

Рост пропускной способности при использовании системы ETCS

Применение европейской системы управления движением поездов позволяет увеличить пропускную способность линии прежде всего благодаря более коротким блок-участкам и независимости от расстояний между сигналами, местоположения сигналов и ограничений по возможным сигнальным показаниям. При этом большое значение имеют формируемые ETCS кривые контроля скорости при торможении. Пологие кривые способствуют росту безопасности движения, но одновременно снижают пропускную способность. Для максимального использования пропускной способности линии, которую может обеспечить ETCS, необходимо внедрение дополнительной системы управления перевозками.

Решение о внедрении ETCS в Швейцарии

Сеть Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) имеет протяженность примерно 3000 км. По ней перевозится более 320 млн. пассажиров в год. В сфере грузовых перевозок на долю железных дорог приходится 32%, а в транзитных трансальпийских перевозках — даже 70%.

Разветвленная сеть SBB характеризуется наличием большого числа важных узловых станций и входит в число наиболее интенсивно используемых железнодорожных сетей мира. По одним и тем же линиям курсируют междугородные пассажирские экспрессы InterCity, поезда городских железных дорог системы S-Bahn, национальные и международные грузовые поезда. Тактовый график движения ориентирован на оптимальные маршруты между узловыми станциями и минимальное время пересадки с одного поезда на другой. В идеале все поезда одновременно прибывают на узловую станцию, чтобы через несколько минут одновременно отправиться с нее. Такая технология организации перевозочного процесса дополнительно повышает требования к пропускной способности железнодорожных узлов.

Еще в 1998 г. SBB приняли решение о внедрении ETCS, исходя из следующих соображений:

- рост пропускной способности за счет организации высокоскоростного движения и сокращения интервалов между поездами. В настоящее время реализованы или реализуются несколько проектов, в числе которых новая линия Маттштеттен — Ротрифт, на которой отрабатывается новая концепция графика движения. На этой линии предусмотрено движение поездов со скоростью 200 км/ч и межпоездным интервалом 2 мин. С июля 2006 г. здесь эксплуатируется система ETCS уровня 2. Ею оборудовано почти 500 ед. подвижного состава, которые курсируют в режиме ETCS уровня 2 пока со скоростью до 160 км/ч;

- замена существующих систем локомотивной сигнализации. Срок службы существующих на SBB систем локомотивной сигнализации SIGNUM и ZUB 121 близок к исчерпанию. Федеральное агентство транспорта страны выдало предписание об их замене устройствами, построенными по технологии ETCS (полноценными системами ETCS или устройствами ETCS, способными использовать информацию от прежних систем АЛС), в расчете на обеспечение эксплуата-

ционной совместимости с железными дорогами других стран Европы;

- эксплуатационная совместимость и доступ к сети. Для передачи грузов с автомобильного на железнодорожный транспорт необходимо повысить пропускную способность и эффективность использования сети SBB. С переходом от национальных систем АЛС к ETCS другие железнодорожные операторы смогут снизить затраты на доступ к сети SBB — им не понадобится устанавливать на тяговом подвижном составе какие-либо устройства АЛС, кроме ETCS.

ETCS как средство повышения пропускной способности

Безопасность и пропускная способность

Исходная ситуация. Внедрение ETCS должно повысить как безопасность, так и пропускную способность. При этом возникает конфликт целей, поскольку зачастую повышение безопасности и повышение пропускной способности требуют диаметрально противоположных мер. Резервы пропускной способности могут быть использованы за счет повышения скорости и увеличения плотности движения поездов. Для сохранения при этом как минимум существующего уровня безопасности необходимы мероприятия технического и организационного характера.

В последующем обсуждении вопросов безопасности принимается, что существующие подсистемы СЦБ (системы централизации, контроля свободности пути и т. п.) работают безупречно.

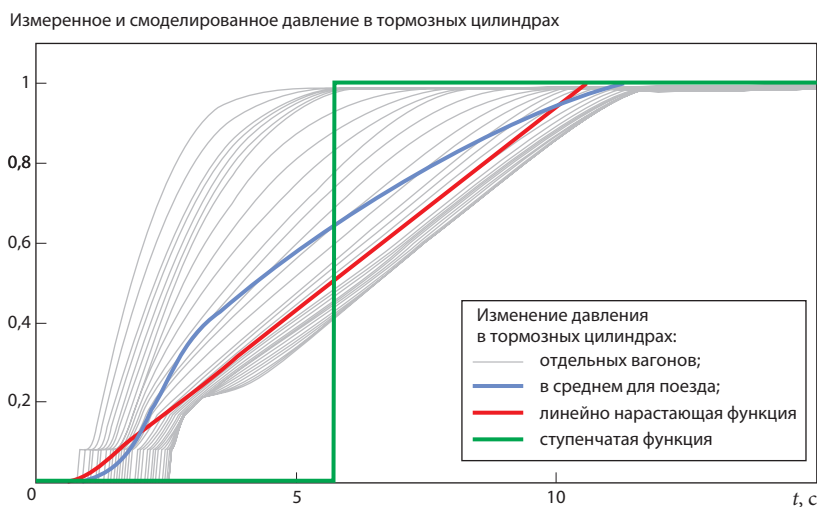


Рис. 1. Изменение давления в тормозных цилиндрах на примере пассажирского поезда длиной 400 м, экстренное торможение, режим торможения Р

Поэтому под безопасностью далее подразумевается способность поезда своевременно остановиться перед препятствием. Требуемый для этого непрерывный контроль скорости посредством ETCS реализуется при помощи заложенных в бортовой компьютер EVC кривых, которые рассчитываются на основе следующей информации:

- параметров поезда (тормозной коэффициент, режим торможения, длина поезда и т. п.);
- параметров пути (уклон, условия сцепления и т. п.);
- целевых параметров безопасности (допустимая степень риска аварии с учетом возможного ущерба).

Контроль скорости при помощи этих кривых позволяет повысить уровень безопасности. Однако это повышение способно привести к значительному снижению пропускной способности линии, поскольку поезда должны будут раньше начинать торможение. Требуемое повышение пропускной способности должно достигаться посредством сопутствующих мероприятий.

Техническая реализация ETCS. Концепция ETCS предусматривает возможность реализации трех уровней. ETCS уровня 1 характеризуется точечной передачей информации от напольного оборудова-

ния на поезда при сохранении напольных сигналов, а также стационарных устройств контроля свободности пути (жестко заданные блок-участки). В ETCS уровня 2 предусмотрена двусторонняя непрерывная передача информации по каналу радиосвязи сети GSM-R между стационарными устройствами и поездом. Напольные сигналы более не требуются. Контроль свободности пути по-прежнему осуществляется стационарными устройствами. В ETCS уровня 3 вместо этих устройств применяются бортовые средства контроля полноставности поезда, а вместо жестко заданных блок-участков используются подвижные блок-участки переменной длины.

Особенностью ETCS уровня 1 является возможность реализации системы с разнообразными характеристиками.

С одной стороны, ETCS уровня 1 можно выполнить функционально идентичной светофорной сигнализации. У предупредительного сигнала на поезд через точечные датчики передается команда на движение, на основе которой бортовой компьютер рассчитывает и контролирует допустимую скорость. Если устанавливается следующий маршрут, то соответствующая команда передается на поезд и использует-

ся для расчета допустимой скорости только у очередного основного сигнала.

С другой стороны, можно построить систему ETCS уровня 1 таким образом, что она будет идентична по функциям системе уровня 2. При этом на поезд через точечные путевые приемопередатчики или короткие индуктивные шлейфы Euroloop квазинепрерывно передаются команды на движение, используемые для контроля скорости. В случае укладки индуктивных шлейфов перед местами расположения основных сигналов появляется возможность реализовать полноценную сигнализацию в кабине машиниста и отказаться от светофорной сигнализации.

Кроме того, существуют и могут быть использованы на практике разнообразные промежуточные решения между двумя рассмотренными крайними вариантами применения ETCS уровня 1.

Кривые контроля скорости при торможении в системе ETCS

Классическое торможение путем снижения давления в главной тормозной магистрали включает фазы подготовки тормозов, установление тормозного усилия и работы с полностью установленным тормозным усилием. Для упрощения реальный процесс торможения представляют при помощи трех- или двухфазной модели. На рис. 1 показано измеренное изменение давления в тормозных цилиндрах и соответствующие упрощенные модели.

Тормозное усилие на рельсе определяется давлением в тормозном цилиндре и зависящим от скорости коэффициентом трения между тормозной накладкой и тормозным диском в дисковом тормозе или тормозной колодкой и поверхностью катания колеса в колодочном тормозе, а также воздействием магниторельсового тормоза, если он включен.

Контрольные кривые скорости

При использовании системы ETCS машинист руководствуется целым набором кривых контроля скорости при торможении. В нормальном режиме поезд получает команду на движение (MA, Movement Authority) до места расположения фиктивного сигнала, где действие команды заканчивается (EOA, End of Authority). Соответствующие контрольные кривые показаны на рис. 2.

Кривая EBD обеспечивает контроль скорости при экстренном торможении с гарантированным замедлением. Для расчета замедления при экстренном торможении учитываются только безопасно работающие тормозные системы. Кривая EBD всегда заканчивается в месте контролируемой остановки (SvL).

Кривая введения в действие экстренного торможения EBI сдвинута относительно кривой EBD на промежуток времени, требуемый для установления тормозного усилия. Превышение значений кривой EBI приводит к срабатыванию экстренного торможения.

Кривая служебного торможения SBD контролирует полное торможение с замедлением, которое рассчитывается с учетом тормозных систем, не все из которых являются безопасными. Это замедление больше, чем гарантированное замедление при экстренном торможении. Применение кривой SBD не является обязательным. Кривая SBD заканчивается у места препятствия EOA.

Кривая введения в действие служебного торможения SBI сдвинута относительно кривой SBD на промежуток времени, необходимый для установления тормозного усилия. При превышении значений этой кривой включается полное служебное торможение.

При превышении значений предупредительной кривой W включается акустический сигнал в кабине машиниста.

Кривая заданной скорости P содержит значения скорости, которыми должен следовать машинист при управлении поездом. При ее формировании не учитывается время срабатывания тормозов.

Индицируемая кривая I указывает машинисту моменты времени отключения тяги и включения тормозов, чтобы в конечном счете замедление поезда соответствовало кривой P. Точка IP на кривой I информирует машиниста, что он приближается к месту, где необходимо приступить к торможению поезда.

Служебное торможение и соответственно кривые SBD и SBI опциональны, а потому операторы инфраструктуры или перевозок могут отказаться от их использования. В этом случае кривые W, P и I сдвигаются к кривой EBI, что приводит к сокращению межпоездных интервалов и увеличению пропускной способности линии.

Контрольные кривые, влияющие на безопасность. К ним относятся кривые EBD и EBI, первая из которых определяется торможением с гарантированным замедлением, а вторая основана на кривой EBD с

учетом времени на установление тормозного усилия.

Поскольку абсолютная безопасность недостижима, необходимо выполнить расчет достаточно безопасных значений замедления при торможении и времени срабатывания тормозов, основываясь на целевом значении уровня безопасности. При более жестких требованиях к безопасности кривые EBD и EBI, а вслед за ними все остальные кривые контроля скорости при торможении будут более пологими. Соответственно увеличится межпоездной интервал и уменьшится пропускная способность линии.

Статичные кривые скорости. Следует отметить, что кривые EBI, SBI, W и P действуют при движении с постоянной скоростью без необходимости задействовать тормозную систему поезда. При превышении контрольных значений скорости сначала задействуется кривая P (определяет заданную скорость), затем W и, наконец, SBI или даже EBI.

Типичный сценарий движения поезда. На рис. 3 показан типичный сценарий движения поезда

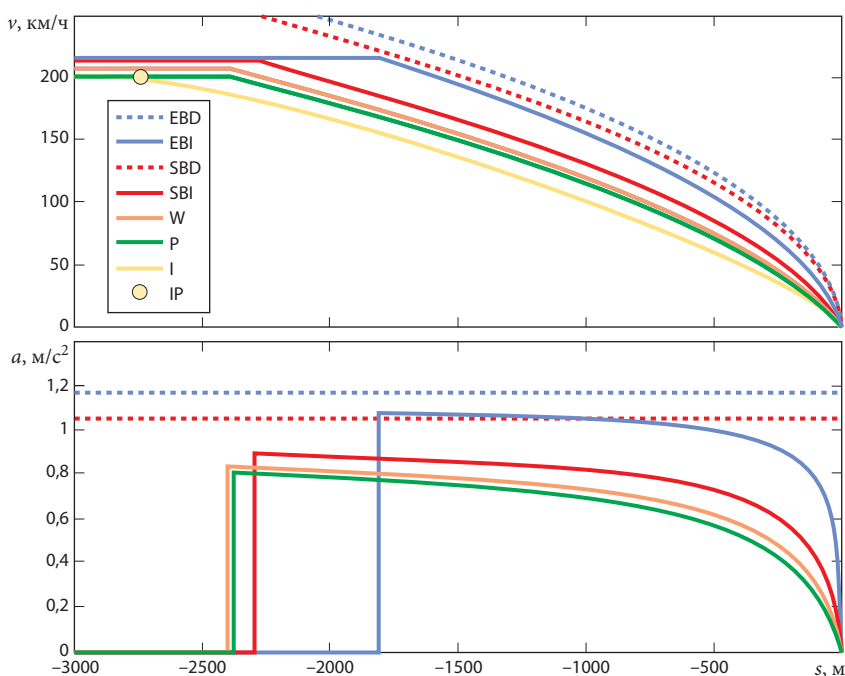


Рис. 2. Набор кривых контроля скорости при торможении в системе ETCS: зависимость скорости v (вверху) и замедления a (внизу) от пройденного пути s

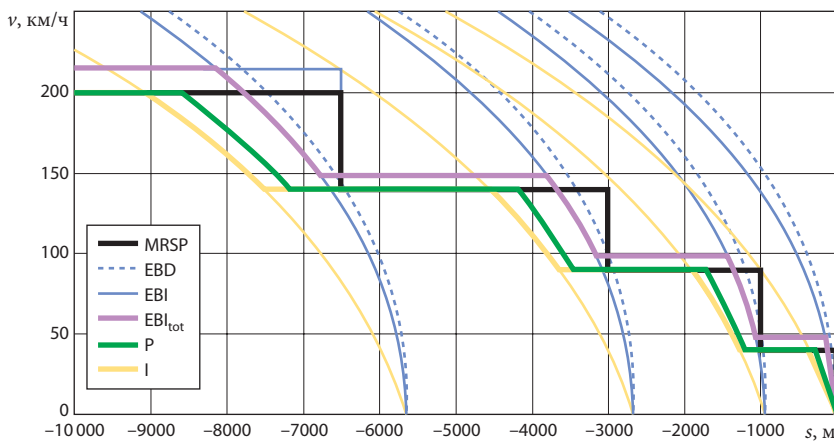


Рис. 3. Типичный сценарий движения поезда со снижением скорости в несколько этапов вплоть до остановки поезда и соответствующие кривые контроля скорости при торможении

со снижением скорости в несколько этапов до полной остановки. На основе статичной кривой скорости MRSP рассчитываются информационные и контрольные кривые как для участков движения с постоянной скоростью, так и для участков торможения. Например, результирующая кривая EBI_{tot} для всего участка состоит из отдельных кривых EBI для движения с постоянной скоростью и для торможения.

Для простоты на рис. 3 не показаны кривые SBD, SBI и W. Кривая P соответствует заданной скорости, которой должен руководствоваться машинист поезда. Если машинист точно следует кривой P, то согласно алгоритму контроля за скоростью в системе ETCS при переломе кривой скорости MRSP он выйдет на уменьшенное значение скорости заметно раньше, чем происходит

выход на более низкую скорость на кривой MRSP. Это не ошибка алгоритма системы, а напрямую следует из требования о контроле за поездом со стороны ETCS и автоматическом его торможении в случае необходимости.

Расстояние между предупредительным и основным сигналами при использовании ETCS уровня 1

Если ETCS уровня 1 используется совместно с существующей традиционной светофорной сигнализацией, происходит наложение кривых контроля скорости при торможении, рассчитанных бортовым устройством ETCS и диктуемых длиной тормозного пути, определяемой расстоянием между предупредительным и основным сиг-

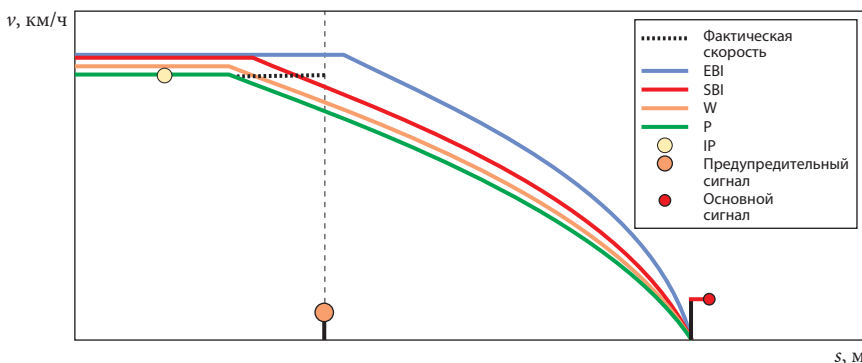


Рис. 4. Набор кривых контроля скорости при торможении и предупредительный сигнал. В месте нахождения предупредительного сигнала фактическая скорость превышает значение кривой SBI

налами. Если контрольные кривые ETCS оказываются слишком пологими по сравнению с кривой, определяемой этим расстоянием, то при проследовании предупредительного сигнала скорость поезда превысит значения кривой SBI или EBI, и автоматически начнется торможение.

Из рис. 4 видно, что в месте нахождения предупредительного сигнала точка на кривой SBI находится заметно ниже значения максимально допустимой скорости движения по линии. Примерно через 50 м за предупредительным сигналом происходит пересечение кривой EBI. Эта ситуация встречается на железных дорогах многих стран. В зависимости от тормозного коэффициента и начальной скорости поезда пересечение кривой EBI возможно уже в месте нахождения предупредительного сигнала. Эта проблема проявляется особенно для поездов с тормозным режимом G (грузовым), для которого характерно длительное установление тормозного усилия.

Существует несколько возможностей компенсировать негативное влияние пологих контрольных кривых. Эти возможности следующие:

- адаптация мест расположения предупредительных сигналов. На практике реализовать это мероприятие почти невозможно, поскольку перемещение предупредительных сигналов связано с внесением изменений в системы централизации и требует очень больших финансовых затрат. Кроме того, результатом становится снижение пропускной способности линии;
- снижение максимально допустимой скорости на линии. Это также влечет за собой снижение пропускной способности и более того — увеличение времени хода поездов, а потому также неприемлемо;
- установка дополнительных приемопередатчиков перед предупредительным сигналом. Эта мера означает удлинение блок-участков и, следовательно, снижение пропускной способности;

- отказ от кривых SBD и SBI. Он позволяет сделать кривую фактической скорости при торможении более крутой;

- отказ от всех контрольных кривых, кроме EBI и EBD. Это еще более улучшает ситуацию и позволяет избежать потерь пропускной способности. Однако сигнализация в кабине машиниста становится невозможной, а кривая EBI обеспечивает только «теневого» контроль за движением поезда. Это техническое решение реализуется в системе ETCS Limited Supervision (LS).

В случае отказа от всего набора кривых контроля скорости при торможении, кроме EBD и EBI, появляется возможность не только увеличить пропускную способность или не допустить ее снижения, но и сократить затраты времени на широкомасштабное внедрение ETCS LS по сравнению с полными версиями ETCS уровней 1 и 2, поскольку не предполагает вмешательства в существующие системы централизации и не требует изменения мест расположения предупредительных сигналов. В быстром внедрении ETCS Limited Supervision как части спецификации SRS 3.0.0 заинтересованы прежде всего Германия, Бельгия и Швейцария. МСЖД также поддерживает это техническое решение, способствующее ускоренному внедрению ETCS на сети обычных железных дорог.

Следует заметить, что и сегодня, когда тормоза автоматически включаются при проследовании предупредительного сигнала, предотвратить проезд закрытого основного сигнала позволяет только экстренное торможение. Поэтому служебное торможение начинают задолго до проследования предупредительного сигнала или даже вне зоны его видимости, если расписанием предусмотрена остановка поезда. Вместе с тем у машиниста сохраняется возможность не снижать скорость до предупредительного сигнала, если этого требует эксплуатационная ситуация.

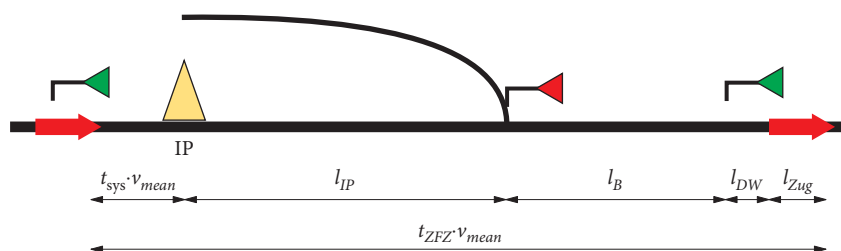


Рис. 5. Расчет межпоездного интервала t_{ZFZ}

Межпоездной интервал при использовании ETCS уровня 2 и движении с постоянной скоростью

При традиционной светофорной сигнализации межпоездной интервал определяется, в частности, расстоянием между предупредительным и основным сигналами, временем восприятия сигнального показания и скоростью движения. При сигнализации в кабине машиниста показание предупредительного сигнала заменяется включением индикатора желтого цвета на пульте машиниста. Место загорания желтого индикатора соответствует точке IP на кривой контроля скорости и может рассматриваться как фиктивный предупредительный сигнал с учетом времени реакции системы.

Расстояние l_{IP} от точки IP до места остановки ЕОА зависит от тормозных характеристик конкретного поезда. Величина l_{IP} вместе с длиной блок-участка l_B , длиной поезда l_{Zug} , длиной охранного отрезка за сигналом l_{DW} вместе со средней скоростью движения по этому участку v_{mean} и временем реакции системы t_{sys} определяет межпоездной интервал t_{ZFZ} . Параметр t_{sys} объединяет время реакции всех причастных систем, включая средства контроля свободы пути, системы централизации, центра блокировки на базе радиосвязи, бортового компьютера и т. п. (рис. 5).

Таким образом, межпоездной интервал

$$t_{ZFZ} = (l_{Zug} + l_{DW} + l_B + l_{IP}) / v_{mean} + t_{sys}. \quad (1)$$

Анализ переменных в формуле (1) дает следующие результаты:

- скорость v_{mean} . Максимальная скорость в общем случае задается топологией линии и должна в полной мере использоваться в поездах. Как будет видно в дальнейшем, существуют ситуации с переломами скорости, при которых межпоездной интервал может быть уменьшен путем снижения максимальной скорости;

- длина поезда l_{Zug} является заданной величиной и не поддается оптимизации с целью сокращения межпоездного интервала;

- длину охранного отрезка за сигналом l_{DW} также следует рассматривать как заданную величину. Она определяется философией обеспечения безопасности оператора инфраструктуры и заложена в алгоритм работы системы централизации;

- длина блок-участка l_B существенно влияет на межпоездные интервалы. Полезные свойства ETCS (сигнализация в кабине машиниста) будут рассмотрены далее;

- расстояние от точки IP до места остановки поезда l_{IP} определяется рассчитываемым системой ETCS набором кривых контроля скорости при торможении. Эти кривые зависят от тормозных свойств поезда и выдвигаемых требований к безопасности. При установленных требованиях к безопасности уменьшить величину l_{IP} и, соответственно, повысить пропускную способность может улучшение тормозных свойств поездов;

- величина t_{sys} объединяет в себе время реакции всех причастных систем. Сокращение времени реакции каждой системы требует отдельного анализа. Так, в одних случаях це-

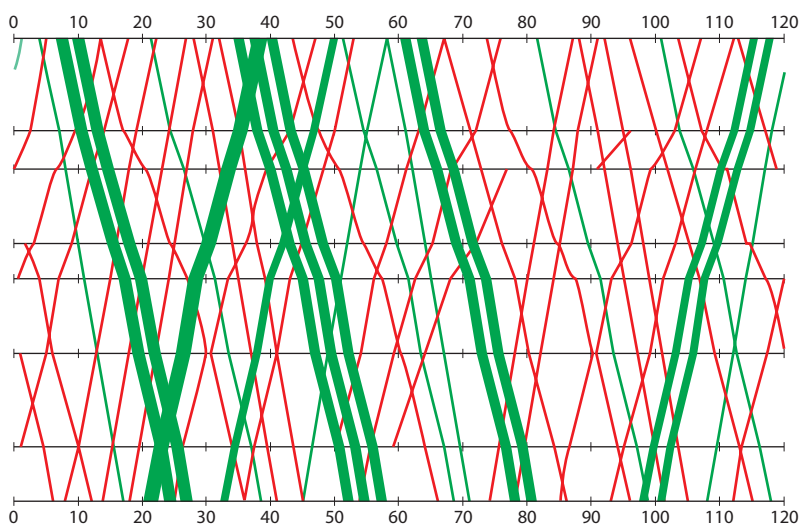


Рис. 6. Диаграмма время — путь для линии Берн — Тун. Зеленым цветом показаны дополнительные нитки графика, полученные благодаря использованию ETCS

лесообразно внедрение быстродействующих стрелочных приводов, а в других — повышение производительности компьютеров.

Повышение пропускной способности при помощи ETCS

Рассмотренные ниже достоинства с точки зрения повышения пропускной способности характерны не только для системы ETCS, но и для любой другой системы АЛС с сигнализацией в кабине машиниста. По сравнению со светофорной сигнализацией локомотивная имеет следующие преимущества:

- при светофорной сигнализации разделение на блок-участки ограничивается невозможностью установить на линии слишком много светофоров. При чрезмерно плотной расстановке сигналов машинист не может более ориентироваться в их показаниях. Присущая системе ETCS сигнализация в кабине машиниста допускает гораздо более свободное проектирование блок-участков. В зонах узловых станций длина блок-участков может составлять при этом 100 м и менее. Длина блок-участков имеет непосредственное влияние на межпоездной интервал (см. выражение (1));
- для светофоров существует много ограничений. Так, имеют-

ся предписания в отношении видимости сигналов, ограничений по габариту, минимального расстояния между сигналами или от сигнала до остряка стрелки. Все эти предписания существенно ограничивают места возможного размещения сигналов. Зачастую вследствие этого светофоры приходится располагать на большем расстоянии друг от друга, что приводит к удлинению блок-участков. Сигнализация в кабине машиниста не подвержена таким ограничениям, сигнальные знаки ETCS (они обозначают место конца действия команды на движение) могут быть установлены практически в любом месте. Соответственно нет ограничений при проектировании блок-участков;

- при светофорной сигнализации приходится идти на компромисс в отношении расстояния между предупредительным и основным сигналами, а также разрешенной максимальной скорости, обусловленный тем, что по линии курсируют поезда с разной допустимой скоростью и тормозными свойствами. Вследствие этого некоторые поезда вынуждены двигаться медленнее, чем это позволяет топология линии. При сигнализации в кабине машиниста для каждого поезда кривые контроля скорости при торможении рассчитываются индивидуально-

но, а значит, указанные ограничения по скорости отпадают;

- при светофорной сигнализации торможение поезда в пределах нескольких участков возможно только с ограничениями. Так, на SBB торможение поезда может осуществляться не более чем в пределах двух блок-участков (без промежуточного контроля фиксированной скорости). Кроме того, при таком торможении всегда происходит снижение пропускной способности, поскольку для каждого блок-участка приходится учитывать все время установления тормозного усилия. В ETCS кривые контроля скорости при торможении рассчитываются индивидуально, поэтому возможно торможение в пределах любого числа блок-участков без потерь для пропускной способности;
- наконец, нельзя забывать о недостаточной эксплуатационной готовности светофорной сигнализации, обусловленной выходом из строя светофорных ламп или нарушениями в кабельной сети. Именно выход из строя светофорных ламп формирует существенную часть статистики опозданий поездов.

На линии Берн — Тун исследовались возможности повышения пропускной способности при помощи ETCS. Для этой линии характерно смешанное движение. Линия является частью трансальпийского коридора с большим числом международных скорых пассажирских и грузовых поездов. Кроме того, на линии курсируют национальные скорые поезда и поезда городской железной дороги Берна. Светофорная сигнализация оптимизирована в расчете на скорые пассажирские поезда, что очень негативно влияет на грузовое движение. Анализ показал, что ETCS уровня 2 способна повысить пропускную способность на 30–50%. На рис. 6 показаны дополнительные нитки для грузовых поездов, предоставив которые удалось благодаря внедрению ETCS.

Выше уже говорилось, что перечисленные преимущества в отношении пропускной способности

характерны не только для ETCS, но и для любой другой системы АЛС с локомотивной сигнализацией. Так, немецкая система АЛСН LZW также обеспечивает рост пропускной способности. Однако в этой системе необходима укладка кабеля между рельсами, что создает значительные проблемы с точки зрения технического обслуживания на круглосуточно используемой линии. Французская система АЛСН TVM обладает значительно худшей функциональностью по сравнению с ETCS, что обусловлено меньшим объемом информации, которую можно передавать по рельсовым цепям. Поэтому в системе TVM реализуется только часть перечисленных выше преимуществ.

Межпоездной интервал при использовании ETCS уровня 2 и движении с переменной скоростью

Выше было показано, что сокращение длин блок-участков, достижимое в системе ETCS, позволяет уменьшить межпоездные интервалы. Межпоездной интервал может быть рассчитан на линии, показанной на рис. 3. При этом длина блок-участка определяется таким образом, чтобы каждые 10 с происходило освобождение блок-участка и, соответственно, каждые 10 с центром блокировки на базе радиосвязи генерировалась и отправлялась на поезд команда на движение. Длина отдельных блок-участков не является постоянной и зависит от максимальной скорости. Длина блок-участка, соответствующая времени движения по нему 10 с, не является системным ограничением, а представляет собой свободно выбранную величину как компромисс между минимальным межпоездным интервалом и производительностью центра блокировки RBC, системы радиосвязи GSM-R и бортового компьютера EVC.

Приведенные на рис. 5 и в выражении (1) параметры определяют

межпоездной интервал в случае не только постоянной, но и переменной скорости (рис. 7). Индивидуальные контрольные кривые для конкретного поезда рассчитываются на основе статичных кривых скорости (рис. 7, а). По ним можно рассчитать моменты времени, в которые протекают отдельные фазы следования поезда через определенную точку на пути (рис. 7, б). Поскольку длина охранного отрезка за сигналом сильно варьируется в зависимости от философии обеспечения безопасности на разных железных дорогах, на графике он не учитывается.

Разделение линии на блок-участки может быть получено из

статичной кривой скорости MRSP и требования о длине блок-участка, соответствующей времени проследования, равному 10 с. Благодаря этому может быть рассчитана ступенчатая ограничивающая кривая для поезда на этом участке линии (рис. 7, в). Исходя из допущения о приеме поездов на разные пути, ступенчатые кривые рассчитаны таким образом, что их максимум приходится на участок приближения к станции, но они могут накладываться друг на друга в зоне остановки поездов.

Изменения межпоездных интервалов хорошо прослеживаются по ступенчатому ограничивающим кривым:

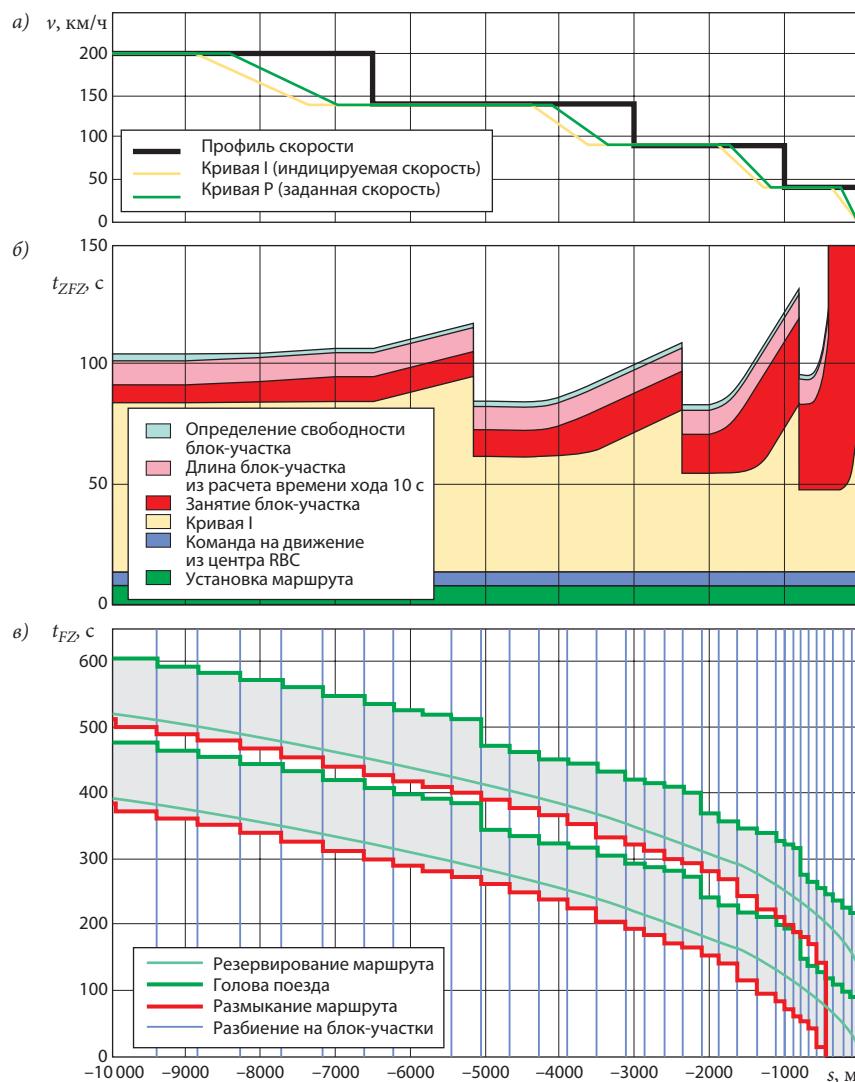


Рис. 7. Кривые зависимости скорости (а), межпоездного интервала (б) и времени хода двух попутных идентичных поездов (в) от пройденного пути на примере поезда длиной 400 м с тормозным коэффициентом 135 %

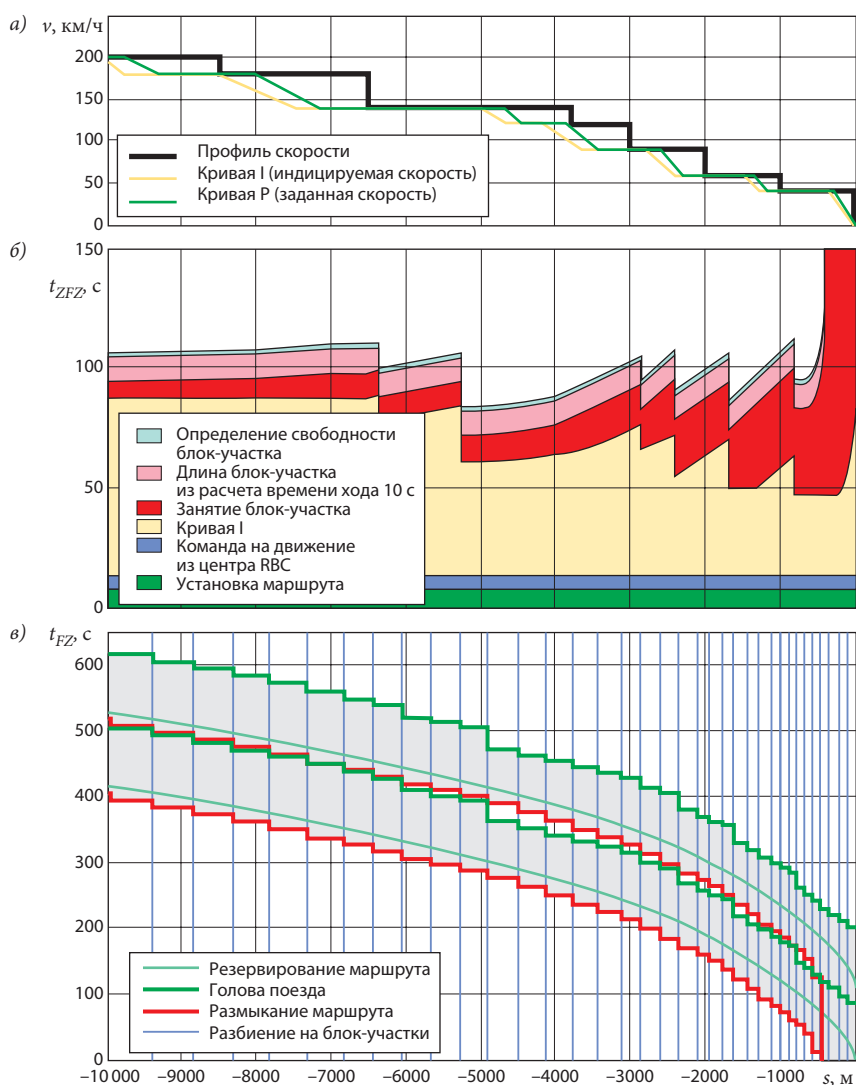


Рис. 8. Кривые зависимости скорости (а), межпоездного интервала (б) и времени хода двух попутных идентичных поездов (в) от пройденного пути на примере поезда длиной 400 м с тормозным коэффициентом 135 % при более точном выборе ступеней статичной кривой скорости

- в зоне наименьших межпоездных интервалов ступенчатые кривые для обоих поездов сдвинуты друг к другу, а при минимальном интервале даже касаются друг друга;
- в зоне больших межпоездных интервалов расстояние между ступенчатыми кривыми заметно больше.

Разделение линии на блок-участки в рассматриваемом примере сделано без учета других граничных условий, например расположения стрелок. В реальных условиях необходима соответствующая коррекция.

Обычно наибольшее влияние на межпоездной интервал оказывают длина блок-участков и тормозной путь (расстояние между предупредительным и основным сигналами при светофорной сигнализации и кривые контроля скорости при торможении в случае использования ETCS). Из рис. 7 видно, что при адаптации длины блок-участка к времени хода по нему, равному 10 с, доминирующим фактором становится тормозной путь (полоса желтого цвета, учитывающая как безопасный тормозной путь, так и время реакции машиниста локомотива). Эта желтая полоса иллю-

стрирует упомянутый выше конфликт между безопасностью и пропускной способностью, разрешить и оптимизировать который можно только путем анализа рисков для конкретной ситуации.

Пики на кривой межпоездного интервала (см. рис. 7, б) являются прямым следствием переломов кривых скорости. При более точном регулировании снижения скорости (т.е. с использованием большего числа этапов) эти пики существенно сглаживаются, но и несколько увеличивается время хода.

На рис. 8 показана ситуация с прибытием на станцию того же поезда при более точном выборе ступеней MRSP. Новая кривая MRSP рассчитана таким образом, чтобы скорость нигде не повышалась. Пики на кривой межпоездного интервала становятся меньше, а весь процесс движения — более равномерным. Межпоездной интервал снижается на 16 с — со 128 (см. рис. 7) до 112 с. В сфере наибольших поездных интервалов на последних 10 км участка при движении с заданной скоростью время движения возрастает на 22 с — с 395 (см. рис. 7) до 417 с. В обоих случаях межпоездной интервал уменьшается еще примерно на 10 с — до 118 с (и 102 с при отказе от служебного торможения).

Длина блок-участков с временем преследования 10 с зависит от максимально допустимой скорости на линии и составляет 555 м при скорости 200 км/ч и 111 м при скорости 40 км/ч. Система ETCS уровня 3 (с подвижными блок-участками) дает по сравнению с ETCS уровня 2 выигрыш только 10 с при таком подходе. Желтая зона на рис. 7 остается при этом незатронутой. Преимущество ETCS уровня 3 состоит прежде всего в том, что контроль за полносоставностью поезда делает ненужными напольные устройства контроля свободы пути, такие, как рельсовые цепи и счетчики осей. Это способствует снижению расходов на инфраструктуру и по-

вышению эксплуатационной готовности системы в целом.

Приближение к закрытому сигналу

Первые методики расчета кривых контроля скорости при торможении предусматривали сравнительно большие зазоры между контрольными кривыми. Так, машинист при превышении значения скорости на предупредительной кривой должен был иметь возможность самостоятельно начать торможение поезда. Цель состояла в том, чтобы избежать вмешательства системы в управление поездом. Однако при таком подходе кривая заданной скорости становится слишком полой. На рис. 9 показана эта кривая как функция пути и времени при приближении к месту остановки классического пассажирского поезда с тормозным коэффициентом 135% в соответствии с исходными методиками расчета. Для торможения до полной остановки со скорости 140 км/ч необходимы примерно 144 с и тормозной путь 1600 м. При этом для торможения со скорости 10 км/ч до полной остановки требуется 53 с, которые необходимы для проследования пути длиной лишь 63 м. Такой стиль вождения не подходит ни ожидающим на платформе пассажирам, ни машинисту. Естественно, этого можно избежать, если поезд остановится примерно в 50 м перед местом конца действия команды на движение ЕОА. Однако длина пассажирских платформ и станционных путей не допускает этого. Машинист вынужден продолжать движение до ЕОА, причем это касается как пассажирских, так и длинносоставных грузовых поездов. Такая форма кривой контроля скорости при торможении неприемлема для эксплуатационного процесса.

Контрольные кривые были основательно переработаны для повышения их эффективности. В первую очередь были сдвинуты друг к другу настолько близко, на-

сколько это допустимо с точки зрения управления тормозами. Теперь уже нет возможности избежать автоматического вмешательства системы после превышения значения кривой Р. На практике это не создает проблем, поскольку машинист вскорее после превышения значений кривой I включает тормоза. У него по-прежнему сохраняется возможность компенсировать небольшие превышения значений кривой Р путем увеличения тормозного усилия. Это было с успехом продемонстрировано как в ходе опытных поездок, так и на тренажере.

Результат сдвижки контрольных кривых показывает зеленая кривая на рис. 8, которая является значительно более крутой по сравнению с исходной кривой черного цвета. Для торможения со скорости 140 км/ч до полной остановки требуется 67 с, при этом пройденный путь составляет 1107 м (вдоль кривой Р). Если с прежними контрольными кривыми для проследования последних 1600 м требовалось 144 с, то теперь поезд проходит тот же отрезок за 80 с. От начала пассажирской платформы (400 м перед ЕОА)

до остановки поезда при использовании новых контрольных кривых требуется только 44 с (с прежними кривыми — 96 с). В обоих примерах длина охранного отрезка за сигналом принята равной 50 м, а от использования кривых SBD и SBI отказались.

Введение ограничивающей кривой контроля скорости

Крутая кривая заданной скорости наряду с эксплуатационными достоинствами имеет определенные недостатки в высокоскоростном движении, поскольку требует сравнительно большого замедления. При таком замедлении возможен выход на уровень полного торможения, что нежелательно как с точки зрения износа тормозов, так и в отношении комфорта пассажиров. Поэтому в дополнение к исходным кривым контроля скорости при торможении была введена ограничивающая кривая GUI, при помощи которой операторы перевозок могут ограничивать замедление при служебном торможении для достижения ком-

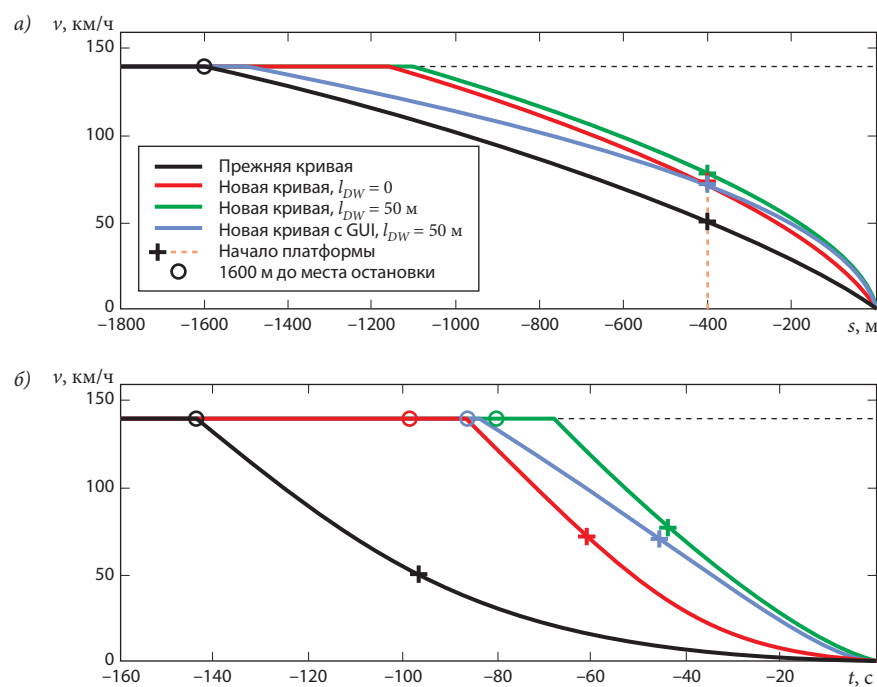


Рис. 9. Зависимости скорости от пути (а) и времени (б) при приближении поезда к закрытому сигналу

промисса между комфортом для пассажиров, износом тормозов и временем хода поезда. Синяя кривая на рис. 9 соответствует кривой GUI, рассчитанной на замедление $0,5 \text{ м/с}^2$. Если следовать этой кривой, то время хода по отрезку длиной 1600 м составит 86 с, что лишь на 6 с больше, чем при использовании кривой зеленого цвета. Если в бортовом устройстве выполняется расчет кривой GUI, то она отображается на пульте машиниста вместо кривой заданной скорости P.

Влияние длины охранного отрезка за сигналом на набор контрольных кривых

Длина охранного отрезка за сигналом, т. е. расстояние между точками EAO и SvL, существенно влияет на производительность системы ETCS в реальной эксплуатации. Если охранный отрезок отсутствует, то все кривые должны вычисляться в расчете на остановку поезда в точке EOA, а значит, будут более пологими. В противном случае кривые EBD и EBI рассчитываются до точки SvL. Благодаря этому другие кривые могут быть более крутыми именно на последних нескольких десятках метров перед точкой EOA, а значит, поезд сможет подходить к месту остановки заметно быстрее.

Ситуация без охранного отрезка показана кривой красного цвета на рис. 8. Для проследования всего пути длиной 1600 м требуется 98 с, причем на отрезок от начала пассажирской платформы приходится 61 с. Время хода по тому же участку сокращается почти на 20 с при наличии охранного отрезка длиной 50 м (кривая зеленого цвета на рис. 8). Кроме того, в отсутствие охранного отрезка поезд при скорости менее 20 км/ч приближается к точке EOA недопустимо медленно. Поэтому следует настоятельно рекомендовать сохранить имеющиеся на станциях охранные отрезки за

сигналами и в будущем при проектировании режимов эксплуатации с использованием системы ETCS.

Использование прироста пропускной способности

Для использования получаемого благодаря ETCS прироста пропускной способности необходимы оверлейные системы управления железнодорожными перевозками.

График движения с максимальным использованием пропускной способности может быть исполнен только при прецизионном управлении движением поездов. В противном случае даже в пассажирском сообщении накапливаются минимальные опоздания, приводящие к сбоям в соблюдении графика. Еще более усложняется ситуация на линиях со смешанным движением, поскольку грузовые поезда отличает менее точное соблюдение графика, что влечет за собой его нарушения в неприемлемых масштабах. Таким образом, требования к управлению перевозками состоят в следующем:

- обеспечить точность соблюдения графика в грузовом движении не меньшую, чем в пассажирских перевозках;
- оптимизировать окна для грузового движения для пропуска максимального числа поездов при одновременной гарантии соблюдения графика;
- согласовать работы устройств инфраструктуры и поезда для выделения ниток графика с высокой точностью.

Железнодорожная сеть разделяется в такой системе на зоны интенсивного движения и зоны компенсации. Первые располагаются обычно вокруг узловых станций. Стабильность эксплуатации достигается благодаря оптимальному использованию зон компенсации.

Для повышения точности каждому поезду выделяется так называемый слот, т. е. нитка графика, согла-

сованная с динамическими параметрами движения поезда и имеющая заданное время входа в зону интенсивного движения. Поскольку динамические свойства поезда, а также время входа в зону интенсивного движения для грузовых поездов (а при определенных обстоятельствах — для всех поездов) становятся известными лишь незадолго до исполнения графика, то слоты должны генерироваться оперативно (в реальном масштабе времени) в расчете на максимально возможное использование пропускной способности зон интенсивного движения. При этом регулирование движения всех поездов в зонах компенсации должно быть таким, чтобы они прибыли к границе зоны интенсивного движения именно в те моменты времени, которые необходимы для проследования этих зон с высокой точностью.

Внедрение ETCS в масштабах сети

Стратегия SBB предусматривает внедрение ETCS на всех линиях в течение 10 лет, чтобы облегчить доступ к сети. С 2016 г. для выхода тягового подвижного состава на швейцарские линии нормальной колеи будет достаточно наличия бортового устройства ETCS как единственной системы локомотивной сигнализации, что позволит снизить расходы на приобретение новых локомотивов и моторвагонных поездов. Существующие приборы, способные работать с сообщением АЛС национального формата P44, могут эксплуатироваться и после 2016 г. На большей части железнодорожной сети будет внедрена система ETCS уровня 1 LS, однако отдельные линии с повышенными требованиями к скорости движения или пропускной способности планируется оборудовать системой ETCS уровня 2.

P. Eichenberger. Signal und Draht, 2007, № 3, S. 6–11, 13.