

Повышение безопасности движения поездов на линии метрополитена при компенсируемых возмущениях

Аннотация: Рассматриваются методы повышения безопасности движения поездов на линиях метрополитена при компенсируемых возмущениях в централизованные системы управления. Предложена система автоматического построения регулировочных характеристик, интегрированная в централизованную систему управления. В алгоритме используется адаптивный экстраполятор, прогнозирующий возмущения в режиме реального времени, что обеспечивает движение поездов со скоростями, не превышающими ограничений по системе безопасности движения. Результаты имитационного моделирования движения поездов на линии метрополитена с использованием разработанного алгоритма показали уменьшение числа остановок поездов на перегоне по ограничениям системы безопасности при эффективном управлении временем хода.

Ключевые слова: централизованная система управления, безопасность движения поездов, минимальный интервал, адаптивный экстраполятор, метрополитен, прогнозирование возмущений

Введение

Обеспечение безопасности движения поездов метрополитена – важнейшая задача комплексной централизованной интеллектуальной системы управления. Централизация позволяет учесть взаимное расположение поездов на линии, при котором вырабатывается управление (требуемые времена хода по перегонам и длительности стоянок на станциях) для каждого поезда линии. С целью повышения безопасности и выполнения планового графика движения при расчёте величин управлений требуется обеспечить движение поездов со скоростями, не превышающими ограничений по системам безопасности. Это условие позволяет уменьшить число остановок поездов на перегонах, дополнительных режимов

торможения и, следовательно, повышает безопасность за счёт уменьшения вероятности опасного сближения поездов, улучшает выполнение планового графика движения за счёт уменьшения потерь времени, затрачиваемого на дополнительные режимы торможения и разгона. Рассматриваются алгоритмы управления при компенсируемых возмущениях. Компенсируемые возмущения – это сбои в работе линий метрополитена, которые могут быть парированы без снятия поездов за счёт использования резервов длительностей стоянок и времён хода. При сбоях движения, которые приводят к снятию поездов с линии, к закрытию перегонов и (или) станций, разработаны алгоритмы управления во время «большого сбоя» [1-2]. После ликвидации причин, вызвавших этот сбой, разработаны алгоритмы, обеспечивающие управление движением после ликвидации причин сбоя [1-3]. Такие алгоритмы позволяют ввести движение поездов в плановый график с целью обеспечения их ночной расстановки [1-2].

В дальнейшем рассматривается алгоритм централизованного управления при компенсируемых возмущениях, учитывающий взаимное расположение поездов с прогнозом величин случайных возмущений.

Алгоритмы централизованного управления при компенсируемых возмущениях

Плановый график движения задаёт для каждого (n -ого) поезда длительности его стоянок $T_{cj}^r[n]$ на j -ой станции линии и времена хода $T_{xj}^r[n]$ по j -ому перегону. Верхний индекс «г» в обозначениях соответствует плановому графику. С каждой станции на верхний уровень управления поступает информация об исполненном графике движения – фактических временах прибытия $t_{nj}^\phi[n]$ и отправления t_{oj}^ϕ для каждого n -ого поезда на j -ой станции. Величина рассогласования планового и исполненного графиков определяется следующим образом [4]:

$\Delta T_{nj}[n] = t_{nj}^r - t_{nj}^\phi$ – отклонение времени по прибытию n -го поезда на j -ю станцию;

$\Delta T_{oj}[n] = t_{oj}^r - t_{oj}^\phi$ – отклонение времени по отправлению n -го поезда с j -й станции;

$\Delta T_{cj}[n] = T_{cj}^r - T_{cj}^\phi$ — отклонение фактической длительности стоянки n -го поезда на j -й станции от плановой.

В последнем выражении:

$T_{cj}^r = t_{oj}^r - t_{nj}^r$ — графиковое время стоянки n -го поезда на j -й станции;

$T_{cj}^\phi = t_{oj}^\phi - t_{nj}^\phi$ — фактическое время стоянки n -го поезда на j -й станции.

Изменение длительности стоянки по отношению к плановой является возмущением, которое должно быть парировано. На нижнем уровне управления реализуются заданные верхним уровнем времени хода и длительности стоянок.

Рассмотрим графиково-интервальный алгоритм с первоочередным использованием ресурса длительности стоянки. Этот алгоритм реализует управление, которое стремится компенсировать отклонение времени по прибытию n -ого поезда путём изменения в первую очередь длительности стоянки. Отклонение от планового времени по отправлению компенсируется путём изменения времени хода этого поезда по перегону при условии выполнения ограничения по минимальному интервалу отправления n -ого поезда после $(n-1)$ -ого. Рассмотрим в начале выработку управления при прибытии n -ого поезда на j -ую станцию раньше планового времени, то есть $\Delta T_{nj}[n] > 0$. На первом месте проверяется возможность отправления n -ого поезда в плановый момент времени и с заданным плановым временем хода по j -ому перегону.

Отправление возможно, если интервал по отправлению $\Delta T_{oj}[n] > 0$ n -ного после $(n-1)$ -ого поезда больше минимально допустимого ($\Delta T_{oj}^{min}[n] > 0$) при заданном ранее системой управления времени хода $T_{xj}^y[n-1]$ предыдущего поезда по j -ому перегону и длительности его стоянки $\Delta T_{c(j+1)}^{[n-1]}[n]$ на $(j+1)$ -ой станции, равной сумме плановой длительности, известной из графика движения, и прогнозируемой величины задержки на станции. $\Delta T_{oj}^{min}[n]$ определяется из регулировочной характеристики j -ого перегона). В том случае, если это условие не выполняется, время хода n -ого поезда увеличивается до величины, при которой

по данным регулировочной характеристики ограничение по $\Delta T_{oj}^{min}[n]$ выполняется.

В том случае, когда n -ый поезд задержан на j -ой станции на время $\Delta T_{oj}[n]$ на верхнем уровне вычисляется, требуемое время хода для компенсации опоздания по отправлению:

$$T_{xj}^y[n] = \begin{cases} T_{xj}^r[n] - \Delta T_{oj}[n] & \text{при выполнении ограничения} \\ & \text{по минимальному времени хода} \\ T_{xj}^{min}[n] & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

После чего проверяется так же, как в предыдущем случае, выполнение условий по минимально допустимому интервалу отправления $\Delta T_{oj}[n]$. Если это условие не выполняется, то время хода n -ого поезда увеличивается до значения, при котором это ограничение выполнено. Процедура определения $T_{xj}^y[n]$ такая же, как в предыдущем случае.

Прогнозирование величин возмущений случайных отклонений длительностей стоянок ($n-1$) - го поезда на ($j+1$)-й станции от плановых

Минимально допустимый интервал по отправлению n -ого поезда с j -ой станции определяется следующей зависимостью, называемой регулировочной характеристикой [4]:

$$T_{ioj}^{min}[n] = \varphi(T_{xj}^y[n], T_{xj}^y[n-1], T_{c(j+1)}^\phi[n-1]), \quad (2)$$

Величины $T_{xj}^y[n], T_{xj}^y[n-1]$ при определении в реальном времени $T_{ioj}^{min}[n]$ уже известны.

Фактическая длительность стоянки ($n-1$) -ого поезда на ($j+1$)-ой станции равна сумме известной плановой длительности стоянки $T_{c(j+1)}^r[n-1]$ и случайного возмущения $F_{c(j+1)}[n-1]$. При интенсивном движении управление выбирается до момента прибытия ($n-1$)-ого поезда на ($j+1$)-ю станцию и, следовательно, величина $F_{c(j+1)}[n-1]$ не известна. Так как задержки на станции последовательно движущихся поездов определяются величиной

пассажиропотока и, как правило, статистически зависимы, разработан адаптивный экстраполятор величин возмущений [4-7].

Экстраполятор возмущений

Экстраполяторы используют многочлены Чебышева, ортогональные на множестве равноотстоящих точек. Коэффициенты определяются по методу наименьших квадратов [8-10]. Порядок экстраполятора многочленов степени L и число точек $(M+1)$, используемых для прогноза, изменяется в процессе работы в зависимости от прогнозируемой случайной функции [10]. Для выбора одного из экстраполяторов, который будет использован для прогнозов в момент времени, выбирается тот, который, обеспечивает минимум суммы модулей погрешности за последние M тактов, делённых на M .

Функционирование экстраполятора при единичных возмущениях рассмотрено в [11], где показано, что длительность переходного процесса в работе экстраполятора, т.е. появление ненулевых значений прогноза при отсутствии возмущений будет иметь место для $(M + 1)$ -го поезда, следующего за задержанным. Следовательно, необходимо создать алгоритм, детектирующий единичные возмущения. Такой алгоритм реализован путем обнуления результата прогноза при наличии заданного числа последовательных нулевых задержек поездов после единичной задержки. Далее новое значение прогноза формируется в соответствии со стандартным алгоритмом.

Принципы построения и автоматической системы расчёта регулировочных характеристик

Для получения зависимости $T_{и0j}^{min}[n]$ допустимого минимального интервала по отправлению от времени хода $(n-1)$ -ого и n -ого поездов с j -ой станции при известной длительности стоянки $(n-1)$ -ого поезда на $(j+1)$ -ой станции (см. (2)), разработана автоматическая система, в которой на базе имитационного моделирования движения двух поездов по перегону с заданными параметрами (длина, план, профиль пути) и видом подвижного состава, эксплуатируемого на данной линии строится в табличной форме функция, определяемая в формуле (2). Учитывая линейность зависимости $T_{и0j}^{min}[n]$ от $T_{c(j+1)}^y[n - 1]$,

$$T_{\text{И}0j}^{\text{min}}[n] = \varphi_1(T_{xj}^y[n], T_{xj}^y[n-1], T_{c(j+1)}^y[n-1]). \quad (3)$$

Регулировочная характеристика строится для одного фиксированного значения $T_{c(j+1)}^y[n-1]$. В процессе функционирования алгоритма централизованного управления длительность стоянки вычисляется как сумма плановой длительности стоянки и прогнозируемой задержки. Так как минимальный интервал по отправлению линейно зависит от $T_{c(j+1)}^y[n-1]$, то величина $T_{\text{И}0j}^{\text{min}}[n]$ в реальном времени просто вычисляется [7]. Автоматическая система построения регулировочных характеристик входит в состав централизованной системы управления [12].

Таким образом, алгоритм парирования компенсируемых возмущений учитывает данные, получаемые на выходе интеллектуального экстраполятора возмущений и данные регулировочных характеристик.

Заключение

Для централизованной интеллектуальной системы управления движением поездов разработан алгоритм, позволяющий парировать компенсируемые возмущения, учитывающий взаимное расположение поездов и прогноз возмущений. Использование данного алгоритма повышает безопасность движения за счёт уменьшения вероятности опасного сближения поездов, улучшает показатели качества управления за счёт уменьшения рассогласования планового и исполненного графиков движения.

Литература:

1. Балакина Е.П., Ерофеев Е.В., Щеглов М.И. Автоматизированная система организации движения поездов с учетом экономии энергии на линиях метрополитена после сбоев // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 47-50.
2. Баранов Л.А., Козлов В.П. Управление линией метрополитена во время сбоя движения // Вестник ВНИИЖТа. – 1992. – № 5. – С. 29-31.
3. 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.

4. Баранов Л.А., Головичер Я.М., Ерофеев Е.В., Максимов В.М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.

5. Loginova L., Baranov L., Balakina E., Vorobiev P. Automatic Train Control Algorithms with Regulation Restrictions Adaptive to System State Changes // International Journal of Engineering Research & Science. – 2016. – Vol. 2, Issue 4. – P. 85-96.

6. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Воробьева Л.Н. Связь ограничений на управление с состоянием системы в централизованных системах автоведения поездов / Сборник тезисов докладов третьей международной конференции «Системы безопасности на транспорте». – Чехия, Пшибрам, 2007.

7. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Воробьева Л.Н. Алгоритмы для поездов метрополитена // Мир транспорта. – 2007. – Т. 5, № 2(18). – С. 104-113.

8. Баранов Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.

9. Баранов Л.А., Балакина Е.П. Прогнозирование случайных процессов на основе ортогональных полиномов на множестве равноотстоящих точек // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 39-46.

10. Баранов Л.А. Адаптивный экстраполятор нестационарных случайных процессов // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 22-24.

11. Баранов Л.А., Анохин А.С., Жеребятин И.А., Чжан Юнцян. Прогноз случайных процессов при наличии единичных возмущений в интеллектуальных транспортных системах // Автоматика на транспорте. – 2023. – № 3, Т. 9. – С. 239-246.

12. Баранов Л.А., Логинова Л.Н., Ермакова А.Е., Чжан Юнцян. Система автоматического построения регулировочных характеристик перегонов для централизованных интеллектуальных систем управления движением поездов // Автоматика на транспорте. – 2024. – № 3. – С. 246-252.
