

## *Интеллектуальные системы управления*

УДК 629.4.053.3:625.42

**Баранов Л. А., д-р техн. наук**

Кафедра «Управление и защита информации»,  
Московский государственный университет путей сообщения  
Императора Николая II

### **ОГРАНИЧЕНИЯ НА УПРАВЛЕНИЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Рассматриваются ограничения на управление в централизованных автоматизированных системах управления движением поездов метрополитена. Показана зависимость ограничений по системам обеспечения безопасности движения и системам энергоснабжения от состояния автоматизированной системы планирования, а также временная и регулировочная характеристики, на базе которых вычисляются ограничения на управление по системе обеспечения безопасности движения в установившихся и переходных режимах работы линии. Выявлена необходимость прогнозирования в реальном времени отклонения фактической длительности стоянки поезда на станции от плановой в условиях интенсивного движения. Выполнен анализ ограничений на управление по системам энергоснабжения с учетом их зависимости от токов уставок защит выпрямительных агрегатов и фидеров постоянного тока тяговых подстанций. Отмечено влияние этих ограничений на выбор режимов управления поездом и расход энергии на тягу поездов. Обосновывается необходимость учета зависимости ограничений от состояния автоматизированной системы планирования при планировании движения поездов.

ограничения на управление; системы обеспечения безопасности движения; состояние системы; централизованные автоматизированные системы управления движением поездов; системы энергоснабжения; энергоэффективное управление

### **Введение**

Эффективность и безопасность работы метрополитена непосредственно связана с функционированием централизованных автоматизированных систем управления движением поездов [1–3]. Эти системы позволяют увеличить пропускную способность за счет парирования возмущений и точного выполнения заданного графика движения; усилить безопасность движения

за счет снижения вероятности опасного сближения поездов при точном выполнении ими заданного времени хода по перегонам и длительности стоянок; освободить машиниста от выбора режимов управления, что дает ему возможность сосредоточиться на задачах обеспечения безопасности; уменьшить энергозатраты на тягу поездов за счет выбора энергооптимальных режимов ведения поезда; повысить комфорт пассажиров за счет точного выполнения планового графика движения.

Автоматизация процессов планирования движения связана с созданием планового графика, согласованного с графиком оборота составов, учитывающего пассажиропотоки и особенности линий, и является необходимым условием успешной работы метрополитена. Централизованная система автоматизированного управления движением поездов относится к классу иерархических многомерных систем, в которых ограничение на управление и фазовые координаты зависят от состояния системы. Аналогичные ограничения имеют место при составлении графика движения [4–6].

Целью данной статьи является анализ ограничений на управление с учетом их зависимости от состояния системы.

## 1 Ограничения по системам обеспечения безопасности движения

Требуемые размеры движения поездов на линии метрополитена, определяемые пассажиропотоком, ограничиваются допустимым минимальным интервалом попутного следования поездов ( $T_{\text{min}}$ ), который выбирается как максимальная величина из допустимых интервалов по системам обеспечения безопасности движения, длительности оборота состава на конечных станциях, по системам энергоснабжения.

Допустимый минимальный интервал по системам обеспечения безопасности движения определяется типом системы, эксплуатируемой на линии, длительностью стоянок поездов, выбранным режимом ведения поезда (либо реализуемым алгоритмом регулятора времени хода и прицельного торможения поездного устройства системы автоведения), диапазоном задаваемого времени хода по перегонам. Паспортные данные системы обеспечения безопасности движения, определяющие реализуемую парность движения (величина, обратно пропорциональная минимальному интервалу движения), являются малоинформативной характеристикой. Она рассчитывается для единственной зависимости  $V(S)$ , где  $V$  – скорость движения поезда по перегону,  $S$  – пройденный путь от станции, при фиксированной длительности стоянки. В то же время процесс управления движением требует изменения длительности стоянки, времени хода поездов по перегонам, выбора в общем случае для каждого поезда энергоэффективного способа управления тя-

гой и торможением, а следовательно, изменения зависимости  $V(S)$ . Поэтому определение минимального интервала попутного следования поездов необходимо рассчитывать с учетом временных и регулировочной характеристик перегонов [7].

Минимальный интервал попутного следования  $T_{\text{imin}}$  по  $j$ -му перегону при одинаковом времени хода впереди идущего  $n$ -го поезда и идущего за ними  $(n+1)$ -го поезда при известной длительности стоянки  $T_{c(j+1)}[n]$   $n$ -го поезда на следующей  $(j+1)$ -й станции определяется первой временной характеристикой [4]:

$$T_{\text{imin}j}[n] = f\{T_{xj}, T_{c(j+1)}[n]\}, \quad (1)$$

где  $T_{xy}$  – заданное системой управления (либо расписанием) время хода поездов по  $j$ -му перегону.

Можно показать, что  $T_{\text{imin}j}[n]$  линейно зависит от  $T_{c(j+1)}[n]$ . Тогда

$$T_{\text{imin}j}[n] = f\{T_{xj}, T_{c(j+1)}[n]\}. \quad (2)$$

Минимальный интервал попутного следования поездов по линии метрополитена

$$T_{\text{imin}} = \max_j T_{\text{imin}j}, \quad (3)$$

где  $j = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  – число перегонов.

Рассчитанная по первой временной характеристики величина  $T_{\text{imin}}$  является оценкой реализуемой пропускной способности линии для параллельного графика движения. В переходных режимах при изменении парности движения параллельность планового графика нарушается. Кроме того, для компенсации возмущений (задержка поездов пассажирами на станциях, изменение напряжения внешнего энергоснабжения и т. д.) требуются допустимые изменения длительности стоянок и времени хода поездов. Минимальный интервал попутного следования поездов по  $j$ -му перегону при различном времени хода впереди идущего  $n$ -го поезда и сзади идущего  $(n+1)$ -го поезда при известной длительности стоянки на следующей  $(j+1)$ -й станции  $n$ -го поезда определяется регулировочной характеристикой [4]:

$$T_{\text{imin}j}[n+1] = \varphi\{T_{xj}[n], T_{xj}[n+1], T_{cj}[n]\}. \quad (4)$$

Как и при описании первой временной характеристики, выражение (4) можно представить в виде

$$T_{\text{imin}j}[n+1] = \varphi\{T_{xj}[n], T_{xj}[n+1]\} + T_{cj}[n]. \quad (5)$$

Учитывая, что минимальный интервал попутного следования по  $j$ -му перегону является ограничением при принятии решения об отправлении  $(n+1)$ -го поезда с  $j$ -й станции, можно утверждать, что:

- ограничение на управление линий зависит от длительности стоянки впереди идущего поезда на следующей станции;

- ограничение на управление зависит от величины возмущений  $\Delta T_{c(j+1)}[n]$  – изменения длительности стоянки  $j$ -го поезда на  $(j + 1)$ -й станции из-за задержки поезда пассажирами;

- вычисление величины ограничений на управление – минимального интервала попутного следования по  $j$ -му перегону – должно производиться в реальном времени в условиях неопределенности, – это объясняется тем, что при интенсивном движении осуществляется отправление  $(n + 1)$ -го поезда с  $j$ -й станции, следовательно, при известной из планового графика величине  $T_{c(j+1)}[n]$  остается неизвестной величина  $\Delta T_{c(j+1)}[n]$ ;

- для расчета ограничений на управление в реальном времени необходимо наличие модели стоянки, позволяющей прогнозировать величину  $\Delta T_{c(j+1)}[n]$  по известной предыстории процесса с учетом инерционности процесса изменения пассажиропотока, разработанная автором модель стоянки позволяет решить указанную проблему.

Для иллюстрации изложенного рассмотрим следующий пример. Управление линией осуществляется в соответствии с графическим алгоритмом [4, 8], при котором рассогласование между плановыми и реальными моментами прибытия и отправления поездов преобразуется в изменение длительности стоянок и времени хода по перегонам для каждого поезда. В соответствии с этим алгоритмом управления для каждого поезда определяется такой интервал по отправлению, чтобы при рассчитанном времени хода реализовать движение без торможения по сигналам систем обеспечения безопасности движения. В частности, если  $(n + 1)$ -й поезд задержан на станции, то для компенсации возмущений необходимо при наличии ресурса нагона сократить время хода  $(n + 1)$ -го поезда. В этих условиях в соответствии с регулировочной характеристикой для движения по зеленым сигналам требуется увеличение  $T_{\text{imin}j}[n + 1]$  – допустимого минимального интервала движения по  $j$ -му перегону. Отсюда следует, что для компенсации возмущений и для работы линии в переходных режимах необходимо выбирать минимальный интервал попутного следования поездов, превышающий  $T_{\text{imin}}$ , рассчитанный для параллельного графика. Планирование движения при полном использовании пропускной способности, рассчитанной для параллельного графика, приведет к невозможности выполнения этого графика движения и дополнительному расходу электроэнергии из-за остановок поездов по сигналам систем обеспечения безопасности движения. Таким образом, реализуемая парность движения должна определяться с учетом допустимых возмущений и переходных режимов работы линии.

Временные и регулировочная характеристики, полученные методами имитационного моделирования [7], должны быть паспортными данными перегона. Основой для проведения имитационных экспериментов является модель, в которой отражены все особенности рассматриваемой линии (план и профиль пути; длины блок-участков; скоростные ограничения; алгоритмы работы системы обеспечения безопасности движения; способы оборота составов; характеристики подвижного состава, курсирующего на линии; способы управления временем хода и прицельным торможением поезда; схема и характеристики системы энергоснабжения) [9].

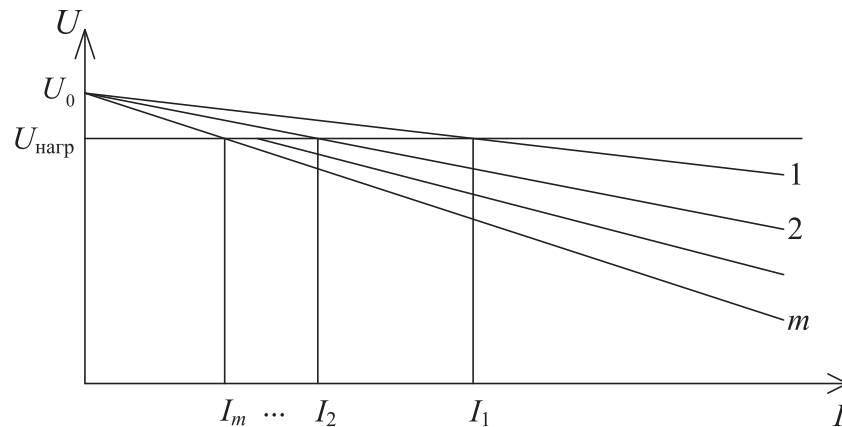
## 2 Ограничения по системе энергоснабжения

Минимальный интервал попутного следования поездов по системам энергоснабжения определяется двумя факторами: мощностью тяговой подстанции и уставками защит фидеров постоянного тока и выпрямительных агрегатов. Выбор количества выпрямительных агрегатов на подстанции с учетом обеспечения надежности ее функционирования, особенно при децентрализованном энергоснабжении, обычно не лимитирует допустимый минимальный интервал попутного следования поездов. Хотя могут быть отдельные случаи, требующие либо усиления, либо строительства дополнительной тяговой подстанции. Ограничения при наличии длинных перегонов на допустимый интервал попутного следования определяются током уставки защит, который рассчитывается из условий удаленного короткого замыкания. В ряде случаев ток уставки фидеров, питающий контактный рельс, становится соизмеримым с тяговыми токами, что приводит к отключениям питания, и, следовательно, к сбоям движения. Защитное отключение выпрямительных агрегатов в условиях интенсивного движения связано с постоянно встречающимся разбросом их внешних характеристик и величин уставок защиты.

Пусть на тяговой подстанции имеется  $m$  выпрямительных агрегатов. Даже при условии однотипности агрегатов всегда имеет место естественный разброс их параметров. На рис. 1 показаны внешние характеристики агрегатов, напряжение холостого хода которых примем равным  $U_0$ , зависимость напряжения на выходе агрегата от его нагрузки в рабочем диапазоне будем считать линейной. Пронумеруем  $m$  агрегатов так, чтобы у первого агрегата было самое маленькое внутреннее сопротивление  $r_0$ , у второго – больше, чем у первого, у третьего – больше, чем у второго, и т. д. Обозначим внутренние сопротивления  $i$ -го агрегата  $r_i$ . Можно записать следующее соотношение:

$$r_i = (1 + \beta_i)r_0, \beta_i \geq 0, \beta_1 = 0; \beta_2 > \beta_1; \beta_3 > \beta_2, \dots,$$

где величина  $\beta_i$  определяет отличие внутренних сопротивлений агрегатов.



**Рис. 1.** Распределение тока нагрузки тяговой подстанции между параллельно работающими выпрямительными агрегатами

Пусть  $I_{\text{нагр}}$  – ток тяговой подстанции, равный сумме токов  $I_i$  выпрямительных агрегатов:

$$I_{\text{нагр}} = \sum_{i=1}^m I_i. \quad (6)$$

При напряжении на шинах постоянного тока  $U_{\text{нагр}}$  в силу имеющегося разброса внешних характеристик агрегатов их токи  $I_i$  не равны (см. рис. 1).

Ток  $i$ -го агрегата

$$I_i = \frac{U_0 - U_{\text{нагр}}}{(1 + \beta_i)r_0}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получаем:

$$I_{\text{нагр}} = (U_0 - U_{\text{нагр}}) \sum_{i=1}^m \frac{1}{r_i}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует, что

$$I_i = \frac{1}{(1 + \beta_i) \sum_{l=1}^m (1 + \beta_l)} I_{\text{нагр}}. \quad (9)$$

Тогда разность токов  $i$ -го и  $j$ -го агрегатов при  $j > i$  имеет вид

$$\Delta I_{ij} = \frac{\beta_j - \beta_i}{(1 + \beta_i)(1 + \beta_j) \sum_{l=1}^m (1 + \beta_l)} I_{\text{нагр}}. \quad (10)$$

Максимум разности токов соответствует  $i = 1; j = m$ :

$$\Delta I_{\text{max}} = \Delta I_{1m} = \frac{\beta_m}{(1 + \beta_m) \sum_{l=1}^m (1 + \beta_l)} I_{\text{нагр}}. \quad (11)$$

Относительная максимальная разность токов определяется как

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta I_{1m}}{I_{\text{нагр}}} = m \frac{\beta_m}{(1 + \beta_m) \sum_{l=1}^m (1 + \beta_l)}. \quad (12)$$

Так, при  $k = 5$ ;  $\beta_1 = 0$ ;  $\beta_2 = 0,01$ ;  $\beta_3 = 0,02$ ;  $\beta_4 = 0,04$ ;  $\beta_5 = 0,05$   $\delta_{\max} \approx 4,88\%$ .

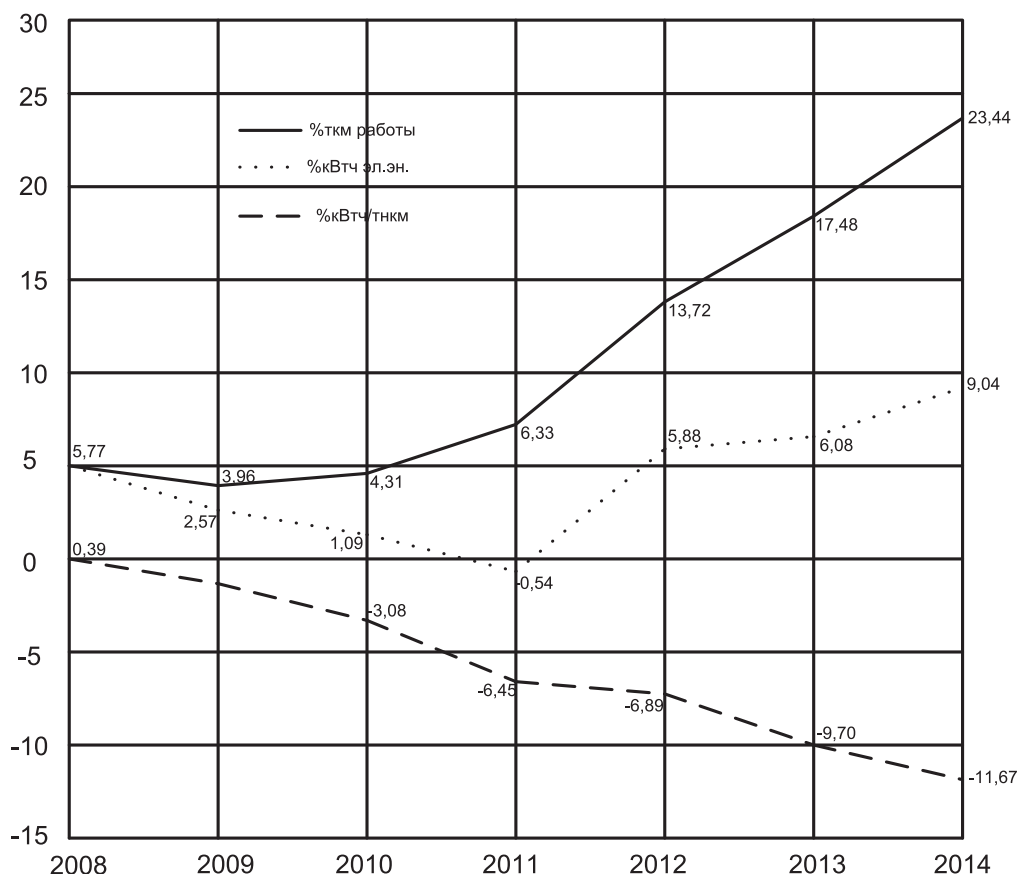
Для приближенных расчетов при  $\beta_m \ll 1$ , как следует из (10), величину  $\delta_{\max}$  можно оценить сверху:  $\delta_{\max} = 100 \cdot \beta_m, \%$ .

Условие неравномерности загрузки параллельно работающих выпрямительных агрегатов и естественные погрешности в задании уставок токовой защиты необходимо учитывать при расчетах максимально допустимой «парности» движения, по системам энергоснабжения.

Проблемы с ограничением по системе энергоснабжения обозначились с появлением подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями, мощность которых значительно превышает мощность эксплуатировавшихся тяговых двигателей постоянного тока. Согласование режимов ведения поездов с параметрами системы энергоснабжения становится особенно актуальной задачей в условиях, когда в час «пик» на длинных перегонах используются дополнительные включения тяги для реализации нагона с целью компенсации имеющихся возмущений. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Задача выбора оптимального управления поездом по критерию минимума расхода энергии при заданном времени хода по перегону решена в работах, выполненных в МГУПС (МИИТ), как для поездов без рекуперативного тормоза, так и с использованием режима рекуперации [4, 10, 11]. На базе этих работ, с помощью современных средств вычислительной техники, создан программный комплекс «Автоматизированная система тяговых расчетов», позволяющий выбирать последовательность режимов ведения поезда по перегону линии метрополитена при заданном времени хода и минимуме расхода энергии. При условии решения этой задачи дополнительно решается вторая задача оптимального распределения в соответствии с критерием минимума расхода энергии времени хода по линии на время хода по перегонам.

Итоговый анализ (рис. 2) показывает, что ежегодный рост тонно-километровой поездной работы в Московском метрополитене составляет от 5% в 2008 г. до 23% в 2014 г. по отношению к 2007 г. При этом расход электроэнергии растет значительно медленнее, что объясняется эффективностью мер по минимизации расхода электроэнергии. Так, например, если в 2007 г. процент расхода электроэнергии на тягу был близок к величине тонно-километровой работы, то в 2009, 2010 и 2011 гг. рост расхода электроэнергии на тягу прекратился. Поскольку в 2012, 2013 и 2014 гг. тонно-километровая работа возросла на 13,72, 14,48 и 23,44% соответственно, расход



**Рис. 2.** Увеличение по отношению к 2007 г. тонно-километров работы, расхода и удельного расхода электроэнергии

электроэнергии тоже вырос, но значительно меньше, всего на 5,88, 6,08 и 9,04% соответственно.

Важным показателем эффекта от мероприятий по минимизации расхода электроэнергии (в том числе от внедрения режима рекуперации) является снижение удельного расхода электроэнергии (кВтч/ткм). Этот показатель ежегодно снижается и уменьшился к 2014 г. на 11,67%.

Вместе с тем ограничение на управление по величине уставки тока фидеров тяговых подстанций требует изменения режимов ведения поездов с целью уменьшения токов нагрузки. Доказано, что энергоэффективные режимы требуют разгона с максимально допустимым ускорением. На современном подвижном составе это соответствует разгону на 4-й позиции контроллера, что на ряде перегонов в часы «пик» может привести к отключению фидеров подстанции. Разгон на 2-й позиции при условии выполнения заданного времени хода поезда по перегону удовлетворяет ограничениям, однако в этом случае расход энергии на тягу поезда для одной линии Московского метрополитена увеличивается до 7%. Найден компромиссный вариант управления – начало разгона до определенного значения тока осуществляется на 4-й позиции, после чего переходят на вторую позицию. Дополнительный рас-



ход энергии на той же линии метрополитена также отмечается и составляет 1–1,5 %.

Изложенное показывает, что ограничение на управление по системам энергоснабжения требует построения алгоритмов регуляторов времени хода, реализуемых на поездных устройствах системы автоматизированного управления движением, с адаптивными законами управления, изменяющимися в зависимости от длин перегонов и размеров движения.

При планировании движения по линии необходимо проводить проверку реализуемости планового графика движения по условию выполнения ограничений по системе энергоснабжения. Анализу подлежат временной отрезок, соответствующий максимальным размерам движения, с учетом дополнительных подключений тяги поездов для компенсации возмущений.

## Заключение

Ограничения по системам обеспечения безопасности движения должны вычисляться в установившихся и переходных режимах работы линии на базе временных и регулировочных характеристик перегонов. Для компенсации возмущений при планировании работы линии должны выделяться дополнительные ресурсы (увеличение по сравнению с минимальным временем хода по перегону, увеличение по сравнению с минимальным интервалом попутного следования поездов). Отсутствие соответствующих ресурсов может привести к перегруженности планового графика движения, значительному перерасходу энергии на тягу, ухудшению качества перевозок пассажиров из-за большого числа остановок и подтормаживаний поезда в тоннелях. Величины рекомендуемых дополнительных ресурсов вычисляются на имитационных моделях линии.

Вычисление допустимого интервала по отправлению при интенсивном движении осуществляется в условиях неопределенности, так как впереди идущий поезд еще не прибыл на следующую станцию и отклонение длительности его стоянки от плановой неизвестно. Решение этой проблемы достигается построением модели стоянки, позволяющей прогнозировать в реальном времени искомую величину на основе предыстории процесса.

Ограничения по системам энергоснабжения должны вычисляться в период максимальных размеров движения с учетом дополнительных подключений тяги для компенсации возмущений.

Алгоритмы управления регуляторов времени хода должны быть адаптивными для возможности выбора режима движения с учетом длины перегонов и уставок защит на тяговых подстанциях.

Анализ рассматриваемых ограничений показывает необходимость комплексного решения задач планирования и управления движением в метропо-

литене с учетом функционирования всех служб, обеспечивающих движение поездов. Современные средства вычислительной техники позволяют создать многофункциональную модель с дружественным интерфейсом, на которой после проведения имитационных экспериментов можно получать реальные ограничения на управление, зависящие от состояния системы. В настоящее время в МГУПС (МИИТ) накоплен значительный опыт создания имитационных моделей линий метрополитенов. Интегрирование этих моделей, создание новых моделей с открытой архитектурой является актуальной задачей, реализация которой создаст условия совершенствования автоматизированного планирования и управления движением поездов в метрополитенах.

### Библиографический список

1. Лаврик В. В. Электрическая централизация стрелок и сигналов метрополитенов / В. В. Лаврик. – М. : Транспорт, 1984. – 239 с.
2. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. – М. : Транспорт, 1986. – 351 с.
3. Никитин А. Б. Реализация комплексной автоматизированной системы диспетчерского управления линией метрополитена / А. Б. Никитин, М. Ю. Королев // Наука и транспорт: метрополитены будущего. – 2010. – С. 39–41.
4. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов ; под ред. Л. А. Баранова. – М. : Транспорт, 1990. – 272 с.
5. Jensen Tommy O. Veg on metroen / Tommy O. Jensen // Jernbanen. – 2002. – N 5. – Pp. 32–41.
6. Энергоэффективность высокоскоростного движения // Железные дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 61–65.
7. Баранов Л. А. Алгоритмы централизованного управления для поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Мир транспорта. – 2007. – № 2. – С. 104–113.
8. Баранов Л. А. Метрополитен Мехико : алгоритмы движения / Л. А. Баранов, П. Ю. Воробьев // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 106–113.
9. Баранов Л. А. Перспективы использования многофункциональных моделей / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С. 70–74.
10. Баранов Л. А. Энергооптимальное управление движением поезда с рекуперативным тормозом при учете ограничений на фазовую координату / Л. А. Баранов, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 4. – С. 107–114.
11. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов: учеб. пособие / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь ; под ред. Л. А. Баранова. – М. : МИИТ, 2011. – 164 с.

*Leonid A. Baranov*

«Controls and information security» department,  
Moscow state university of railway engineering

### **Limitations of control in centralized automated traffic control systems of subway trains**

The article reviews the limitations of control in centralized automated traffic control systems of subway trains. It demonstrates the dependence of limitations of traffic safety systems and power supply systems on the state of the system. The article provides a time and regulating characteristics, based on which the limitations of control for traffic safety system are calculated by the steady-state and transient mode of the line. The article also shows the necessity of real-time prediction of deviation of the actual duration of the train lay-over at the station from the planned one under the conditions of heavy traffic. There is also the analysis of the control limitations of the energy supply systems considering their dependence on the setting currents of protection rectifier units and DC feeders of traction substations. The article presents effect of these limitations on the choice of train control modes and the energy consumption for train traction. The article also justifies the necessity of taking into account the dependence of limitations on the system conditions within the planning of train traffic.

limitations of control, traffic safety system, state of the system, centralized automated train traffic control systems, energy supply systems, energy efficient management

#### **References**

1. Lavrik V.V. (1984). Electric interlocking of subway switches and signals [Elektricheskaya tsentralizatsiya strelok i signalov metropolitenov], Moscow, Transport, 239 p.
2. Makhmutov K.M. (1986). Subway train separation devices [Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na metropolitene], Moscow, Transport, 351 p.
3. Nikitin A.B., Korolev M. Yu. (2010). Implementation of complex automated dispatching control system for subway line [Realizatsiya kompleksnoy avtomatizirovannoy sistemy dispetcherskogo upravleniya liniyey metropolitena], Science and transport. Subway of the future (Nauka i transport. Metropoliteny budushchego), pp. 39–41.
4. Baranov L.A., Golovicher Ya.M., Erofeev E.V., Maksimov V.M. (1990). Microprocessor based systems of automatic train control for rolling stock [Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava], under the editorship of L.A. Baranov, Moscow, Transport, 272 p.
5. Jensen T.O. (2002). Beg on metroen, Jernbanen, N 5, pp. 32–41.
6. Energy efficiency of high-speed traffic [Energoeffektivnost' vysokoskorostnogo dvizheniya], Railways of the world (Zheleznnye dorogi mira) (2010), issue 12, pp. 61–65.

7. Baranov L.A., Balakina E.P., Vorob'eva L.N. (2007). Algorithms of centralized operation of subway trains [Algoritmy tsentralizovannogo upravleniya dlya poyezdov metropolitena], Transport world (Mir transporta), issue 2, pp. 104–113.
8. Baranov L.A., Vorob'ev P. Yu. (2012). Mexico City subway: motion algorithms [Metropoliten Mekhiko: algoritmy dvizheniya] / Transport world (Mir transporta), issue 4, pp.106–113.
9. Baranov L.A., Balakina E.P. (2012). Potential of using of multi-functional models [Perspektivy ispol'zovaniya mnogofunktsional'nykh modeley], Transport world (Mir transporta), issue 2, pp. 70–74.
10. Baranov L.A., Meleshin I.S., Chin' L.M. (2010). Energy efficient train operation with regenerative brake, considering limitations for phase coordinate [Energooptimal'noye upravleniye dvizheniyem poyezda s rekuperativnym tormozom pri uchote ogranicheniy na fazovuyu koordinatu], Transport Science and Technology (Nauka i tekhnika transporta), issue 4, pp. 107–114.
11. Baranov L.A., Erofeev E.V., Meleshin I.S., Chin' L.M. (2011). Optimization of train traffic management [Optimizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov], textbook, under the editorship of L.A. Baranov, Moscow, MIIT, 164 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным  
Поступила в редакцию 09.12.2015, принята к публикации 01.02.2016*

*БАРАНОВ Леонид Аврамович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II.  
e-mail: baranov.miit@gmail.com*

© Баранов Л. А., 2016