

УДК 629.35.017

Результаты математического моделирования движения автопоезда с активным полуприцепом при выполнении стандартных маневров

Мушкарин Евгений Юрьевич^{1(*)} mushkarin@bmstu.ru
SPIN-код: 2432-2510

Стариков Александр Федорович² a.starikov@nami.ru

Малиновский Михаил Павлович^{2,3} ntbmadi@gmail.com

SPIN - код: 4513-8855

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

³ МАДИ, Москва, Россия

Аннотация. Авторами отмечена низкая эффективность системы динамической стабилизации путем индивидуального импульсного торможения колес для большегрузных автопоездов специального назначения. В качестве решения рассмотрены различные схемы управления автопоездом, включая базовый вариант, отдельно активизацию колес полуприцепа и поворот его колес, а также их синхронное использование. Проведено математическое моделирование криволинейного движения автопоезда для четырех схем управления при выполнении стандартизированных маневров вход в круг и переставка на сухом асфальте и укатанном снегу для проверки устойчивости. Проанализировано влияние конструктивных параметров автопоезда на критическую скорость выполнения маневра.

Ключевые слова: активный автопоезд, динамическая устойчивость движения, активизация колес полуприцепа, электромеханическая трансмиссия, система управления поворотом

Results of mathematical modeling of the movement of a road train with an active semi-trailer during standard maneuvers

Mushkarin Evgeny Yurievich^{1(*)} mushkarin@bmstu.ru
SPIN-code: 2432-2510

Starikov Alexander Fedorovich² a.starikov@nami.ru

Malinovsky Mikhail Pavlovich^{2,3} ntbmadi@gmail.com

SPIN - code: 4513-8855

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² FSUE "NAMI", Moscow, Russia

³ MADI, Moscow, Russia

Abstract. The authors noted the low efficiency of the dynamic stabilization system by means of individual pulse braking of wheels for special-purpose heavy-duty road trains. As a solution, various road train control schemes were considered, including the basic version, separate activation of the semitrailer wheels and turning of its wheels, as well as their synchronous use. Mathematical modeling of the curvilinear motion of the road train was carried out for

four control schemes when performing standardized maneuvers: entering a circle and rearranging on dry asphalt and compacted snow to check stability. The influence of the design parameters of the road train on the critical speed of maneuver execution was analyzed.

Keywords: *active road train, dynamic stability of movement, activation of semitrailer wheels, electromechanical transmission, steering control system*

Введение. С появлением в конце 1940-х гг. мощных ракетных систем автомобильным заводам и специальным конструкторским бюро поручили разрабатывать специальные машины повышенной грузоподъемности. Обычные двухзвенные автопоезда оказались плохо приспособлены к перевозке крупногабаритных грузов специального назначения ввиду недостатка тяговых свойств, проходимости, маневренности, управляемости и устойчивости [1]. Решением проблемы низких тягово-динамических свойств стала концепция активных автопоездов, разработанная Б.М. Фиттерманом. Проблеме устойчивости автопоездов посвятили свои труды Ш.М. Гохман, Я.Х. Закин, П.П. Ширяев, А.И. Аксенов, В.А. Павлов, Г.И. Тохтарь, Н.Е. Левин, Б.В. Кисуленко, Л.В. Величко, А.А. Асриянц, Г.И. Гладов, М.Л. Ровинзон, А.Б. Азбель, Ю.А. Самойленко, И.И. Алышев, В.В. Аюпов, Б.Н. Белоусов, А.А. Бердников, F. Vlk, D.J.M. Sampson и другие отечественные и зарубежные ученые.

Кроме индивидуального импульсного торможения колес, которое малоэффективно для большегрузных автопоездов, в качестве средств повышения устойчивости движения рассматривают воздействие на активную подвеску [2], систему управления поворотом (СУП) [3], тяговый электропривод (ТЭП) полуприцепа [4] и управляемое седельно-сцепное устройство [5]. Цель настоящей работы заключалась в исследовании раздельного и синхронного воздействия на ТЭП и СУП полуприцепа. В соответствии с этим были рассмотрены четыре схемы управления автопоездом:

I — базовый вариант (тягач с полным приводом и передней управляемой осью);

II — активный привод колес полуприцепа;

III — система управления поворотом колес полуприцепа;

IV — комплексное управление тяговым приводом и поворотом колес полуприцепа.

Материалы и методы. Для проведения математического моделирования криволинейного движения активного автопоезда использовалась комплексная модель, состоящая из усовершенствованных моделей тягача [6] и полуприцепа [7]. Задающим параметром является скорость поворота среднего приведенного колеса первой оси, целевым параметром — радиус кривизны коридора движения. В соответствии с ГОСТ 31507–2012, устанавливающим требования к испытаниям автотранспортных средств на управляемость и устойчивость, для двухзвенного автопоезда, состоящего из седельного тягача полной массой $m_t = 20000$ кг и полуприцепа полной массой $m_n = 25000$ кг, были смоделированы два маневра:

— вход в круг (радиусом $R = 35$ м);

— переставка (на длине $L = 16$ м).

В качестве оценочного параметра использовалась критическая скорость выполнения маневра $v_{кр}$, при которой начинала происходить потеря динамической устойчивости. Ограничениями, т. е. признаками потери устойчивости, являлись:

- скольжение осей (колес);
- отрыв колес от опорной поверхности (обнуление вертикальной реакции).

Моделирование выполнялось для двух типов дорожного покрытия, которые характеризовались коэффициентом сцепления φ и коэффициентом сопротивления качению f :

- сухой асфальт ($\varphi = 0,75$; $f = 0,02$);
- укатанный снег ($\varphi = 0,25$; $f = 0,04$).

Результаты. По итогам моделирования указанных маневров на обоих типах дорожного покрытия были составлены зависимости критической скорости $v_{кр}$ по условию потери устойчивости (заносу или опрокидыванию) от следующих наиболее значимых параметров:

- высота центра масс тягача $H_{цм.т}$, м;
- высота центра масс полуприцепа $H_{цм.п}$, м;
- расстояние от первой оси тягача до центра масс автопоезда $L_{цм.ап}$, м;
- расстояние от первой оси тягача до седельно-сцепного устройства L_{cy} , м;
- высота седельно-сцепного устройства H_{cy} , м;
- коэффициент сопротивления амортизаторов R_a (Н·с)/м.

Номинальные значения (nom) параметров, а также их отклонения в меньшую (min) и большую (max) сторону составляли: $H_{цм.т} = H_{цм.п} = 2 \pm 0,5$ м; $L_{цм.ап} = 7,692 \pm 0,5$ м; $L_{cy} = 3,11 \pm 0,5$ м; $H_{cy} = 1,8 \pm 0,5$ м; $R_a = 21700 \pm 10$ % (Н·с)/м. Боковой увод шин учитывался по линейной теории, коэффициент сопротивления уводу принимался $K_y = 200$ кН/рад. Зависимости критической скорости от перечисленных параметров приведены на рис. 1–4. При входе в круг $H_{цм.т}$ и R_a практически не влияют на $v_{кр}$, поэтому они на графиках не показаны.

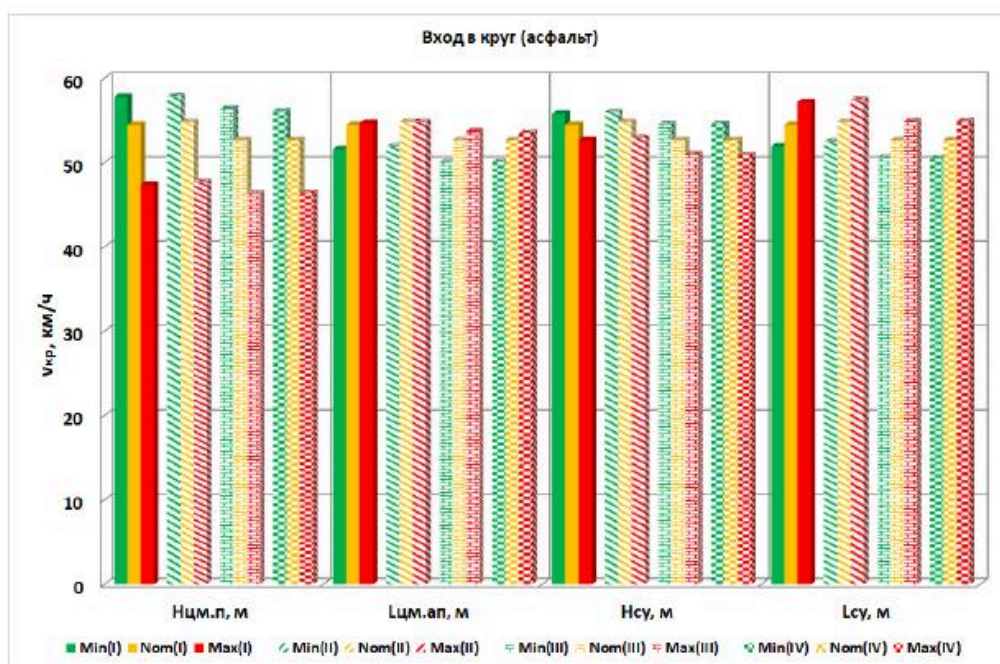


Рис. 1. Зависимость критической скорости от конструктивных параметров (вход в круг, асфальт)

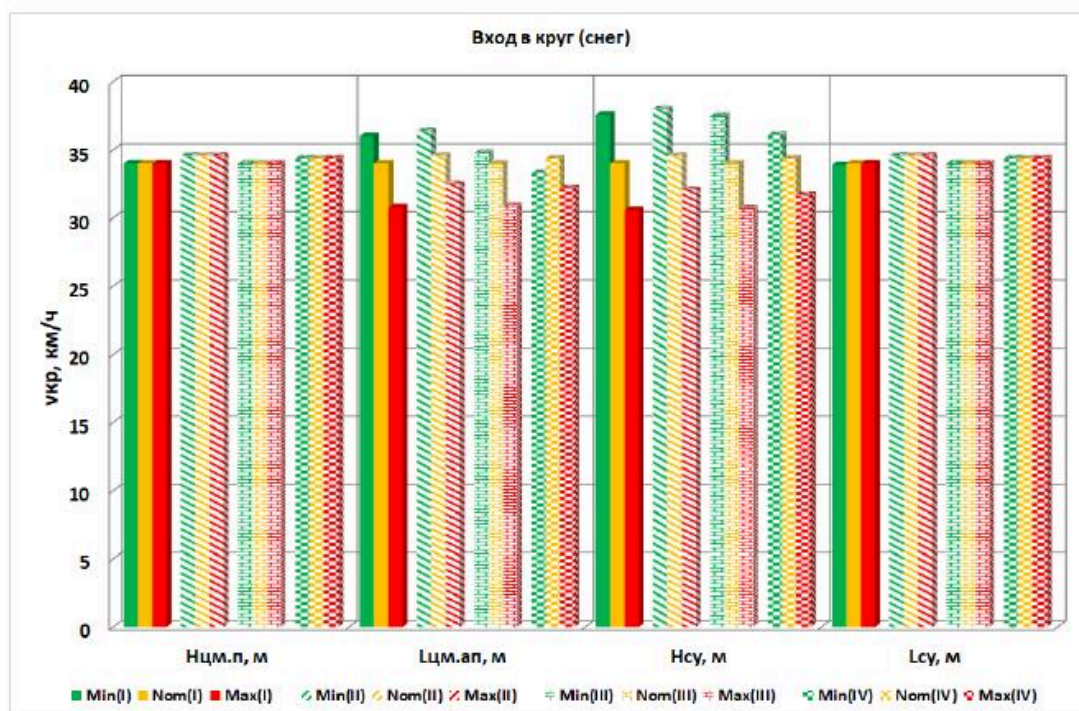


Рис. 2. Зависимость критической скорости от конструктивных параметров (вход в круг, снег)

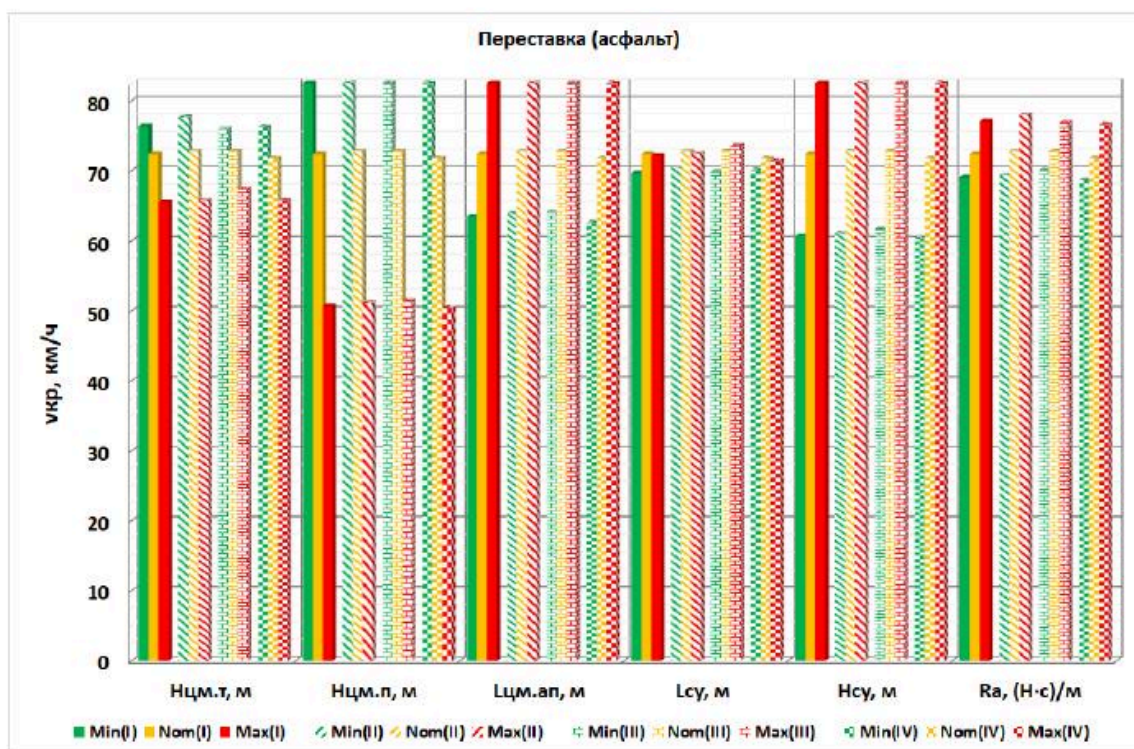


Рис. 3. Зависимость критической скорости от конструктивных параметров (переставка, асфальт)

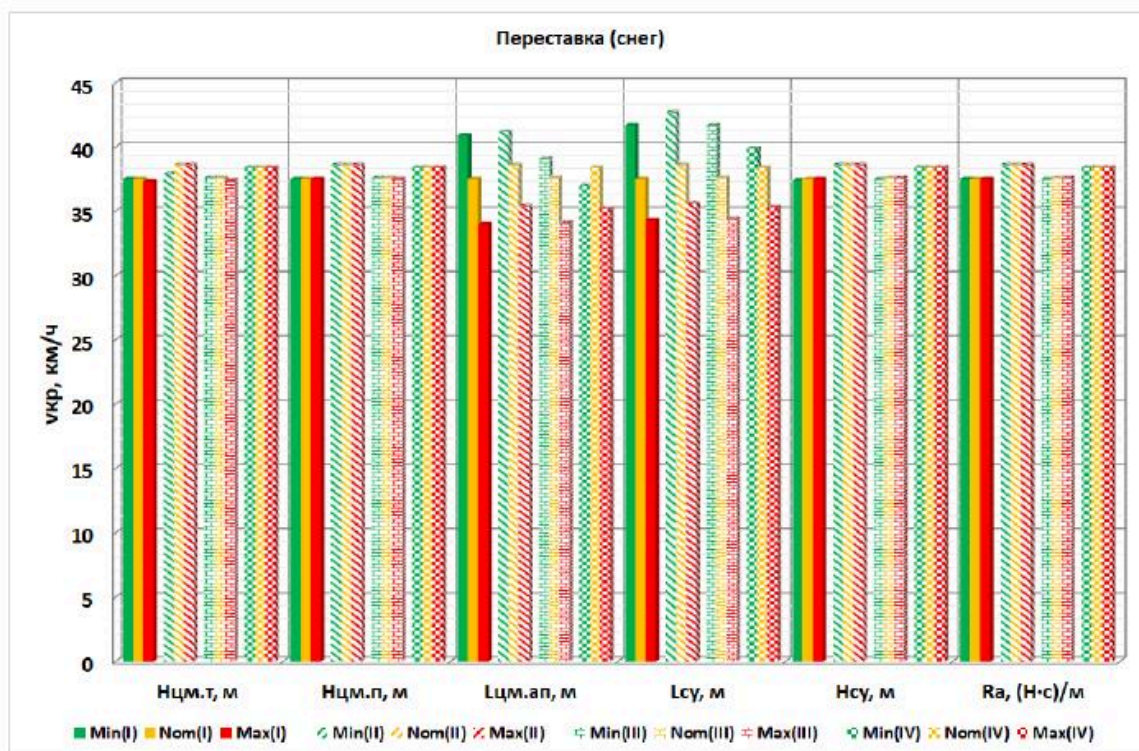


Рис. 4. Зависимость критической скорости от конструктивных параметров (переставка, снег)

Обсуждение полученных результатов. В общем случае управляемые колеса на полуприцепе ухудшают динамическую устойчивость автопоезда на асфальте, а управление тягой на снегу — улучшает. Предельная скорость по условию тяговой динамики на сухом асфальте составляла 82,6 км/ч, поэтому в ряде случаев (рис. 3) предел устойчивости достигнут не был. На снегу варьирование высоты центра масс и расстояния до ССУ практически не влияет на критическую скорость выполнения маневра.

Заключение. Результаты исследования позволяют сделать два важных вывода:

- вход в круг является более опасным маневром, чем переставка (даже на длине 16 м);
- на асфальте автопоезд более склонен к опрокидыванию, на укатанном снегу — к скольжению.

Полученные выводы имеют практическую ценность при выборе конструктивных параметров в ходе его проектирования и схему управления автопоездом при движении.

Список источников

- [1] Кочнев Е.Д. *Секретные автомобили Советской Армии*. Москва, Яуза, ЭКСМО, 2011, 606 с.
- [2] Белоусов Б.Н., Банникова Л.Б., Швецов А.М., Харитончик С.В., Колесникович А.Н. Повышение безопасности мобильных машин на основе совершенствования характеристик рулевого управления и подвески. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2011, № 1 (14), с. 21–27.

-
- [3] Бердников А.А. Математическая модель всеколесного рулевого управления с регулируемым углом складывания звеньев седельного автопоезда. *Двойные технологии*, 2019, № 4 (89), с. 35–38.
 - [4] Келлер А.В., Кунакильддин Р.Ф., Кычев В.Н. О рациональных режимах использования активных автопоездов. *Автомобильная промышленность*, 2005, № 10, с. 15–17.
 - [5] Котов И.И., Зиятдинов А.А., Башегуров С.В. Системы предотвращения и блокировки складывания автопоезда. *Грузовик*, 2018, № 1, с. 3–7.
 - [6] Белоусов Б.Н., Попов С.Д. *Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 728 с.
 - [7] Бердников А.А. *Оценка подвижности активных автопоездов*. Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023, 235 с.

