

Сравнительный анализ пропускной способности кольцевой линии метро

Н. А. Кузнецов^{*,**,a}, М. В. Лебедев^{***,b}, К. В. Семенихин^{*,**,***,c}

^{*} Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия,
^{**} Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская область, Россия,

^{***} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

e-mail: ^akuznetsov@cplire.ru, ^bmax_max82@inbox.ru, ^csiemenkv@gmail.com

Поступила в редколлегия 30.09.2022

Аннотация—Проведено имитационное моделирование движения группы поездов по кольцевой линии метро с использованием автоматического управления на основе заданного профиля скоростей. Для предотвращения потенциально опасного сближения пары поездов применены два варианта сигнализации: первый вариант основан на механизме рельсовых цепей, а второй — на передаче параметров движения поезда впереди идущему. Показано, что передача текущих параметров движения способна существенно повысить пропускную способность всей линии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерное моделирование, модель движения, случайные возмущения, неточные измерения, управление поездом, система сигнализации, пропускная способность, межпоездной интервал.

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_237

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие пассажирского железнодорожного транспорта происходит быстрыми темпами в городских агломерациях по всему миру. В связи с этим все более востребовано внедрение автоматических систем управления подвижным составом особенно на железнодорожных линиях, обеспечивающих интенсивный пассажирский трафик: метрополитен, внутригородские и пригородные электрички, монорельсовые дороги и т.п. Системы автоматического управления поездами призваны повысить точность выполнения графика движения поездов, снизить расходы электроэнергии на движение, оптимизировать режим ведения поезда в зависимости от участка пути, повысить пропускную способность действующих линий без изменения их технологической инфраструктуры.

Решение последней задачи основано на минимизации интервалов между поездами, следующими в попутном направлении. Для этого в настоящее время разрабатываются и внедряются комплексные автоматизированные системы интервального регулирования движения [1, 2]. Они включают механизмы автоблокировки и сигнализации с подвижными блок-участками, технологии виртуальных сцепок [3, 4] и использование цифровых радиоканалов передачи данных [5, 6].

Настоящая работа нацелена на сравнение двух принципиальных схем сигнализации об опасном сближении поездов с точки зрения максимизации пропускной способности. Первая схема основана на механизме рельсовых цепей, когда поезду сообщается бинарная информация: занят или не занят смежный участок впереди идущим поездом. Вторая схема предполагает

непрерывную передачу данных о параметрах движения (положение и скорость) от ведущего поезда к ведомому. В обеих схемах использование систем глобального позиционирования невозможно, так как движение поездов осуществляется по подземной линии метро. Точное положение поезда определяется в момент прохождения начала участка рельсовой цепи. Автоматическое управление реализуется с помощью системы слежения, контролирующей отклонения текущей скорости от заданного профиля скоростей на перегонах между станциями. На интервале моделирования T число поездов N , действующих на кольцевой линии, считается постоянным. Если N велико, то возможны простои, когда поезда вынуждены ждать освобождения впереди лежащих участков. Для кольцевой линии проблема массовых задержек еще более усугубляется. Поэтому анализ движения проводится с использованием двух показателей: пропускная способность C (число поездов, прошедших станцию за час) и суммарное время простоя поездов D .

Для вычисления указанных показателей необходимо провести серию численных экспериментов по моделированию движения N поездов по кольцевой линии метро на интервале времени T с учетом случайных возмущений и неточных измерений. В данной работе использованы апробированные ранее модели движения поезда и действующих на него случайных возмущений [7, 8]. В отличие от [9], где использовался только механизм рельсовых цепей, в данной статье реализовано автоматическое управление, соответствующее двум указанным выше системам сигнализации.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предположим, что по кольцевой линии длины S в попутном направлении движутся поезда с номерами $i = 1, \dots, N$. Нумерация соответствует порядку следования, т.е. для i -го поезда $i - 1$ обозначает номер впереди идущего поезда (при $i = 1$ полагаем $i - 1 = N$). Положение головной части поезда и его скорость вдоль линии определяются неотрицательными числами x и v соответственно, причем два положения x, x' считаются идентичными, если $x = x' \bmod S$.

Пройденное расстояние $S^{(i)}(t)$, положение $X^{(i)}(t)$ и скорость i -го поезда $V^{(i)}(t)$ удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{S}^{(i)} = V^{(i)}, \quad X^{(i)} - X^{(i)}(0) = S^{(i)} \bmod S, \quad \dot{V}^{(i)} = (U^{(i)} - F(X^{(i)}, V^{(i)}))/M + Z^{(i)}, \quad (1)$$

где функция $F(x, v)$ равна сумме сил трения, силы сопротивления воздушной среды и составляющей силы тяжести, которую необходимо учитывать при наличии уклона путей [7]; $U^{(i)}$ — автоматическое управление, реализующее силы торможения и тяги; $Z^{(i)}$ — случайные возмущения в модели движения; M — масса поезда.

Для задания автоматического управления используется единый профиль скоростей $V^o(x)$, который определяет режим движения поездов на перегонах между станциями (см. рис. 1). Кроме того, необходимо учитывать, что скорость поезда наблюдается с некоторой случайной ошибкой, а положение поезда известно точно только в момент прохождения начала участка рельсовой цепи. Поэтому вместо истинных параметров движения $X^{(i)}$ и $V^{(i)}$ известны их оценки: $\tilde{X}^{(i)}$ и $\tilde{V}^{(i)}$. В итоге управление $U^{(i)}$ задается системой слежения:

$$U^{(i)} = f(-\kappa Y^{(i)}), \quad \tau \dot{Y}^{(i)} + Y^{(i)} = \tilde{V}^{(i)} - V^o(\tilde{X}^{(i)}) \delta^{(i)}, \quad (2)$$

в которой $Y^{(i)}$ — преобразованная невязка между наблюдаемой скоростью и расчетной, τ — коэффициент запаздывания, κ — коэффициент обратной связи, $f(\cdot)$ — релейное звено, реализующее конечное число режимов торможения и тяги, а $\delta^{(i)}$ — индикаторная функция, определяющая механизм сигнализации (нулевое значение приводит к сигналу экстренного торможения, единичное значение означает отсутствие такого сигнала).

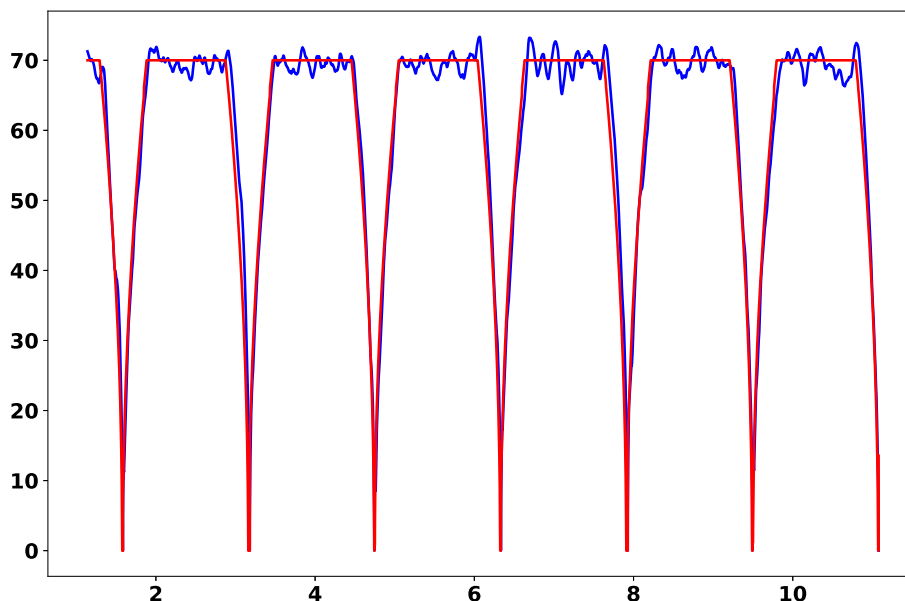


Рис. 1. Профиль скоростей (красная линия) и истинная скорость поезда (синяя линия) [км/ч] как функции положения [км].

Обе схемы сигнализации основаны на сравнении расстояния между поездами с тормозным путем (включая длину поезда L). Первая схема использует грубую оценку расстояния, равную числу участков рельсовой цепи между поездами, и величину тормозного пути B , получаемой при максимальной скорости движения. Во второй схеме сигнализации расстояние между поездами и их тормозные пути вычисляются по их наблюдаемым положениям $\tilde{X}^{(i)}$, $\tilde{X}^{(i-1)}$ и скоростям $\tilde{V}^{(i)}$, $\tilde{V}^{(i-1)}$. Данные системы будем кратко обозначать $\mathcal{TC}(p)$ и $\mathcal{DT}(p)$ соответственно, где $\mathcal{TC}$ — «Track Circuit», $\mathcal{DT}$ — «Data Transmission», p — число участков рельсовых цепей на перегоне между двумя станциями.

Определим пропускную способность C как общее число рейсов, выполненных всеми поездами за единицу времени:

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{S^{(i)}(T)}{S \cdot T}. \quad (3)$$

Введем показатель D , определяющий длительность задержки, как суммарную долю времени срабатывания системы сигнализации

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{|\{t \in [0, T] : \delta^{(i)}(t) = 0\}|}{T} \quad (4)$$

(знак модуля здесь обозначает суммарную длину соответствующих промежутков).

Теперь можно сформулировать цель данной работы. По результатам моделирования движения N поездов в течение времени T требуется определить пропускную способность C и время

задержки D , на основе которых необходимо сделать вывод об эффективности указанных схем сигнализации.

Кроме того, данный анализ важно провести с точки зрения проблемы интервального регулирования, когда основным показателем, характеризующим пропускную способность, выступает интервал времени Δ между поездами, прибывающими друг за другом на одну и ту же станцию. Поскольку величина Δ зависит от многих случайных факторов, необходимо описать ее распределение вероятностей и проанализировать характер зависимости от параметров систем сигнализации.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ

3.1. Описание дискретной системы

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений, определяющих совместное движение (1) поездов $i = 1, \dots, N$ с учетом автоматического управления (2), используется метод Эйлера на временной сетке $\{t_k\}_{k \geq 0}$ с фиксированным шагом h :

$$\begin{aligned} X_k^{(i)} &= X_{k-1}^{(i)} + hV_{k-1}^{(i)} \mod S, \\ V_k^{(i)} &= \left\{ V_{k-1}^{(i)} + h \left(U_{k-1}^{(i)} - F(X_{k-1}^{(i)}, V_{k-1}^{(i)}) \right) / M + hZ_k^{(i)} \right\}_+, \\ U_k^{(i)} &= f(-\kappa Y_k^{(i)}), \\ Y_k^{(i)} &= (1 - h/\tau)Y_{k-1}^{(i)} + (h/\tau) \left(\tilde{V}_{k-1}^{(i)} - V^o(\tilde{X}_{k-1}^{(i)}) \delta_{k-1}^{(i)} \right), \end{aligned}$$

где $\{\cdot\}_+ = \max\{0, \cdot\}$.

Наблюдаемые значения скорости являются выходом инерционного звена с аддитивной случайной помехой:

$$\tilde{V}_k^{(i)} = (1 - h/\gamma)\tilde{V}_{k-1}^{(i)} + (h/\gamma)(V_{k-1}^{(i)} + \eta_k^{(i)}),$$

где γ — известный коэффициент запаздывания.

Наблюдения положения поезда являются безошибочными при прохождении начала участка $\{P_j, j = 1, \dots, J\}$, т.е.

$$\tilde{X}_k^{(i)} = P_j \quad \text{при} \quad X_{k-1}^{(i)} < P_j \leq X_k^{(i)},$$

а далее строится оценка положения на основе наблюдаемой скорости

$$\tilde{X}_k^{(i)} = \tilde{X}_{k-1}^{(i)} + h\tilde{V}_{k-1}^{(i)} \mod S$$

вплоть до конца участка.

Дискретная система определяется начальными положениями поездов $\{X_0^{(i)}, i = 1, \dots, N\}$, нулевой начальной скоростью $V_0^{(i)} = 0$ и силой тяги при трогании $U_0^{(i)} = F_t$.

3.2. Сигнализация на основе рельсовых цепей

В случае применения системы сигнализации $\mathcal{TC}(p)$ тормозной путь (который далее берется, как $B + L$, т.е. с учетом длины поезда) сравнивается с длиной впереди лежащих участков рельсовой цепи. Точки $\{P_j, j = 1, \dots, J\}$ обозначают начала участков, а J — их количество, кратное числу участков между станциями p . Будем считать, что одного перегона между станциями

заведомо достаточно для остановки поезда, т.е. $P_{j+p} - P_j < B + L$ (операция суммирования индексов выполняется по модулю J).

Система сигнализации $\mathcal{TC}(p)$ срабатывает, т.е. $\delta_k^{(i)} = 0$, в следующих случаях:

- (i) $P_j \leq X_k^{(i)} < P_{j+1}$ и $P_{j+1} \leq X_k^{(i-1)} < P_{j+2}$ при $P_{j+1} - P_j > B + L$;
- (ii) $P_j \leq X_k^{(i)} < P_{j+1}$ и $P_{l+1} \leq X_k^{(i-1)} < P_{l+2}$ при $P_{j+1} - P_j \leq B + L$, где P_{l+1} — ближайшая (по пути следования) точка, для которой выполнено $P_{l+1} - P_j > B + L$.

Случай (i) имеет место, когда пара поездов занимает соседние участки, а тормозной путь меньше длины участка. Данное условие позволяет избежать столкновения, поскольку экстренное торможение включается в момент достижения участка $[P_j, P_{j+1}]$, поэтому тормозного пути $B + L$ достаточно для остановки до точки начала следующего участка P_{j+1} .

В случае (ii) тормозной путь больше длины соседнего участка. Поэтому необходимо определить минимальное число $m \geq 1$, которое равно числу свободных участков между поездами, так чтобы их суммарная длина с учетом впереди лежащего участка была больше тормозного пути. Система сигнализации должна сработать в момент въезда ведомого поезда на участок $[P_j, P_{j+1}]$ при нахождении ведущего поезда на участке $[P_{l+1}, P_{l+2}]$, где $l = m + j$. Это также гарантирует безопасную остановку, так как расстояние между поездами в момент включения экстренного торможения составляет $P_{l+1} - P_j$, что больше $B + L$ по условию.

3.3. Сигнализация на основе передачи данных

Для описания системы сигнализации $\mathcal{DT}(p)$ необходимо определить минимальное расстояние d^* , на котором поезд успеет затормозить, не столкнувшись с впереди идущим, если известны текущие положения и скорости обоих поездов.

Данный вопрос можно сформулировать в виде следующей игровой задачи:

$$d^* = \sup_u \inf_{u^f} d(u, u^f), \quad d(u, u^f) = \inf_{t \geq 0} \{x^f(t) - x(t)\}, \quad (5)$$

где x^f, x — положение на прямой ведущего и ведомого поезда, соответственно, а $d(u, u^f)$ — их минимальное сближение, рассматриваемое как функционал от пары управлений (u^f, u) с учетом модели движения

$$\ddot{x} = u(t), \quad \ddot{x}^f = u^f(t)$$

и известного максимального ускорения торможения w_b , т.е.

$$-u \leq w_b, \quad -u^f \leq w_b.$$

Решение игровой задачи (5) описывает наилучшее управление ведомым поездом из расчета на наихудший случай, реализуемый ведущим поездом.

При любом $t \geq 0$ минимум расстояния $x^f(t) - x(t)$ по u^f достигается на управлении

$$u^{f*}(t) = \begin{cases} -w_b, & t \leq T^{f*}, \\ 0, & t > T^{f*}, \end{cases}$$

где $T^{f*} = v_0^f / w_b$ — момент остановки ведущего поезда, имевшего начальную скорость v_0^f . Тогда его тормозной путь составит

$$B_0^f = x^f(T^{f*}) - x_0^f = \frac{(v_0^f)^2}{2w_b}.$$

Аналогично максимум $x^{f*}(t) - x(t)$ по u достигается на управлении u^* того же вида с учетом того, что у ведомого поезда при начальной скорости v_0 момент остановки будет равен $T^* = v_0/w_b$, а тормозной путь составит

$$B_0 = x(T^*) - x_0 = \frac{v_0^2}{2w_b}.$$

Следовательно, искомое минимальное расстояние равно

$$d^* = x^{f*}(t) - x^*(t) = B_0^f - B_0 + d_0,$$

где t — любой момент, начиная с $\max\{T^{f*}, T^*\}$, а $d_0 = x_0^f - x_0$ — начальное расстояние между поездами. Поэтому столкновения не произойдет, если d^* будет больше длины поезда L .

Если записать известную величину тормозного пути B , реализующегося на максимальной скорости $v_{\max}$, и выразить максимальное ускорение торможения w_b , то получатся соотношения

$$B_0^f = B \left(\frac{v_0^f}{v_{\max}} \right)^2, \quad B_0 = B \left(\frac{v_0}{v_{\max}} \right)^2.$$

Учтем, что начальные условия x_0, v_0 и x^f, v_0^f выполняют роль текущих значений соответствующих параметров движения. Однако вместо них доступны лишь их оценки $\tilde{X}_k^{(i)}, \tilde{V}_k^{(i)}$ и $\tilde{X}_k^{(i-1)}, \tilde{V}_k^{(i-1)}$. Поэтому условие $d^* > L$ заменим более строгим ограничением, добавив длину тормозного пути: $d^* > B + L$.

Теперь условие срабатывания сигнализации $\mathcal{DT}(p)$ для i -го поезда принимает вид:

$$\delta_k^{(i)} = 0 \iff B \left\{ \left(\frac{\tilde{V}_k^{(i-1)}}{v_{\max}} \right)^2 - \left(\frac{\tilde{V}_k^{(i)}}{v_{\max}} \right)^2 \right\} + (\tilde{X}_k^{(i-1)} - \tilde{X}_k^{(i)} \bmod S) < B + L.$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для компьютерного моделирования были взяты характеристики поездов Desiro RUS «Ласточка» согласно данным из [10]: длина поезда $L = 155$ м, масса $M = 260$ т, максимальные значения силы тяги $F_t = 255$ кН и торможения $F_b = 210$ кН.

В системе слежения (2) релейное звено $f(u)$ имело 20 переключений в диапазоне $-F_b \leq u \leq F_t$, а коэффициенты обратной связи и запаздывания были равны $\kappa = 136,621$ кН с/м и $\tau = 1,157$ с, соответственно.

В модели (1) было взято $F(x, v) = av + bv^2$, где $a = 250$ кг/с, $b = 1,225$ кг/м.

Тормозной путь $B \approx 231$ м был определен в результате моделирования движения поезда на скорости 70 км/ч при использовании силы максимальной торможения F_b без учета случайных возмущений.

Дискретная система моделировалась с шагом $h = 0,1$ с и возмущениями $\{Z_k^{(i)}\}$ в виде процесса авторегрессии, который получен дискретизацией стационарного гауссовского процесса $Z(t)$, удовлетворяющего линейному стохастическому дифференциальному уравнению:

$$dZ + (1/\tau_Z)Z dt = \sigma_Z \sqrt{2/\tau_Z} dW,$$

где $W(t)$ — стандартный винеровский процесс, $\sigma_Z = 0,2$ м/с² — с.к.о. процесса $Z(t)$ и $\tau_Z = 1$ с. Возмущения в движении N поездов моделировались взаимно независимыми процессами: $\{Z_k^{(1)}\}, \dots, \{Z_k^{(N)}\}$.

В модели наблюдаемой скорости аддитивные помехи определялись последовательностью независимых величин $\{\eta_k^{(i)}\}$, распределенных по нормальному закону $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$, где $\sigma = 0.93$ м/с согласно [11], а коэффициент запаздывания был взят равным $\gamma = 0,7$ с.

Совместное движение N поездов моделировалось на временном промежутке $T = 12$ часов по плоской круговой линии длиной $S = 19$ км с двенадцатью равноудаленными станциями, временем остановки на станции в 30 с и максимальной скоростью на перегонах в 70 км/ч (см. рис. 1). Начальные положения поездов также были взяты на равном удалении друг от друга. Рассмотрены два варианта расположения рельсовых цепей, когда перегон состоит: а) из двух участков; б) из шести участков (одинаковой длины).

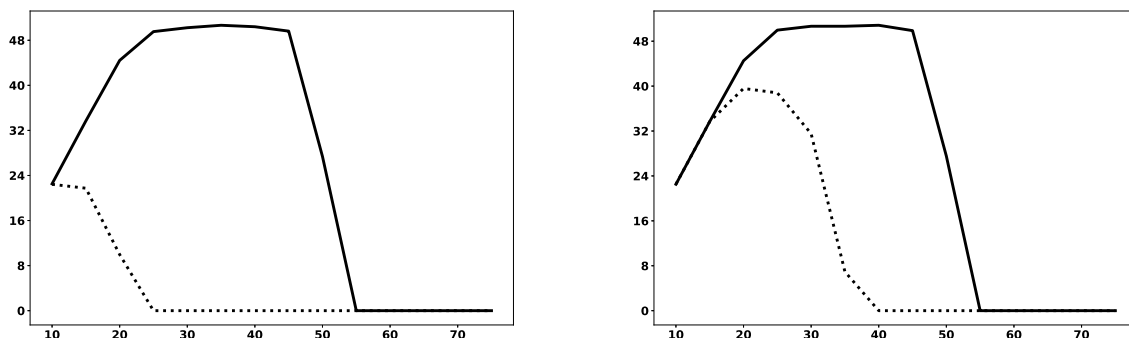


Рис. 2. Пропускная способность C [рейс/ч] от числа поездов N при использовании двух систем сигнализации $DT(p)$ (сплошная) и $TC(p)$ (пунктирная) для $p = 2$ участков (слева) и $p = 6$ участков (справа).

Начнем со сравнения значений пропускной способности (3). Как видно из рис. 2, увеличение числа участков p практически не влияет на пропускную способность, которую обеспечивает система сигнализации $DT(p)$, основанная на передачи данных о скорости и положении. Напротив, для системы $TC(p)$, использующей только механизм рельсовых цепей, увеличение p с двух до шести позволило повысить число рейсов в час с 22 до 39 (для этого понадобилось соответственно 10 и 20 поездов, курсирующих по линии). Вместе с тем, именно передача текущей измерительной информации дала возможность повысить пропускную способность C до 50 рейсов в час за счет эксплуатации $N = 25$ поездов на линии.

При серьезном увеличении N наблюдается резкое снижение показателя C из-за возникновения задержек, что можно проследить по графикам показателя (4) (см. рис. 3). При полной блокировке движения суммарная доля задержки D становится равной числу поездов N .

Теперь представим данные о времени Δ , которое образует интервал между моментами прибытия пары поездов (включая время остановки на станции). По выборке из N поездов, которые проехали все 12 станций по 20–40 раз, можно оценить плотность случайной величины Δ , используя гистограмму и ядерную оценку (см. рис. 4). В случае $N = 15$ поездов и двух участков на каждом перегоне время ожидания составило 1–3 минуты при передаче данных о параметрах движения и 2–5 минут при использовании сигнализации, основанной на рельсовых цепях. Если же задействованы $N = 25$ поездов и $p = 6$ участков, то время ожидания для системы $DT(p)$ укладывается в диапазон 60–90 секунд, а для системы $TC(p)$ — в интервал от 80 до 160 секунд.

Необходимо отметить, что в распределении межпоездного интервала Δ имеются две компоненты, которые соответствуют двум ситуациям: наличию, или наоборот, отсутствию задер-

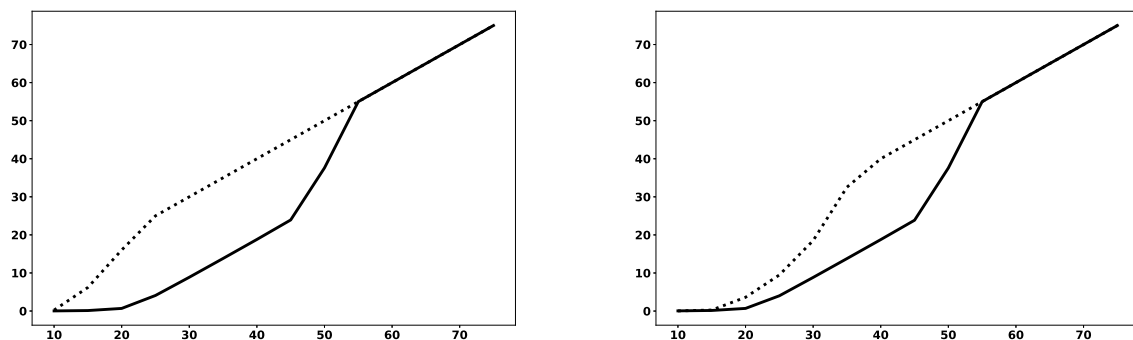


Рис. 3. Суммарная доля задержки D от числа поездов N при использовании двух систем сигнализации $DT(p)$ (сплошная) и $TC(p)$ (пунктирная) для $p = 2$ участков (слева) и $p = 6$ участков (справа).

жек, возникающих при срабатывании системы сигнализации. Это наиболее четко проявляется при использовании системы $TC(p)$, когда распределение Δ приобретает тяжелые хвосты. Для сигнализации $DT(p)$ (при $N = 25$, когда имеется небольшой процент задержек) это не так заметно: обе компоненты имеют близкие моды и легкие хвосты.

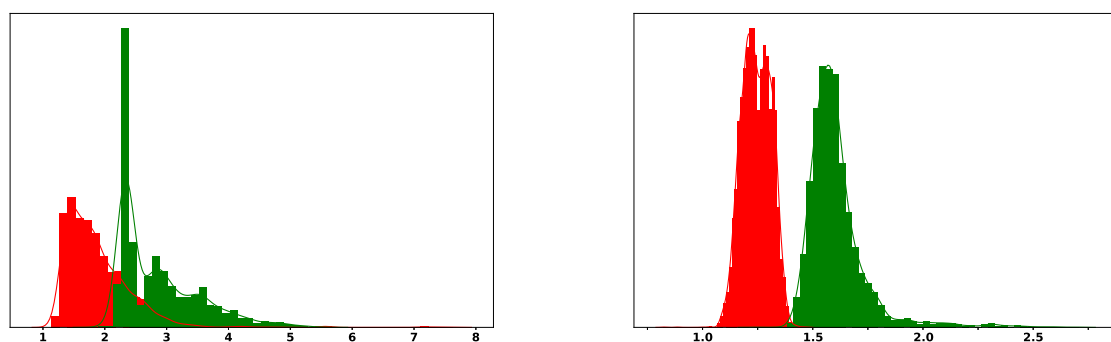


Рис. 4. Оценки плотности для времени ожидания поезда Δ (в минутах) при использовании двух систем $DT(p)$ (красный цвет) и $TC(p)$ (зеленый цвет) для $p = 2$, $N = 15$ (слева) и $p = 6$, $N = 25$ (справа).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты численного эксперимента по моделированию движения группы поездов по кольцевой линии метро с учетом случайных возмущений и неточных наблюдений. Показано, что использование сигнализации, основанной на передаче данных о параметрах движения от ведущего поезда к ведомому, способно серьезно повысить пропускную способность линии и сократить межпоездной интервал в сравнении с традиционной системой, использующей данные о занятии (или незанятии) ведущим поездомпереди лежащих участков рельсовых цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участков. *Железнодорожный транспорт*, 2020, № 3, стр. 4–7.
2. Озеров А.В., Малинов В.М. Зарубежные системы интервального регулирования движения поездов. *Автоматика, связь, информатика*, 2022, № 3, стр. 31–34.
3. Mitchell I. et al. ERTMS Level 4, train convoys or virtual coupling. *IRSE News*, 2016, no. 219, pp. 1–3.
4. Куренков П.В., Солоп И.А., Чеботарева Е.А. Подвижные блок-участки и виртуальные сцепки как инновационные составляющие транспортно-логистической инфраструктуры. *Логистика*, 2021, № 1 (170), стр. 30–34.
5. Farooq H., Soler J. Radio communication for communication-based train control (CBTC): A tutorial and survey. *IEEE Communications and Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 1377–1402.
6. Шаманов В.И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами. *Автоматика на транспорте*, 2018, Т. 4, № 2, стр. 223–240.
7. Горбачев Р.А., Гречишкина Н.А., Григорьев Ф.Н., Кузнецов Н.А. Идентификация параметров модели и фильтрация координат движения вагона монорельсовой дороги. *Информационные процессы*, 2015, Т. 15, № 3, стр. 343–350.
8. Горбачев Р.А. Моделирование вагона монорельсовой транспортной системы типа H-Bahn: параметрическая идентификация, фильтрация, управление движением. *Cloud of Science*, 2017, Т. 4, № 4, стр. 662–675.
9. Kuznetsov N.A., Semenikhin K.V., Arkhipov A.S., Fomichev D.S. Simulation-based capacity analysis of a circle metro line. *2021 IEEE 15th Internat. Conf. Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2021, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/AICT52784.2021.9620476>.
10. Циглер В., Манглер Р. Desiro RUS — перспективный пригородный электропоезд. *Железные дороги мира*, 2012, № 4, стр. 44–51.
11. Старовойтов Е.И., Воробьев С.А. Измерение скорости метropоезда бортовыми оптическими датчиками. *Мир транспорта*, 2015, Т. 13, № 4, стр. 80–93.

Comparative Capacity Analysis of a Circle Metro Line

N.A. Kuznetsov, M.V. Lebedev, K.V. Semenikhin

Computer modelling is carried out for trains' motion along a circle metro line using automatic control and a given speed profile. To avoid possible collisions of trains the two signalling systems are applied: the first is based on track circuits and the second is based on transmitting train motion parameters to the train ahead. We show that the line capacity can be significantly increased when using motion data transmission.

KEYWORDS: computer modelling, motion model, random disturbances, noisy measurements, train control, railway signalling system, capacity, traffic interval.