

Система автоматического управления скоростью движения, использующая эталонную модель поезда

// Automatic control system of train speed using reference train model //

Киселев М.Д., Пудовиков О.Е., д.т.н., доцент,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Применение систем автоматического управления (САУ) поездом обусловлено постоянно возрастающими массой и скоростью движения поездов, а также высокими требованиями безопасности движения на железнодорожном транспорте. Для обеспечения хороших показателей качества управления применяют различные подходы к созданию САУ.

*Одним из подходов является использование эталонной модели поезда внутри системы управления для выработки правильной стратегии управления подвижным составом и обеспечения требуемых показателей качества управления. **Ключевые слова:** система автоматического управления скоростью локомотива, показатели качества управления, продольные колебания в поезде, распределенная тяга, тяжеловесный грузовой поезд, эталонная модель поезда, запас устойчивости, устойчивость.*

The use of automatic control systems (ACS) of train is based on the continuing increasing weight and speed of trains, and also high safety requirements for railway transport.

To ensure good control quality are used different approaches to the creation of ACS. One approach is a use of a reference train model inside the ACS in order to find a proper strategy for the control of rolling stock and providing of required quality indicators.

Keywords: automatic control system of locomotive speed, quality control, longitudinal fluctuations in the train, distributed traction, heavy freight train, reference train model, stability margin, stability.

Наличие неблагоприятных факторов, таких как нерациональный способ формирования тяжеловесных длинно-составных поездов (например, наличие легковесных вагонов в головной части поезда), нарушение технологии управления тяговыми и тормозными средствами локомотивов и состава, ведет к нарушению условий оптимального взаимодействия подвижного состава и пути, результатом которого может стать сход состава с рельсов из-за выжимания вследствие недопустимых величин и времени действия продольных сжимающих сил или выдергивания внутрь кривой из-за превышения допустимых растягивающих сил [1].

Одним из способов повышения безопасности движения поездов и экономической эффективности транспорта является применение на подвижном составе средств автоматизации управления – систем автоведения поездов

САВП, состоящих из систем верхнего уровня (регулирования времени хода) и нижнего уровня (системы автоматического управления (САУ) скоростью движения). Применение средств автоматизации управления позволяет исключить влияние человеческого фактора на технологические процессы, связанные с управлением движением поезда, и, как следствие, повысить безопасность движения поездов. Для выработки концепции построения систем управления и разработки их структуры и алгоритмов необходимо провести детальное исследование влияния способов управления силами тяги и торможения при одиночной, кратной и распределенной тягах на взаимодействие подвижного состава и верхнего строения пути.

С целью выработки стратегии управления тягой и торможением для обеспечения безопасности движения поезда необходимо четкое представление

о процессах, происходящих в нем. Для этого выполнение расчетов осуществлено с использованием модели, представляющей поезд в виде системы твердых тел – цепочки экипажей, обладающих массой (вагоны и локомотивы), взаимодействующих друг с другом через нелинейные упруго-диссипативные связи с зазором. Каждая масса этой дискретной модели совершает движение под действием сил, передаваемых на нее от соседних экипажей через связи, а также под действием внешних сил. Использование такой системы позволяет учесть зазоры в механизмах поглощающих аппаратов и автосцепок, сильно влияющие на распространение возмущений вдоль состава поезда и величину возникающих сил. Дифференциальные уравнения движения каждого экипажа в указанном случае имеют вид [2]

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{(S_i - S_{i+1} + F_i)}{m_i}, & i = \overline{1, n}; S_{n+1} = 0 \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, & i = \overline{2, n} \\ \dot{x}_1 = v_1 = -\dot{q}_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где v_i – скорость центра масс экипажа;

S_i – усилие в i -м междувагонном соединении;

F_i – суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж;

m_i – масса i -го экипажа;

n – число экипажей в поезде;

q_i – деформация i -го междувагонного соединения;

\dot{q}_i – скорость деформации.

Качество процесса управления скоростью поезда характеризуется как традиционными показателями (ошибка управления в установившемся режиме, перерегулирование, длительность переходного процесса, крутизна переднего фронта, колебательность и т. д.), так и специфичными, определяемыми особенностями грузового поезда как объекта управления (величины

продольных динамических сил, возникающих в поезде при переходных режимах движения, а также суммы накопленных усталостных повреждений в упряжных приборах вагонов поезда [3]). Вместе с этим следует учитывать и медленно меняющиеся продольные силы, так называемые квазистатические, действующие на вагоны поезда во время его движения. Продольные квазистатические сжимающие силы, действующие на вагоны поезда, способны вызвать «выдавливание» вагонов из колеи, а растягивающие – «выдавливание» вагонов, если они расположены в кривом участке пути [4]. Критериями, позволяющими оценить влияние квазистатических сил, действующих в поезде, на безопасность движения, являются величина вертикальной реакции наружного рельса на колеса вагона от действия продольных растягивающих сил и коэффициент запаса устойчивости вагона от выжимания. Учет этих факторов позволяет создать рациональную структуру системы автоматического управления скоростью движения [5].

Существует множество подходов к созданию систем автоматического управления [6]. Высокого качества управления можно достичь, располагая максимальным количеством данных об объекте управления и о процессах, протекающих в нем. Наличие информации о продольных колебаниях, возникающих в поезде при переходных режимах движения, позволит реализовать рациональный способ взаимодействия между локомотивами, обеспечив достижение наилучшего с точки зрения принятой системы критериев качества управления.

В рамках эксперимента эту задачу решают установкой на автосцепки тензометрических датчиков, позволяющих регистрировать силы, действующие в них. Однако очевидно, что в регулярной эксплуатации такое решение неприменимо.

Одним из способов решения данной проблемы является использование эталонной модели поезда в САУ для моделирования процессов, происходящих в поезде. При этом вместо величин сил, полученных с датчиков, САУ оперирует значениями этих же величин, полученными в результате математического моделирования процессов, протекающих в поезде. Опираясь на эти данные, система управления организует взаимодействие между локомотивами таким образом, чтобы соблюсти требования

к качеству управления скоростью движения в соответствии с принятыми критериями.

Функциональная схема САУ скоростью с эталонной моделью поезда для ведущего локомотива в поезде с распределенной тягой представлена на рис. 1. За основу при разработке данной схемы принята САУ скоростью грузового электровоза [7].

Задатчик параметров поезда ЗПП формирует вектор параметров Π , содержащий информацию о взаимном расположении локомотивов и вагонов в составе поезда, типе и загрузке вагонов. На основании данной информации адаптер А вычисляет параметры блока ПУ1 и закона управления, реализуемого в блоке ПУ2. Подробно назначение и реализуемые в них алгоритмы рассмотрены в [7]. Также информация с адаптера А поступает на блок ПУ3, содержащий эталонную модель исполнительного устройства ИСУ, которым является тяговый электропривод

и объекта управления ОУ поезда. Необходимая для работы эталонной модели информация о параметрах пути (величины уклонов, радиусы и длины кривых участков пути) поступает из базы электронной карты системы безопасности локомотива.

Дополнительно в блок ПУ3 поступает информация о фактической скорости движения локомотивов. В результате работы эталонной модели формируется массив величин продольных сил $[F]$, действующих во всех сечениях поезда, который передается в блок ПУ4 корректировки скорости ведомого локомотива. Выходными сигналами блока ПУ4 являются величина заданной скорости v_{32} для ведомого локомотива (рис. 2), а также сигналы, позволяющие при необходимости скорректировать структуру и параметры блоков ПУ1 и ПУ2.

Корректировка заданного значения скорости ведомого локомотива позволяет предотвратить появление факторов, ведущих к выжиманию или

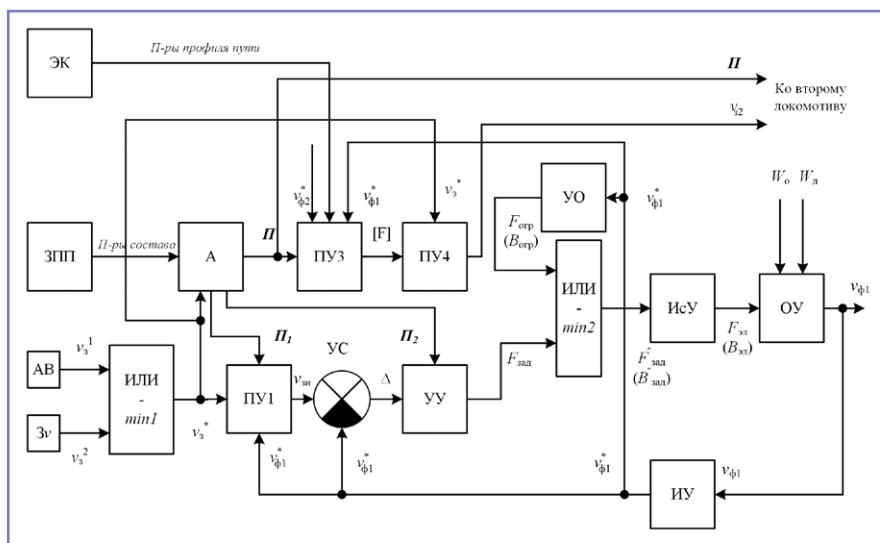


Рис. 1. Функциональная схема САУ ведущего локомотива

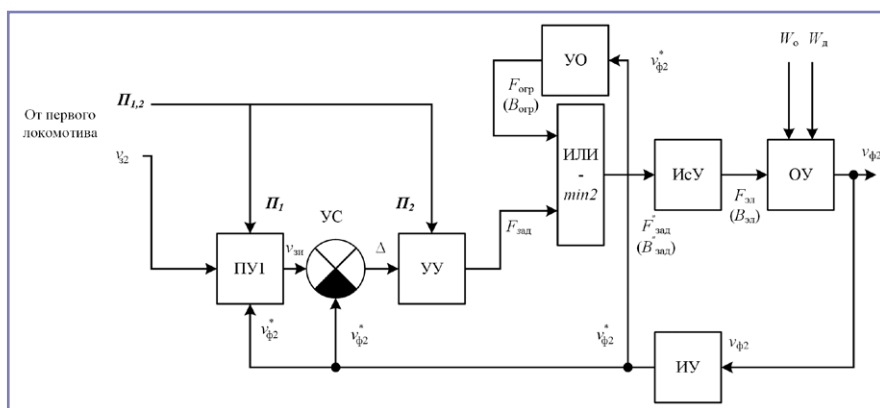


Рис. 2. Функциональная схема САУ скоростью ведомого локомотива

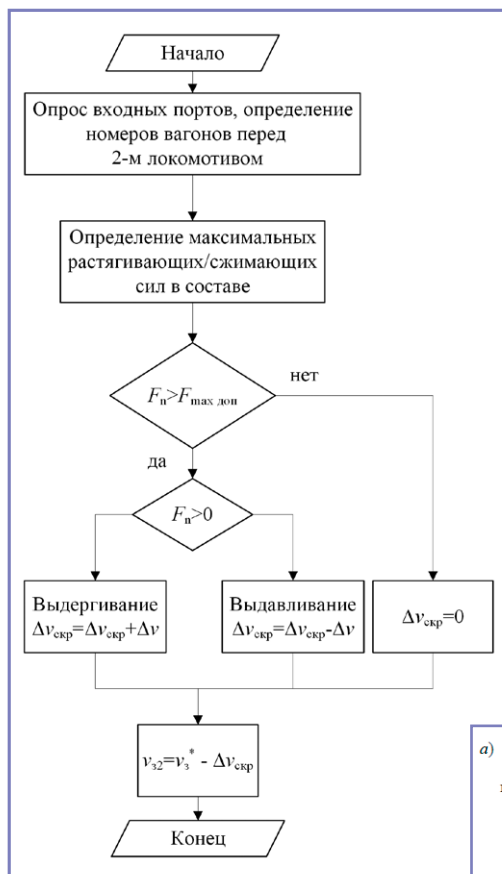


Рис. 3. Алгоритм работы блока ПУ4

выдергиванию вагонов из колеи. Алгоритм работы блока ПУ4 представлен на рис. 3.

Суть реализуемого в блоке ПУ4 алгоритма заключается в том, что он на основании информации о продольных силах, действующих в сечениях поезда, определяет их наибольшие величины и, если они превышают установленные допустимые значения [4], при которых возможно выдавливание/выдергивание вагона из колеи, производит вычисление величины корректировки заданной скорости второго локомотива $\Delta v_{скр}$ на величину Δv . Значение величины Δv и скорость ее изменения зависят от множества параметров, таких как масса вагона, сила в поглощающем аппарате, длительность действия этой силы [4]. Если сил, превышающих максимально допустимые, нет, то корректировка скорости не осуществляется.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования движения поезда, состоящего из 120 вагонов и сформированного по схеме ЛСЛС (Л – локомотив, С – состав) [8] для вариантов без использования эталонной модели в системе управления (рис. 4) и с использованием эталонной модели (рис. 5). Как

видно из графиков, благодаря использованию эталонной модели время протекания переходного процесса сократилось почти на 65 с, что является лучшим вариантом с точки зрения реализации энергооптимальной траектории движения поезда. Максимальная продольная динамическая сила в поезде, определенная в процессе моделирования, для варианта без эталонной модели составила 700 кН, а для варианта с использованием эталонной модели в САУ – 650 кН. Эти значения не превышают максимально допустимых по условиям прочности автосцепок значений продольных сил [5]. Время действия значительных по величине квазистатических сил, которые оказывают большое влияние на устойчивость вагона в ко-

лее, сократилось в среднем на 20%. Как видно из рис. 6, величина коэффициента запаса устойчивости вагонов стала выше почти в 1,5 раза в поезде с САУ с использованием эталонной модели. Величина накопленных усталостных повреждений автосцепок снизилась в 4 раза и составила для первого варианта САУ без эталонной модели $a_1 = 5,966 \cdot 10^{-5}$, с эталонной моделью – $a_2 = 1,487 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, применение в САУ скоростью движения поезда с локомотивами, распределенными по длине состава, эталонной модели для уточнения параметров управления локомотивами способствует снижению величины накопленных усталостных повреждений автосцепок, времени действия больших по величине квазистатических сил и увеличению коэффициента запаса устойчивости. Все это способствует снижению вероятности возникновения внезапных

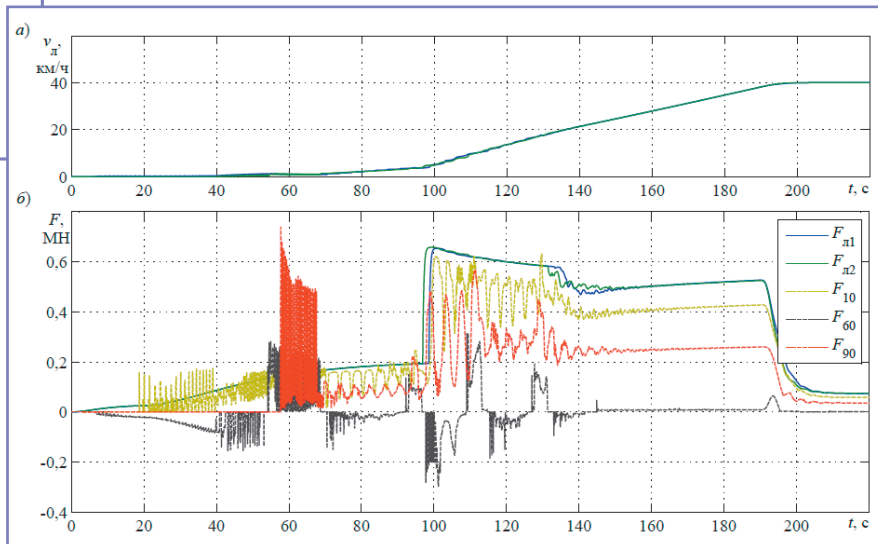


Рис. 4. Графики зависимостей продольных сил в поезде от времени без использования ЭМ в САУ

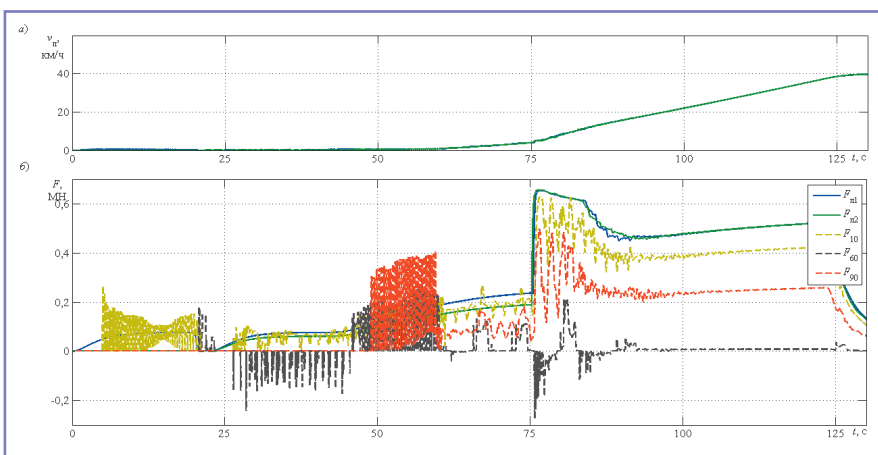


Рис. 5. Графики зависимостей продольных сил в поезде от времени с использованием ЭМ в САУ

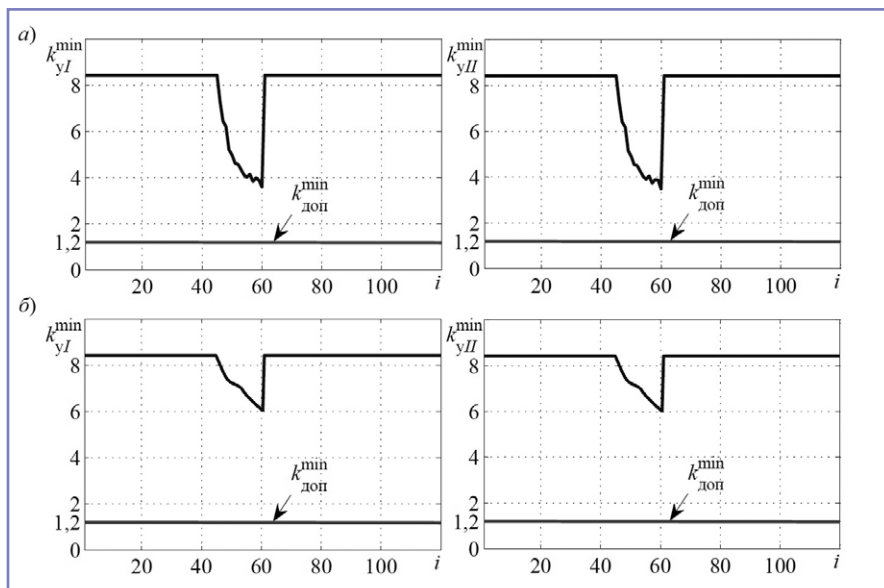


Рис. 6. Коэффициент запаса устойчивости вагонов от выжимания без использования ЭМ в САУ (а) и с использованием ЭМ (б)

и постепенных отказов, связанных с разрушением автосцепок, а также повышению безопасности движения поездов за счет существенного сокращения факторов, влияющих на устойчивость вагонов в колее.

Литература

1. Мугинштейн Л.А. Влияние продольных сил на опасность сходов порожних вагонов в поездах / Л.А. Мугинштейн, Ю.С. Ромен // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 3.
2. Расчёты и испытания тяжеловесных поездов / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин, Е.Л. Стамблер и др. Под ред. Е.П. Блохина. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
3. Критерии качества регулирования скорости / О.Е. Пудовиков, Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин. – М.: Мир транспорта, 2009. – № 4.
4. Динамика вагона: учебник для вузов железнодорожного транспорта. Изд. 2-е, перераб. и доп. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов,

- И.И. Чесноков. – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.
5. Киселев М.Д. Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой / М.Д. Киселев, О.Е. Пудовиков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 11.
 6. Савоськин А.Н. Автоматизация электроподвижного состава: учебник для вузов железнодорожного транспорта / А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, В.П. Феоктистов. Под ред. А.Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.
 7. Пудовиков О.Е. Управление длинносоставными тяжеловесными грузовыми поездами / О.Е. Пудовиков // Управление большими системами. – 2010. – № 29. – С. 214.
 8. Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса). – М.: Интекст, 1996. – 159 с.

Киселев Максим Дмитриевич

Родился в 1994 году. В 2015 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 2 года. Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» МГУПС (МИИТ). Имеет 2 печатные работы.

Пудовиков Олег Евгеньевич

Родился в 1974 году. В 1997 году окончил с отличием МИИТ по специальности «Локомотивы (электровозы и электропоезда)». Доктор технических наук, доцент. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения». В настоящее время является заведующим кафедрой «Электропоезда и локомотивы» МИИТ. Опыт работы – более 15 лет. Имеет более 60 научных трудов и 2 патента.

Kiselev Maksim

Was born in 1994. In 2015 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a specialty in «Movable equipment of the railway system». His work experience is 2 years. He is a post-graduate student at the MIIT department «Electric trains and locomotives». He has 2 publications.

Pudovikov Oleg

Was born in 1974. He graduated from the Moscow State Railway University (MIIT) with speciality of «Locomotives (electric locomotives and electric trains)» in 1997. He is a doctor of science. He defended a thesis titled «Automatic speed control system of freight trains with electric locomotives that allow smooth control of traction and brake forces». At present he works as a head of the department of «EMUs and locomotives» of the Moscow State Railway University (MIIT). He has got about 15 years work experience. He has more than 60 printed scientific works and 2 patents.



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ИМПЕРАТОРА НИКОЛАЯ II**

Лицензия № 2071 от 12.04.2016
Свидетельство о гос. аккредитации № 2041 от 23.06.2016



МИИТ – ведущий и крупнейший транспортный вуз России, осуществляющий непрерывную подготовку кадров в областях: железнодорожного транспорта и транспортного строительства, информатики и вычислительной техники, экономики и управления, юриспруденции и психологии, таможенного дела, управления инновациями, менеджмента, рекламы (по 102 специальностям и направлениям подготовки высшего образования и среднего профессионального образования).

В структуре университета:

Академии:

- Российская академия путей сообщения
- Российская открытая академия транспорта

Институты:

- Гуманитарный институт
- Институт международных транспортных коммуникаций
- Институт прикладных технологий
- Институт пути, строительства и сооружений
- Институт транспортной техники и систем управления
- Институт управления и информационных технологий
- Институт экономики и финансов
- Русско-немецкий институт
- Юридический институт
- Научно-исследовательский институт транспорта и транспортного строительства

Факультеты:

- Вечерний факультет
- Факультет довузовской подготовки
- Факультет повышения квалификации преподавателей
- Факультет подготовки научных сотрудников

Московский колледж железнодорожного транспорта,
Медицинский колледж, Правовой колледж, Гимназия

Адрес университета: г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Проезд: ст. метро «Новослободская», «Менделеевская», «Достоевская».

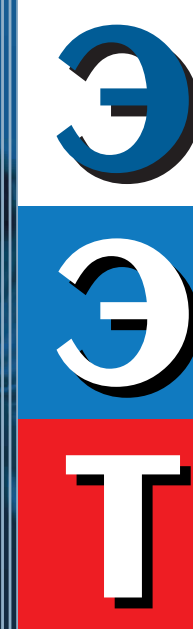
Приёмная комиссия: +7 (495) 684-24-10, pk_miit@mail.ru



Ректор университета,
президент Ассоциации
вузов транспорта,
д.т.н., профессор
Б.А.Лёвин



www.miit.ru



ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА

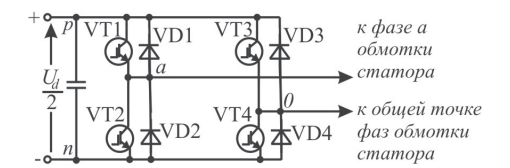
научно-технический журнал

№ 6
2016

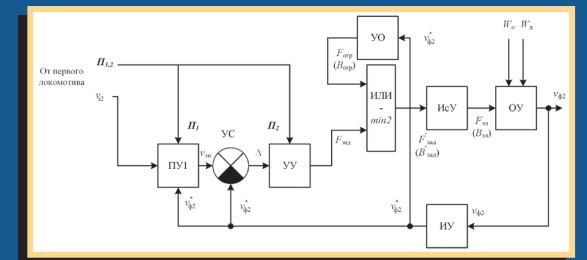
ISSN 1812-6782

В НОМЕРЕ:

**Определение установившейся
температуры полупроводников автономного
инвертора напряжения**



**Система автоматического управления
скоростью движения, использующая
эталонную модель поезда**



**Оптимизация энергетических характеристик
электропривода вспомогательных механизмов
тягового подвижного состава**

