществляется, когда ресурса линии недостаточно для компенсации возмущений. После выравнивания интервала осу-

ществляется переход на графический алгоритм управления.

Отдельное место занимают алгоритмы управления во время больших сбоев движения и алгоритмы, реализующие управление после ликвидации причин сбоя. Имитационное моделирование этих алгоритмов на моделях линий Московского метрополитена при различных видах сбоев и сравнение результатов автоматического управления со взятыми из архива историями управления диспетчерами показали возможность их использования в автоматизированном режиме под контролем диспетчеров [16–19].

Разработанные алгоритмы централизованного управления движением используют методы искусственного интеллекта для принятия решений в условиях неопределённости. Примером этого является нахождение допустимого интервала по отправлению $(n+1)$ поезда при известных вычисленных временах хода n -го и $(n+1)$ -го поездов. Допустимый интервал попутного следования, при котором идущий сзади поезд движется без ограничений скорости по системе обеспечения безопасности, линейно зависит от длительности стоянки n -го поезда на впередилежащей станции.

В момент вычисления допустимого интервала по отправлению известна только плановая длительность стоянки, отсутствует информация об отклонении длительности стоянки от плановой из-за наличия возмущений. В этом случае необходимо прогнозировать неизвестные отклонения на базе автоматического самообучения системы.

Применение методов искусственного интеллекта позволяет использовать название «интеллектуальная централизованная система автоматического управления движением поездов метрополитена». Термин «интеллектуальная» связан не столько с созданием сложной интегрированной системы, сколько с применением методов искусственного интеллекта в алгоритмах управления.

Имеющийся опыт разработки и эксплуатации автоматических систем управления, результаты научно-исследовательских, конструкторских работ и испытаний обещают при правильной организации внедрения освоить современную систему управления движением поездов, повысить качество выполнения заданного объёма автоматических перевозок и безопасность движения в метрополитенах страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
2. IEC62290-1:2014, Railway applications – urban guided transport management and command/control systems. — Part 1: system principles and fundamental concepts, MOD. [Электронный ресурс]: <https://webstore.iec.ch/publication/6777>. Доступ 13.03.2018.
3. Никульчиков П. М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена // Автоматика на транспорте. — 2006. — № 3. — С. 456–473.
4. List of automated urban subway systems. [Электронный ресурс]: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automated_urban_metro_subway_systems. Доступ 13.03.2018.
5. Баранов Л. А. Бортовое микропроцессорное устройство систем автоведения поездов и его математическое обеспечение // Тезисы докладов республиканской конференции «Микропроцессорные системы связи и управления связи на железнодорожном транспорте». — Киев, 1990. — С. 22–23.
6. Баранов Л. А., Ерофеев Е. Ф., Бударин В. Н., Филипович В. П. Интегрально-автоматизированные системы на технологичных процессорах на метропо-

литене // Доклады второй научно-технической конференции с международным участием. — София, 1991. — С. 23–27.

7. Медуницин Н. Б., Малинин О. В. Автоматизированные системы управления, диагностики и безопасности движения вагонов метро нового поколения // Научно-технические технологии. — 2005. — № 6. — С. 8–11.

8. Малинин О. В., Шелухин А. С., Алексеенкова Е. В. Результаты проведения экспериментальных исследований опытного образца системы «Витязь-М», оборудованного режимом автоматизированного ведения поезда, на Калининской линии Московского метрополитена // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматизации и инфокоммуникациях: Труды Всероссийской научно-практ. конференции. — Хабаровск, 2017. — С. 43–46.

9. Малинин О. В., Шелухин А. С., Милейковский Д. И. Автоматический режим прицельной остановки составов метрополитена и контроля остановки состава на станции // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматизации и инфокоммуникациях: Труды Всероссийской научно-практ. конференции. — Хабаровск, 2017. — С. 153–157.

10. Путь точечный датчик /Авторское свидетельство № 1425123, с приоритетом 04.08.1986. Баранов Л. А., Ерофеев Е. В., Пахомов К. В., Шмидрик Д. М. // Бюллетень изобретений № 35, 1988.

11. Баранов Л. А., Милешин И. С., Чинь Л. М. Энергооптимальное движение поезда с рекуперативным тормозом при учёте ограничений на фазовую координату // Наука и техника транспорта. — 2010. — № 4. — С. 107–114.

12. Баранов Л. А. Оценки интервала попутного следования метрополитенов для систем безопасности на базе радиоканала // Мир транспорта. — 2015. — № 2. — С. 6–14.

13. Баранов Л. А. Ограничения на управление в автоматизированных системах планирования и управления движением поездов метрополитена // Автоматика на транспорте. — 2016. — № 3. — С. 319–330.

14. Баранов Л. А., Балакина Е. П., Воробьёва Л. Н. Алгоритмы для поездов метрополитена // Мир транспорта. — 2007. — № 2. — С. 104–113.

15. Баранов Л. А., Воробьёв П. У. Метрополитен Мехико: алгоритмы движения // Мир транспорта. — 2012. — № 4. — С. 106–113.

16. Балакина Е. П. Принципы построения алгоритмов системы поддержки принятия решений поездному диспетчеру // Наука и техника транспорта. — 2008. — № 2. — С. 23–26.

17. Балакина Е. П., Ерофеев Е. В., Щеглов М. И. Автоматизированная система организации движения поездов с учётом экономии электроэнергии на линии метрополитена после сбоя // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 1. — С. 47–50.

18. Балакина Е. П., Ерофеев Е. В., Щеглов М. И. Автоматизация оценки вариантов организации движения поездов на линии метрополитена // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 2. — С. 37–39.

19. Балакина Е. П., Щеглов М. И., Ерофеев Е. В. Алгоритм оперативного управления линией метрополитена для восстановления движения по плановому графику // Наука и техника транспорта. — 2015. — № 1. — С. 23–25.

Координаты автора: **Баранов Л. А.** – baranov.miit@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 13.03.2018, принята к публикации 08.04.2018.

