



MATHEMATICAL MODEL FOR SUBSTANTIATION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE SYSTEM OF FORCED TILTING OF WAGON BODIES OF HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN

Khromova Galina Alekseevna¹
Mahamadaliyeva Malika Alievna²
Goziyev Kholiyorzhon Olim ugli³

¹doctor tech. sciences, professor,

²doctor (of. Ph) tech. sciences, associate professor,

³master's student of the Department of "Electric rolling stock",

State Transport University, Uzbekistan, Tashkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19247655>

ARTICLE INFO

Received: 20th March 2026

Accepted: 26th March 2026

Online: 27th March 2026

KEYWORDS

Electric rolling stock, high-speed electric trains, mathematical model for substantiating rational parameters of a system for forced tilting of high-speed electric train wagon bodies when moving on curves, algorithm, program, MATHCAD 15.

ABSTRACT

The article presents a mathematical model for substantiating rational parameters of the forced tilting of high-speed electric train wagon bodies, ensuring maximum comfort for passengers while maintaining traffic safety.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПО ОБОСНОВАНИЮ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО НАКЛОНА КУЗОВОВ ВАГОНОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Хромова Галина Алексеевна¹
Махамадалиева Малика Алиевна²
Гозиев Холиёржон Олим угли³

¹доктор технических наук, профессор, ²доктор технических наук (Ph), доцент,

³магистрант кафедры "Электроподвижной состав", Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19247655>

ARTICLE INFO

Received: 20th March 2026

Accepted: 26th March 2026

Online: 27th March 2026

KEYWORDS

ABSTRACT

В статье представлена математическая модель по обоснованию рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов



Электроподвижной состав, высокоскоростные электропоезда, математическая модель по обоснованию рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов высокоскоростных электропоездов при движении в кривых, алгоритм, программа, MATHCAD 15.

высокоскоростных электропоездов, обеспечивающих максимальный комфорт для пассажиров при соблюдении безопасности движения.

Анализ мирового опыта организации современного пассажирского железнодорожного сообщения на существующих железнодорожных магистралях показал, что повышение средних скоростей движения и сокращение времени в пути достигается за счет применения подвижного состава с системами принудительного наклона кузовов [1,2,3,4]. Система должна обеспечивать повышение скорости прохождения криволинейных участков пути при обеспечении безопасности и комфорта перевозки пассажиров. Указанные требования напрямую зависят от конструктивных решений и параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов в кривых участках пути. В связи с этим поиск оптимальных параметров системы наклона, которые обеспечивают максимальный комфорт для пассажиров при соблюдении безопасности движения, является актуальной задачей.

Для обоснования параметров системы принудительного наклона кузовов высокоскоростных поездов применяют методы, основанные на моделировании динамики подвижного состава, расчетах кинематических и силовых характеристик, а также на анализе комфорта пассажиров и устойчивости движения. Эти методы включают разработку математических моделей, учитывающих массу, центр тяжести, подвеску и характеристики наклона, и позволяют определить оптимальные углы наклона для различных скоростей и радиусов кривых [5,6].

Методики обоснования параметров системы принудительного наклона кузовов высокоскоростных поездов базируются на следующих этапах [7,8,9]:

1. динамическое моделирование системы: создание математической модели вагона для анализа его поведения при движении в кривых;



2. симуляция и моделирование: использование компьютерных симуляторов для прогнозирования движения вагона при различных параметрах системы наклона;

3. динамический анализ: исследование влияния параметров системы наклона на динамику, такие как ускорения, силы, инерционные моменты и т.д.;

4. кинематические и силовые расчеты: определение кинематических и силовых характеристик, требующихся для обеспечения оптимального угла наклона кузова;

4.1. кинематика: расчет углов наклона кузова в зависимости от скорости и радиуса кривой, а также расчет радиусов кривых, требуемых для различных скоростей;

4.2. силовые характеристики: определение сил, действующих на вагон и пассажиров, и анализ их воздействия;

5. анализ комфорта пассажиров: оценка комфорта

пассажиров на основе критериев, таких как ускорение, вибрация и шум;

6. определение максимума ускорений: определение максимальных значений ускорения, которое может выдержать пассажир без дискомфорта;

7. анализ субъективных оценок пассажиров: использование специальных программ для оценки уровня комфорта, основанных на антропометрических данных и субъективных оценках пассажиров;

8. анализ устойчивости движения: проверка устойчивости движения поезда при различных скоростях и углах наклона кузова;

7. расчет динамических критериев: использование критериев устойчивости, таких как боковое ускорение и сопротивление качению, для определения безопасных диапазонов скоростей;

8. оптимизация: оптимизация параметров системы наклона, чтобы обеспечить высокую устойчивость движения при сохранении комфорта пассажиров.

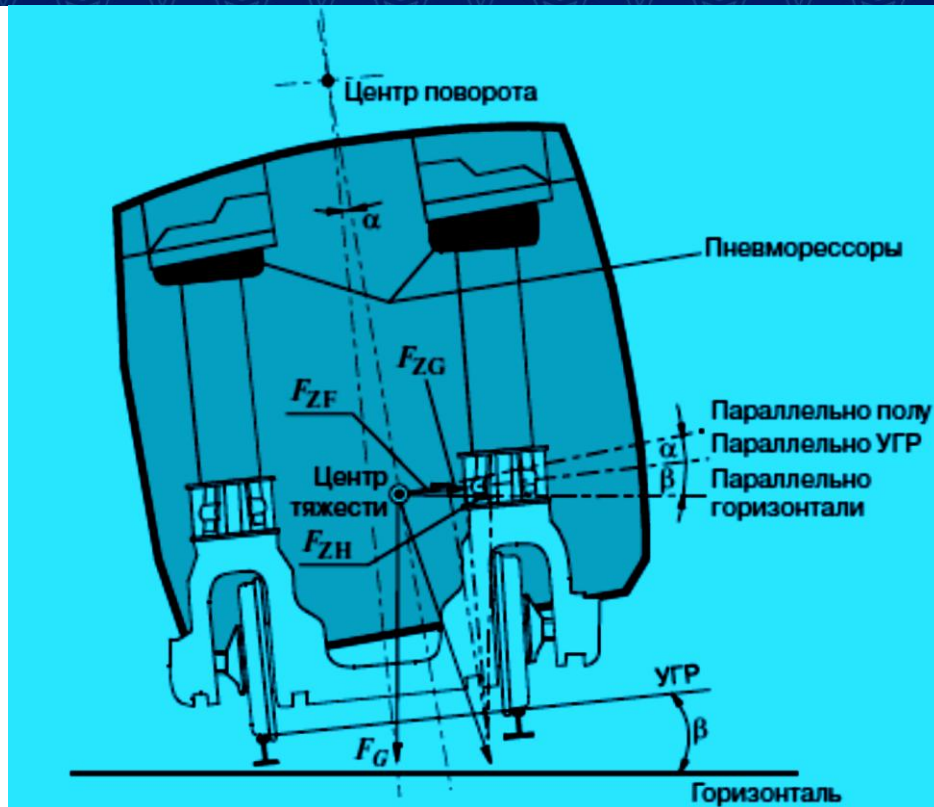


Рисунок 1. Кинематика системы наклона кузова вагона при движении в кривой (высокоскоростной поезд Talgo [3,4]):

F_{ZF} – поперечная сила, действующая параллельно полу вагона;

F_{ZG} – поперечная сила, действующая параллельно УГР;

F_{ZH} – то же, параллельно горизонтали; F_G – сила тяжести.

Принцип действия системы наклона кузова вагона высокоскоростного электропоезда Talgo [3,4]) основан на том, что центробежная сила, возникающая при движении в кривой, вызывает наклон кузова вагона. Отклонение кузова вагона в наружную сторону кривой происходит с помощью пневматических рессор, расположенных выше центра тяжести кузова вагона (рисунок 1). Пневматические рессоры имеют

конструкцию, в которой условная ось вращения находится выше уровня крыши вагона. В поезде Talgo Pendular кузов вагона с системой наклона можно рассматривать как классический маятник, отклоняющийся навстречу действию силы упругости рессор.

Анализируя другие варианты, можно сделать вывод, что активные системы, т.е. такие, которые имеют специальный привод наклона, менее надежны, чем пассивные, используемые в высокоскоростных поездах Talgo Pendular. Более того некоторые узлы пассивной системы, расположенные иначе, используются в вагонах с обычными, ненаклоняемыми кузовами. Система наклона в высокоскоростных поездах Talgo Pendular позволяет отказаться от дорогостоящих высокоточных систем измерения поперечных ускорений и привода,

осуществляющего активный наклон кузова. Она не требует дополнительных затрат на техническое обслуживание и не потребляет энергии.

При движении вагона в кривой его кузов свободно поворачивается вокруг условной оси вращения. Сжатие пневморессор с внутренней стороны кривой происходит в соответствии с законом прогрессии. Система настраивается таким образом, что при некомпенсированном квазистатическом боковом соударении, равном $1,5 \text{ м/с}^2$, обеспечивается максимально эффективный угол наклона $\alpha = 3^\circ$ (см. рисунок 1) относительно УГР.

Для пассажиров это означает, что от действующего в плоскости пути квазистатического поперечного ускорения, равного $a_{qmax} = 1,5 \text{ м/с}^2$, остается лишь одна его

составляющая, равная 1 м/с^2 , представляющая собой боковое ускорение, действующее в плоскости пола вагона. Таким образом, поперечное ускорение полностью не компенсируется, а лишь уменьшается до уровня, допустимого в обычных поездах при движении в кривой и спокойно воспринимаемого пассажирами.

Преимущество системы заключается в том, что пассажир может установить внутреннюю связь между наблюдаемым явлением (движением в кривой) и возникающими ощущениями. Благодаря этому у него не возникает отрицательных реакций.

На рисунке 2 приведено сравнение значений скорости, реализуемой в кривой радиусом 700 м вагонами с пассивной системой наклона кузова (PNT) и активной (ANT).

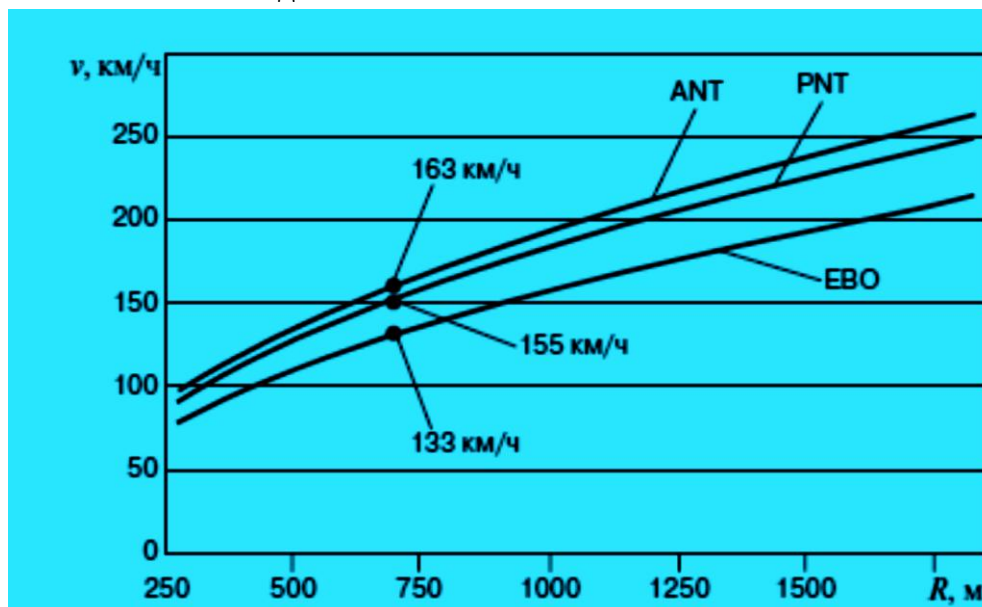


Рисунок 2. Сравнение значений скорости в кривых различного радиуса при активной и пассивной системах наклона кузова:

v – скорость движения; R – радиус кривой; *ANT* – активная система наклона; *PNT* – пассивная система наклона; *EBO* – кривая для



поездов из вагонов с ненаклоняемыми кузовами.

На многих модернизированных линиях обеспечено снижение квазистатического поперечного ускорения в плоскости до $1,5 \text{ м/с}^2$. Кроме того, требования Talgo Pendular к положению пути намного ниже, чем поездов с активной системой наклона кузова. Отсюда следует, что применение поездов Talgo Pendular с системой пассивного регулирования позволяет экономить средства, затрачиваемые на строительство новых и модернизацию

существующих линий, а также на текущее содержание пути.

Создание подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова (далее СПНК), позволяет скомпенсировать эффект недостаточного возвышения наружного рельса в кривом участке пути, соответственно, снизить уровень непогашенного ускорения, действующего на пассажиров, и повысить скорость движения на участке без снижения уровня комфорта.

References:

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т./ И.П. Киселёв и др.; под ред. И.П. Киселёва.-М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. Т.2.-372 с.
2. Simon Iwnicki. Handbook of Railway Vehicle Dynamics.2006. Taylor & Francis Group. - 527 p.
3. Система наклона кузовов вагонов поезда Talgo Pendular. / Журнал «Железные дороги мира», №4, 2005. – С.39-41. https://zdmira.com/images/pdf/dm2005_04_39-41.pdf
4. Достоинства и недостатки технологии наклона кузова. / Журнал «Железные дороги мира», №7, 2009. – С.60-66. https://zdmira.com/images/pdf/dm2009-07_60-66.pdf
5. Митраков А.С. Обоснование параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов. // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н., Уральский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО УрГУПС), Екатеринбург, 2021.- 171 с. <https://www.dissercat.com/content/obosnovanie-parametrov-sistemy-prinuditelnogo-naklona-kuzovov-vagonov>
6. Khromova G. A., Makhamadaliyeva M.A., Tadzhieva Sh.G. Justification of methods for improving the spring suspension systems of high-speed electric trains. // Eurasian Journal of Academic Research, Volume 5, Issue 10, October 2025, pp.39-42. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1732478>
7. Хромова Г.А., Махамдалиева М.А. Разработка методики продления срока службы рессорного подвешивания высокоскоростного электропоезда Afrosiyob. // Universum: Technical sciences. 2022. №. 2 (95). С. 66-70. Available at: [https://7universum.com/ru/tech/10\(103\)/10\(103_2\).pdf](https://7universum.com/ru/tech/10(103)/10(103_2).pdf)



8. Khromova G.A., Makhamadalieva M.A. Разработка математической модели по обоснованию рациональных параметров рессорного подвешивания высокоскоростного электропоезда Afrosiab. // Universum: Technical sciences, 2022, № 10 (103), октябрь 2022, часть 2, С. 62-66. DOI: [10.32743/unitech.2022.103.10.14404](https://doi.org/10.32743/unitech.2022.103.10.14404).
9. Khromova G.A., Makhamadalieva M.A., Гозиев Х.О. Методика обоснования рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов высокоскоростных электропоездов. // Eurasian Journal of Academic Research, Volume 5, Issue 11, November 2025, pp.163-168. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17776947>