

УДК: 629.067, 656.052, 656.22

ВИРТУАЛЬНАЯ СЦЕПКА КАК ЭЛЕМЕНТ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ



Охотников А.Л.

Заместитель начальника Департамента - начальник отдела стратегического развития, АО «НИИАС»,
E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Москва, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются системы интервального регулирования движения поездов, основанные на технологиях подвижных блок-участков и виртуальной сцепки. Раскрываются особенности и отличия технологий на базе подвижных блок-участков и виртуальной сцепки. Подробно исследованы особенности применения виртуальной сцепки для соблюдения минимального межпоездного интервала и повышения пропускной способности на участках сети железных дорог. Статья раскрывает семь основных отличий ВСЦ от ПБУ для интервального управления железнодорожным транспортом. Указано, что виртуальная сцепка добавляет к системам автоматического управления движения поездов дополнительную функциональность, позволяя виртуально соединять два или более поездов в составе пакета.

Ключевые слова: интервальное регулирование движения поездов, технология подвижных блок-участков, виртуальная сцепка, кривая торможения, защитный участок.

VIRTUAL COUPLING AS AN ELEMENT OF INTERVAL REGULATION OF TRAIN MOVEMENT

Okhotnikov A.L. Deputy Head of Department, Head of Strategic Development, JSC «NIIAS»,
E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Moscow, Russia

Annotation

The article considers the systems of interval train control based on the technologies of moving block sections and virtual coupling. The features and differences of the technologies based on moving block sections and virtual coupling are revealed. The peculiarities of virtual coupling application are studied in detail in order to meet the minimum train interval and increase the throughput capacity on the sections of the railroad network. The article reveals seven main differences between VCC and PBU for interval control of railway transportation. It is stated that virtual coupling adds additional functionality to automatic train control systems by allowing two or more trains to be virtually coupled as part of a package.

Keywords: interval train control, moving block section technology, virtual coupling, braking curve, protective section.

Введение

Требования к развитию железнодорожного транспорта мотивируют увеличивать пропускную способность существующих сетей для удовлетворения прогнозируемого роста спроса на железнодорожные перевозки. Развитие железнодорожного транспорта можно условно разделить по уровням управления и оборудования. Первый уровень характеризуется совершенствованием и применением методов и технологий управления перевозками. Второй уровень развития осуществляется за счет внедрения средств роботизации и автоматизации, автоматизированных и автоматических систем управления транспортом, создания интеллектуальных транспортных систем, модернизации оборудования.

Из известных технологий интервального регулирования долгое время использовался метод управления движением поездов с использованием фиксированных блок-участков. Эта технология подошла к своему пределу и дальнейшее повышение пропускной и провозной способности перевозок в рамках использования фиксированных блок-участков становится затруднительным.

Одним из первых подходов было использование идеи информационного транспортного пространства [1,2]. Большой вклад в развитие информационного пространства транспорта внесла технология Интернета вещей [3,4]. В качестве дополнительного решения была предложена модель использования блок-участков, которые жестко не фиксированы [5,6].

Такая модель предлагает использование дополнительного бортового оборудования, включая спутниковую навигационную аппаратуру потребителей и модемы, сокращение межпоездного интервала на традиционных железных дорогах, замену фиксированных блок-участков на виртуальные [5] или подвижные [5-7] блок-участки. Контекстно эта технология предложила замену директивного управления на ситуационное [8, 9] и субсидиарное управление [10]. Но с течением времени выяснилось, что и эта технология имеет свои ресурсы для совершенствования.

Особенности технологии

Интервальное движение поездов можно рассматривать как модель «виртуальных» блок-участков (*virtual block – VB*) [5] или подвижных блок-участков (*moving block – MB*) (ПБУ) [4-6]. Модель использования подвижного блок-участка долгое время была основной, вокруг которой группировались

технологические решения. В качестве основы расчета для ПБУ используют показатель предельной разницы скоростей (ПРС) [*limit speed difference*] [11] на основе относительных координат. Метод расчета ПРС позволяет реализовать движение поездов с небольшим интервалом при низкой скорости (ПБУ1) последовательно движущихся поездов и большой интервал (ПБУ2) при высокой скорости движения для ведущего и ведомого поездов (рис.1), т.к. скорость движения поезда увеличивает тормозной путь и соответственно безопасное межпоездное расстояние, включая защитный участок.

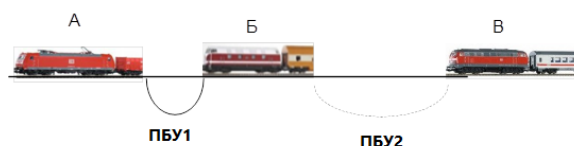


Рисунок 1. Схема реализации подвижных блок-участков, длина которых зависит от скорости поездов

Модель подвижного блок-участка предусматривает наличие оборудования поезда устройствами для непрерывного позиционирования и контроля целостности поезда, чтобы гарантировать безопасное движение ведомого поезда. Модель подвижного блок-участка позволяет рассчитать динамическое расстояние кривой торможения. Это отразилось в создании технологии прямого экстренного управления торможением (*directly maximum braking control – DBC*) поезда. Для учета возможных факторов, влияющих на длину блок-участка, применяют разные прогнозные модели, которые позволили создать технологию управления на основе модели прогнозирования (*model predictive control – MPC*). Результаты исследования [11] показали, что использование модели MPC имеет лучшую производительность среди других моделей в части снижения энергопотребления при движении поезда. Особенность технологии подвижного блок-участка поясняется на рис.2, где показан «хвост» ведущего поезда (B) и «голова» ведомого поезда (C), которых разделяет подвижный блок-участок (ПБУ).



Рисунок 2. Факторы, влияющие на подвижный блок-участок

ПБУ – это саморегулирующийся, независимый от связи с центром управления движением подвижный интервал между двумя последовательно движущимися поездами. На рис.2 «голова» поезда определяет передний край или границу интервала с «хвостом» ведущего поезда, между ними возможны и другие препятствия. Начало защитной зоны подвижного блок-участка (С) регулируется в зависимости от скорости, местного положения и состояния полотна, кривизны уклона рельса и погодных условий. Длина подвижного блок-участка dT определяется рядом факторов:

$$dT = d1 + d2 + d3 + d4 + d5 \quad (1)$$

В выражении (1) $d1$ – задержка сигнала из центра управления, $d2$ – внутренняя задержка системы, обусловленная задержкой обработки данных бортовыми датчиками, в системе слежения и в компьютерной системе, $d3$ – допуск на ошибки позиционирования – на основе данных ГНСС, $d4$ – безопасный тормозной путь, адаптированный к скорости, нагрузке, кривизны и уклону рельсов, и внешним условиям, $d5$ – саморегулирующаяся поправка, зависящая от скорости, положения поезда, кривизны и уклона рельса, погодных условий.

Для интервального регулирования в зарубежных странах применяют систему сигнализации *Communications-Based Train Control (CBTC)* [12, 13]. Эта система служит для интервального регулирования, основанного на двусторонней радиосвязи между бортовыми и путевыми системами. *CBTC* – это система железнодорожной автоматики и управления, которая использует телекоммуникации между поездом и путевым оборудованием для управления движением и контроля инфраструктуры. С помощью системы *CBTC* определяют местоположение поезда более точно, чем с помощью традиционных систем сигнализации. Она исключает управление на основе обработки спутниковых сигналов ГНСС и использует технологию управления на основе наземного радиорелейного пространства, аналог которого реализуется с помощью центра радиоблокировки (*RBC*), которая принята в Европейской системе управления поездами (*European Train Control System – ETCS*). ПБУ нашла отражение в европейском стандарте – *ETCS* уровня 3. Уровень 3 аналогичен уровню 2, но при этом информация о текущем местоположении поезда, интервале между поездами и проверке целостности поезда передается без использования поста электрической централизации (ЭЦ), а

напрямую с помощью центра радиоблокировки.

Также известна гибридная система управления поездами, обеспечивающая совместимость системы управления движением поездов *ATMS (Advanced Train Management System)* (Австралия) и европейской системы управления движением поездов *ETCS* уровня 2. Обе системы – *ATMS* и *ETCS* уровня 2 предусматривают управление движением поездов по радиоканалу через *RBC*. Однако если в *ETCS* уровня 2 для коррекции показаний бортовых средств измерения пройденного пути используются пассивные евробализы, то в *ATMS* местоположение поезда определяется при помощи спутниковой навигации *GPS*.

Особенности применения технологии виртуальной сцепки

Исходная технология интервального регулирования допускает асинхронное движение поездов. Для устранения асинхронности и повышения эффективности движения поездов был предложен механизм виртуальной сцепки (*virtual coupling – VC*) (ВСЦ) [14, 15]. Эта технология использует динамическую оптимизацию ПБУ и синхронизирует движение поездов. Она также сокращает интервал следования поездов и повышает пропускную способность перевозок. С системных позиций ВСЦ преобразует движение отдельных поездов в системы (пакеты) синхронно движущихся поездов. Таким образом переход от управления поездом к управлению пакетами поездов есть первая особенность ВСЦ.

Концепция виртуальной сцепки совершенствует операции ПБУ за счет сокращения длины пакетов поездов с использованием дополнительного канала связи путем дооснащения дополнительным бортовым оборудованием (блоком автоведения, модемом, системами позиционирования и технического зрения). Это вторая особенность ВСЦ.

Для решения сложных задач управления движением поездов требуется дополнительная информация. Эта дополнительная информация включает определение следующих измеряемых параметров: координаты, скорости, ускорения поезда в абсолютных и относительных значениях. Эта дополнительная информация описывает информационную ситуацию для поезда: безопасное расстояние до ведущего поезда, реальное расстояние до ведущего поезда, расстояние до ведомого поезда (при пакете поездов), характеристики торможения (вид тормозной системы) поездов.

Таким образом большой объем измеряемых параметров и рост сложности задач управления есть третья особенность ВСЦ.

Для интенсивного обмена информацией между поездами необходимо установить высокоскоростной телекоммуникационный канал связи и использовать интеллектуальную транспортную технологию T2T (Транспорт – Транспорт). Создание такого виртуального дополнительного телекоммуникационного канала посредством установки модемов – есть четвертая особенность ВСЦ.

Виртуальная сцепка может быть рассмотрена как концепция, связанная с уменьшением интервала между поездами, которая строится на объединении поездов в пакеты. Переход от управления отдельными поездами к управлению пакетами поездов есть пятая особенность ВСЦ.

Хорошим примером использования ВСЦ для пропуска пакетов поездов явилось успешное проведение испытания с проведением 5 грузовых поездов по технологии виртуальной сцепки на Восточном полигоне Российских железных дорог в 2023 году.

Обычное движение поездов допускает их относительное движение, которое является асинхронным. Переход к управлению пакетами поездов на участках железных дорог означает переход от асинхронного движения к синхронному. Это шестая особенность ВСЦ.

К числу новых методов расчета следует отнести расчет предельной разницы скоростей [11] (ПРС). Расчет осуществляется на основе относительных координат между поездами в движении и длины состава поезда. ПРС учитывает эффективность торможения относительно ведущего поезда и может устранить риск, вызванный тем, что тормозной путь, проложенный ведущим поездом, может быть меньше, чем тормозной путь ведомого поезда. Использование расчета предельной разницы скоростей для интервального регулирования есть шестая особенность ВСЦ.

Использование ПРС в совокупности с управлением пакетов поездов создало возможность учета защитного участка пути, который при обычном движении на железнодорожном транспорте не встречается. Этот механизм защиты поезда от превышения допустимой скорости в пакете поездов очень важен для безусловного соблюдения функциональной безопасности при движении на железной дороге [11]. Использование такого механизма является седьмой особенностью ВСЦ.

В целом для ВСЦ можно описать основные

параметры модели, которой можно описать технологию. Условно обозначим i - ведущий поезд, j - ведомый поезд. Основными параметрами тогда будут являться:

- Расстояние между поездом j и поездом i в момент времени t
- Скорость поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Ускорение поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Ограничение скорости для поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Расстояние защитного участка поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Максимальная погрешность системы измерения скорости для поездов
- Разница в относительном расстоянии между поездом j и поездом i
- Время реакции поезда j относительно поезда i в момент времени t для изменения режима движения
- Время изменения режима движения поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Ускорение поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Ускорение поезда j относительно поезда i во время движения по инерции
- Максимальное замедление поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Максимальное ускорение поезда j относительно поезда i в момент времени t
- Относительная эффективность торможения поездов в момент времени t .

В настоящее время механизм соблюдения безопасного интервала поездов от превышения скорости основан на расчете предельной скорости. При расчете предельной скорости учитывают тормозной путь поезда, состояние пути, состояние движения поезда на участке и т. д. Основной принцип соблюдения необходимого уровня безопасности заключается в выборе минимального значения среди существующих расчетов и ограничений на основе дискретной оптимизации [16].

Это говорит о том, что модели в этой области являются сложными и плохо описываются аналитическими зависимостями. Это усугубляется тем, что перечисленные выше параметры не являются стационарными, а зависят от времени. Эти данные рассчитываются бортовым вычислителем и хранятся в памяти.

Для расчета параметров на практике применяют методы редуцирования (упрощения) и численные методы расчета.

Выводы

Виртуальная сцепка (ВСЦ) это новая концепция, связанная с уменьшением межпоездного интервала. В связи с непрерывным развитием интеллектуальной транспортной технологии Т2Т (Транспорт – Транспорт), технологии связи «борт-инфраструктура» (СВТС), системы автоматического управления движения поездов (САУ ДП) и связанных с ними технологий железнодорожных перевозок, ВСЦ является интегрированной технологией управления железнодорожным движением, которая использует все современные наработки в области управления, обработки и передачи данных. Технологии ПБУ, используемые на практике, могут усиливаться концепцией ВСЦ, которая создает возможность организации движения таким образом, чтобы поезда двигались на предельно минимальном расстоянии с учетом защитного участка (рис.2). Эта концепция позволяет увеличить пропускную способность транспортной инфраструктуры без радикального вложения средств на расширение инфраструктуры.

Как подтверждение успешного применения технологии «виртуальная сцепка» 16 ноября 2023 года впервые выполнен эксперимент по

организации пакетного движения 5 поездов различной массы на участке Хабаровск II – Ружино, протяженность которого составляет 396 км. Межпоездной интервал виртуального сцепки составил 8 минут и позволил проследовать пакету из 5 составов общей массой 26663 т. на Восточном полигоне. Только за 2023 год увеличена длина полигона внедрения ВСЦ на Российских железных дорогах до 5734 км от ст. Мариинск до ст. Находка. Количество пар поездов, осуществляющих движение в режиме ВСЦ на полигоне выросло с 614 пар в 2020 году до 35 863 пары в 2023 году (рост более чем в 57 раз).

Виртуальная сцепка тем самым добавляет к системам автоматизированного и полностью автоматического управления движения поездов дополнительную функциональность, позволяя виртуально соединять два или более поездов, что резко сокращает их интервал и увеличивает пропускную способность магистрали. Виртуальная сцепка может превосходить по эффективности простой ПБУ для некоторых сценариев эксплуатации, например, работу в «окна» и при нагоне графика движения поездов. В практическом примере виртуальная сцепка показывает максимальное сокращение хода по участку на 43% по сравнению с ПБУ для ETCS уровня 3 [14].

Список литературы

1. Ознамец В.В. Информационное управляющее транспортное пространство // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т.4.– 4(16). – С.43-50.
2. Цветков В.Я. Информационное поле и информационное пространство // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №1-3. - С.455-456.
3. Laghari A. A. et al. A review and state of art of Internet of Things (IoT) //Archives of Computational Methods in Engineering. – 2021. – С. 1-19.
4. Цветков В. Я. Интернет вещей как глобальная инфраструктура для информационного общества // Современные технологии управления. 2017. - №6 (78). С.3.
5. Abed S. K. European rail traffic management system-an overview //2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ). – IEEE, 2010. – С.173-180.
6. Berger U. et al. Verification of the european rail traffic management system in real-time maude //Science of Computer Programming. – 2018. – Т. 154. – С.61-88.
7. Cao Y., Wen J., Ma L. Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system //Future Generation Computer Systems. – 2021. – Т. 120. – С.76-90.
8. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 2(2). – С.2-10.
9. Охотников А.Л., Павловский А.А. Ситуационное семиотическое управление // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т.4.– 3(15). – С.53-62.
10. Козлов А.В. Субсидиарное и централизованное управление // Славянский форум. - 2019. – 4(26). - С.49-58.
11. Gregurić M. et al. Variable speed limit control based on deep reinforcement learning: A possible implementation //2020 International Symposium ELMAR. – IEEE, 2020. – С.67-72.
12. Lee C., Hellinga B., Saccomanno F. Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety //Transportation research part C: emerging technologies. – 2006. – Т. 14. – №. 3. – С. 213-228.
13. Vrbanić F. et al. Variable speed limit and ramp metering for mixed traffic flows: A review and open questions //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 6. – С. 2574.
14. Oh S., Kim K., Choi H. Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system //Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. – 2016. – Т. 17. – №. 11. – С.1-9.
15. Zhang X. et al. Physics-based wireless channel modeling and optimization of access points placement for communications-based train control systems //2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). – IEEE, 2021. – С. 1-4.
16. Pang Z. Y. et al. Wireless Train Detection Based on Null-Filled UHF RFID Reader Antenna for Communications-Based Train Control //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023.