



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



Научные методы повышения подвижности транспортных средств для перевозки контейнерных грузов вне дорог

доцент кафедры «Колесные машины»,
к.т.н., Евсеев К. Б.

Москва 2021



Актуальность



Проблема транспортной доступности

Расширение сети дорог и
строительство крупной портовой
терминальной инфраструктуры



Использование специальных
транспортных средств высокой
проходимости

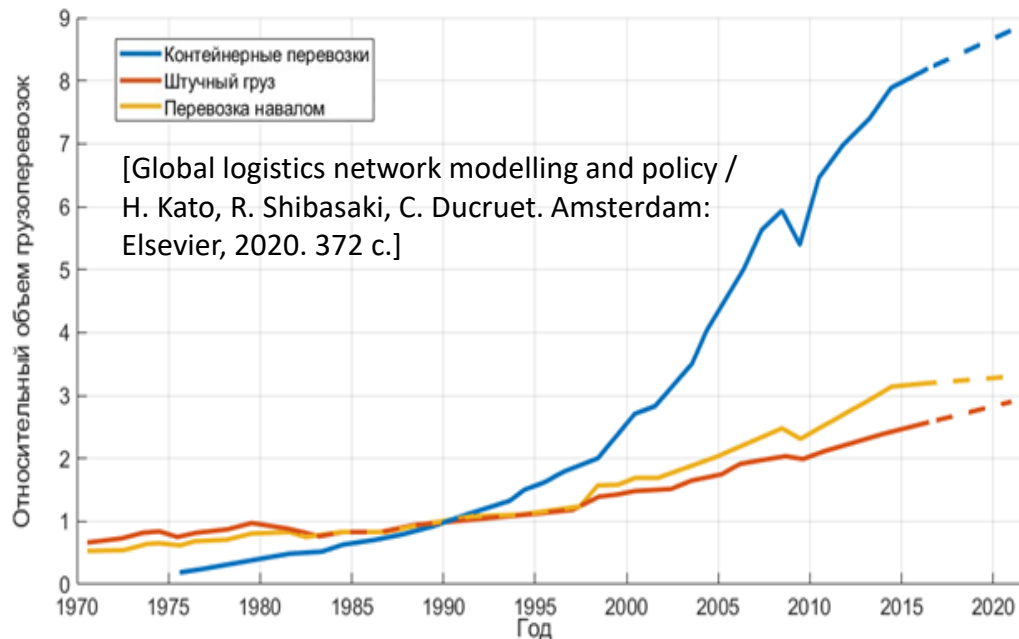
- не всегда экономически выгодно
- не всегда возможно



Актуальность



Необходимость перевозки крупногабаритного оборудования, транспортных контейнеров, строительных материалов и других тяжелых неделимых грузов для обеспечения транспортной доступности и связанности территорий РФ



Преимущества контейнерных перевозок:

- рост экономической эффективности перевозок;
- снижение затрат на погрузочно-разгрузочные работы;
- увеличение скорости обработки водного и железнодорожного транспорта;
- гарантия сохранности груза и т.д.

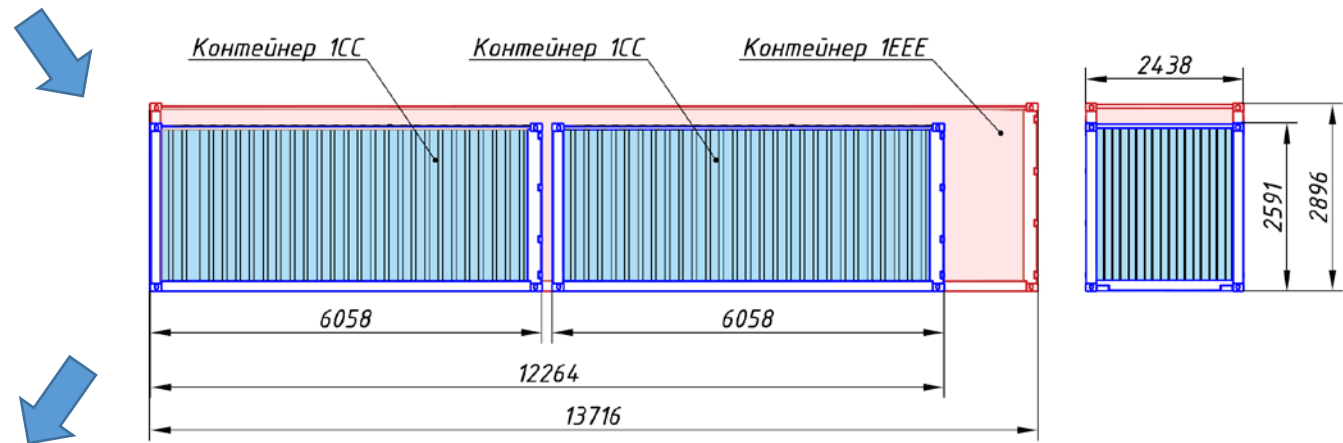


Актуальность



Название	Обозначение	Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	Масса брутто, кг
45-футовый	1EEE	13716x2438x2896	30480
40-футовый	1AAA	12192x2438x2896	30480
20-футовый	1CC	6058x2438x2591	30480

Контейнеры
ISO 668:1995
(ГОСТ Р 53350-2009)



Наиболее целесообразным представляется возможность перевозки контейнеров с использованием одного грузового транспортного средства:

- 1) одного 45-футового контейнера (**длина 13716мм**);
- 2) одновременная перевозка двух 20-футовых контейнеров (**61т**).



Возможные варианты ТС



Использование специальных
транспортных средств для
внедорожных контейнерных перевозок

Грузоподъемность: 61т
Длина транспортной платформы: 13,7м

Многоосные колесные ТС
и автопоезда



МЗКТ-79221

КамАЗ-7850



МАЗ-7410-9988

Гусеничные машины и
гусеничные поезда



Foremost «Husky-8»



ДТ-30МН



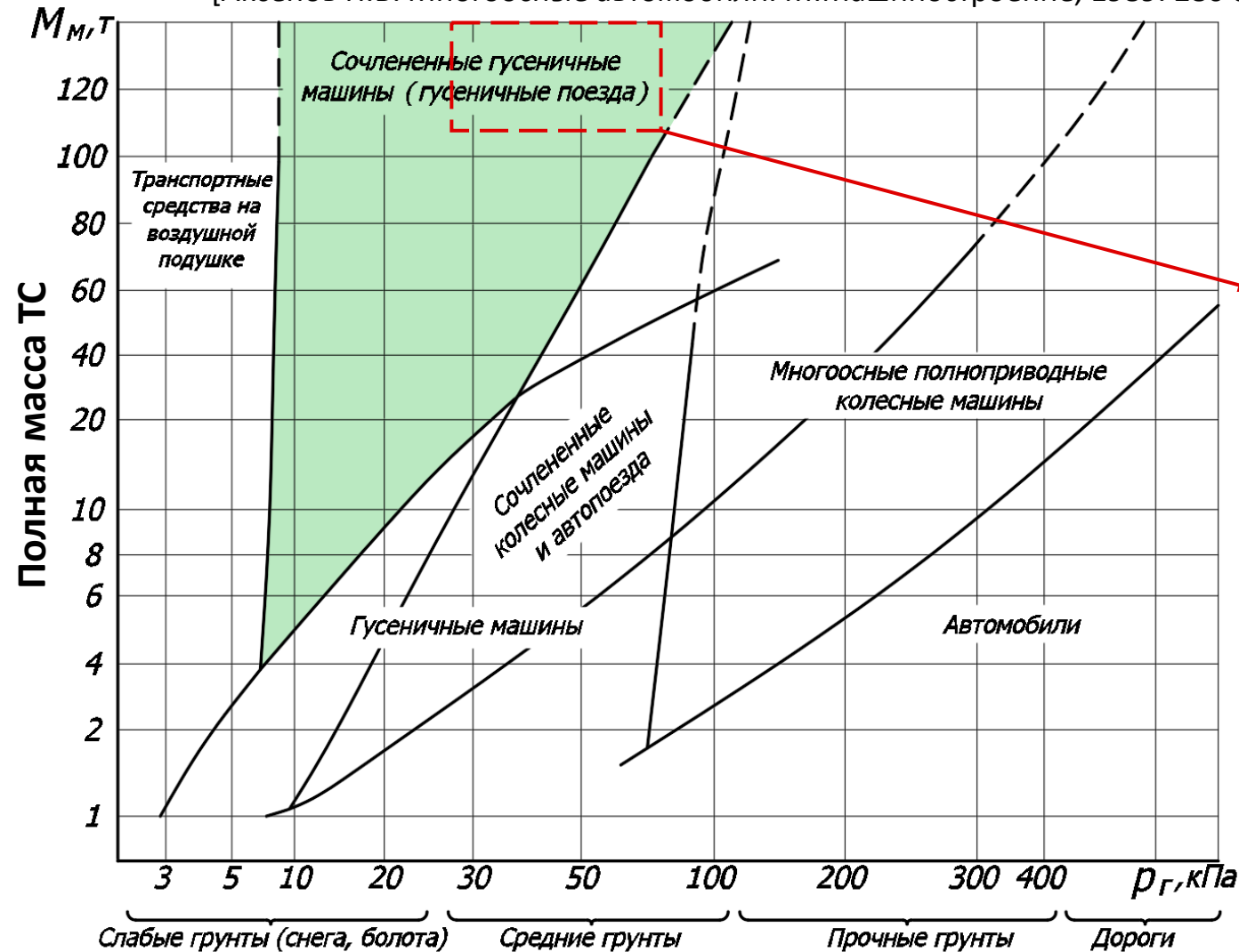
Урал-5920



Дорожно-грунтовые условия для ТС



[Аксенов П.В. Многоосные автомобили. М:Машиностроение, 1989. 280 с.]



Среднее давление на грунт **не более** 0,6...0,75 кг/см²



ГИПОТЕЗА:
целесообразно использование гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок при полной массе ТС более 100 т



Направления развития внедорожных контейнерных перевозок



Перспективным направлением развития наземных безрельсовых транспортных средств **для внедорожных** контейнерных перевозок является **переход к беспилотным грузовым платформам**



Движение транспортных средств с использованием **технологии «follow me»**
(следование за машиной-лидером)



Движение транспортных средств посредством **дистанционного управления** из машины-лидера



Методы повышения подвижности транспортных средств



Научные методы повышения подвижности транспортных средств при решении проблемы энергоэффективности и безопасности внедорожных контейнерных перевозок

Метод анализа иерархий



Для определения приоритетных технических решений конструктивно-компоновочного исполнения беспилотных транспортных средств, предназначенных для внедорожных контейнерных перевозок, на основе научно обоснованной иерархии критериев свойства подвижности

Метод имитационного математического моделирования

Для определения показателей подвижности беспилотных транспортных средств, предназначенных для внедорожных контейнерных перевозок и формирования законов управления движением

Метод натурно-математического моделирования

Для определения показателей подвижности беспилотных транспортных средств, предназначенных для внедорожных контейнерных перевозок, требующих учета управляющего воздействия водителя-оператора



Иерархия эксплуатационных свойств



Известны работы в области разработки иерархии эксплуатационных свойств наземных транспортных средств и исследования их значимости:

Я.Е. Фаробина, А.С. Литвинова, В.Н. Наумова, Ю.Л. Рождественского, А.В. Морозова, Л.В. Барахтанова, А.А. Аникина, В.Н. Кравца, В.В. Белякова, А.И. Федотова, М.Я. Дубенского, И.А. Плиева, М.В. Нагайцева, М.Р. Калимулина, А.С. Дьякова и др., работы научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Московского политехнического университета, МАДИ, Военной академии бронетанковых войск, ОАО «НИИ Стали», ФГБУ «21 НИИИ ВАТ» Минобороны России, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и др.

Иерархия свойств для
оценки вариантов
конструктивно-
компоновочного
исполнения
(альтернатив)





Метод анализа иерархий



Для комплексного сравнения транспортных средств по назначению широкое распространение получил метод анализа иерархий (МАИ) Т. Саати

Для определения значимости критериев иерархии эксплуатационных свойств подвижности ТС для внедорожных контейнерных перевозок и приоритетности альтернативных решений:

1. Разработка иерархии эксплуатационных свойств подвижности ТС для внедорожных контейнерных перевозок;
2. Формирование матриц парных сравнений для каждого уровня критериев;
3. Получение экспертных суждений для каждой матрицы парных сравнений;
4. Определение локальных приоритетов (ЛП) критериев и альтернатив:

$$A\delta = \lambda_{max}\delta,$$

где A - матрица парных сравнений критериев;

λ_{max} - максимальное собственное значение матрицы A ;

δ - собственный вектор, соответствующий λ_{max} .

→ Нормализация вектора δ , при $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$, → ЛП

где n – размерность исходной матрицы парных сравнений.

$$\rightarrow \text{ИС} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \rightarrow \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}} < 0,1 \div 0,2$$

СИ – «случайный» индекс

5. Определение согласованности матриц суждений;

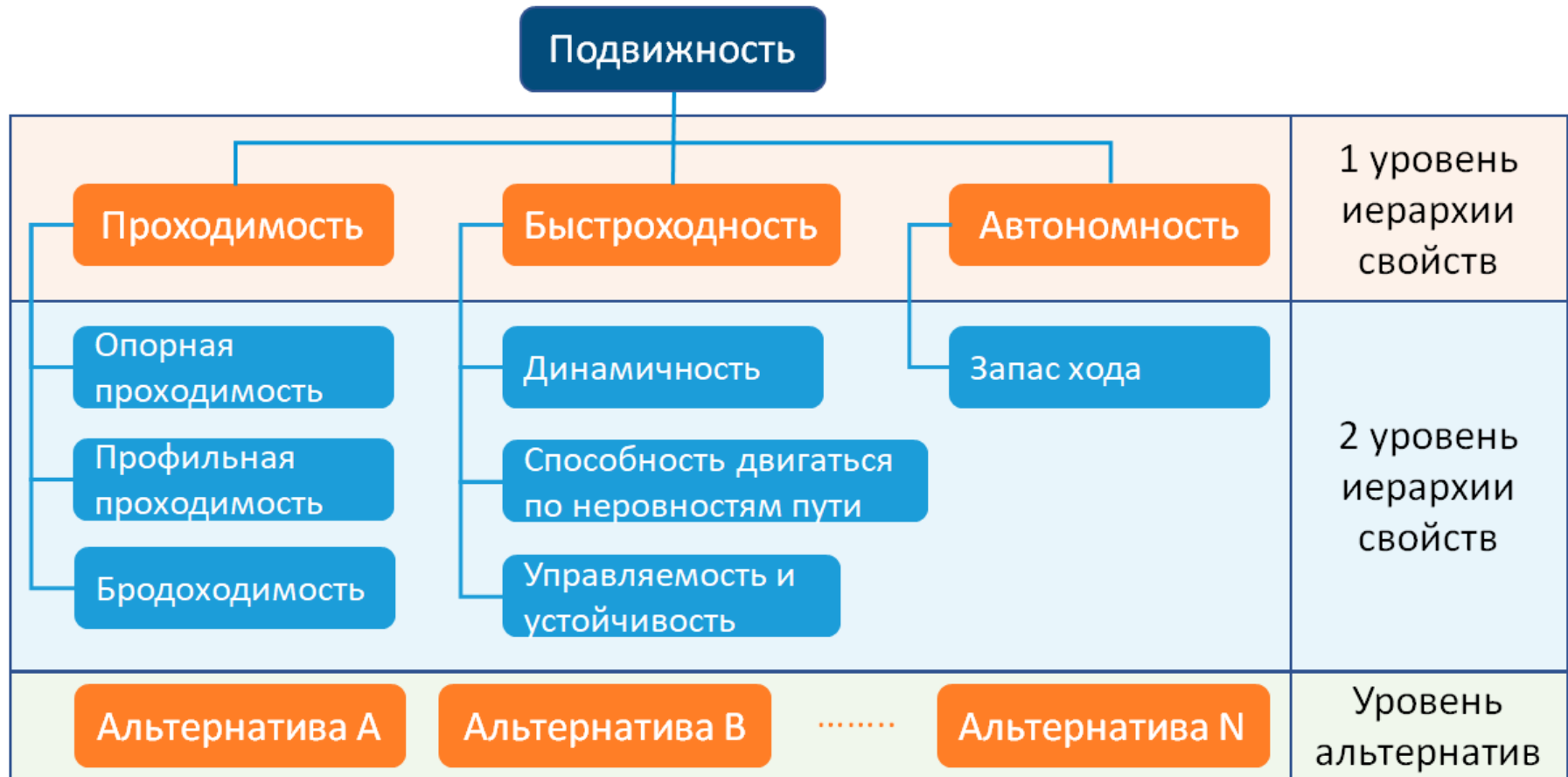
6. Синтез приоритетов;

7. Определение согласованности иерархии.

Размерность матрицы	3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	10x10
СИ	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49



Иерархия подвижности



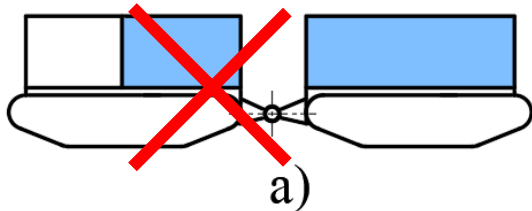


Классификация гусеничных поездов

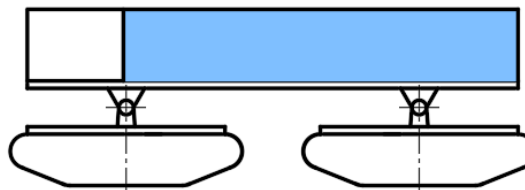


По расположению груза:

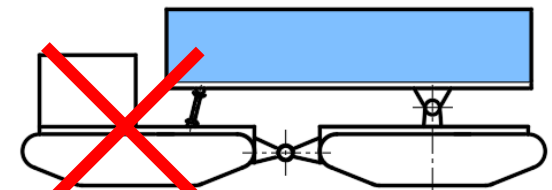
- с отдельным расположением груза на каждом звене гусеничного поезда (а);
- с расположением моногруза на грузовой платформе седельного двухшарнирного гусеничного поезда (б);
- с расположением моногруза на грузовой платформе прицепного гусеничного поезда (в);
- с расположением моногруза на грузовой платформе полуприцепного звена гусеничного поезда (г);
- с расположением моногруза на грузовой платформе монокорпусного многозвенного шасси (д).



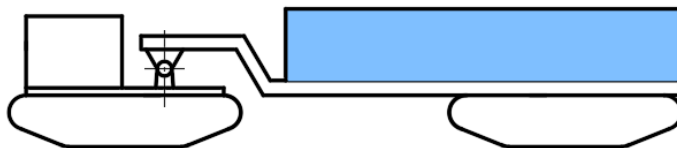
а)



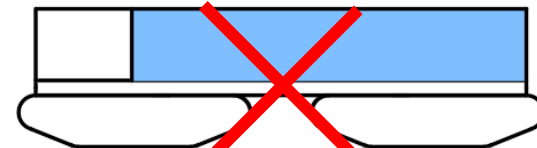
б)



в)



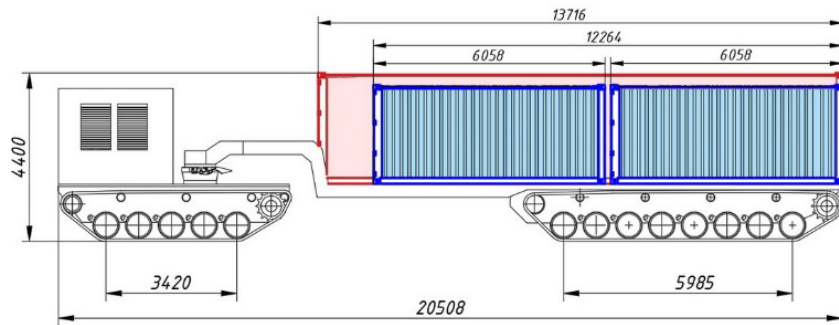
г)



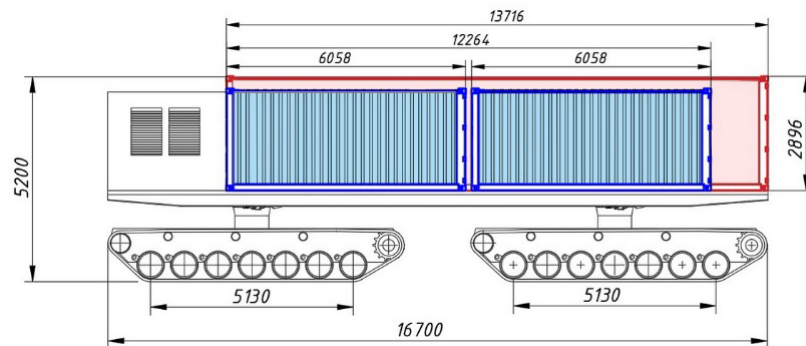
д)



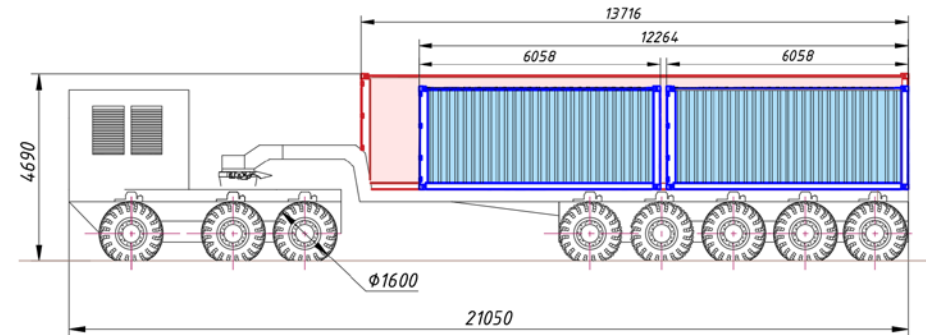
Варианты возможных конструктивно-компоновочных исполнений ТС



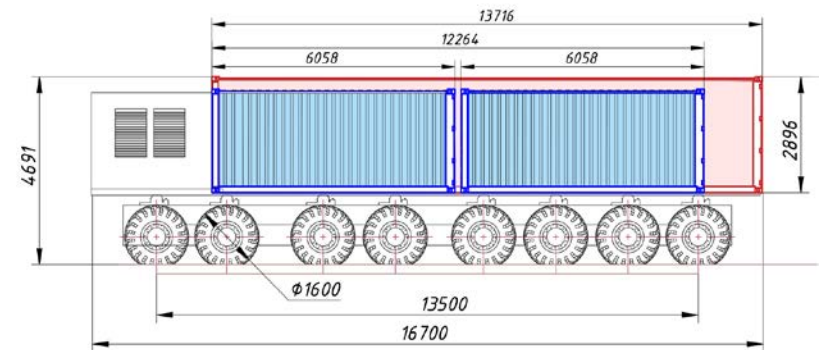
Альтернатива «А» (Гусеничный поезд, выполненный по полуприцепной схеме)



Альтернатива «В» (Гусеничный поезд, выполненный по седельной двухшарнирной схеме)



Альтернатива «С» (Колесный автопоезд)



Альтернатива «D» (Многоосная КМ)



Метод анализа иерархий (предварительные результаты качественной оценки)



Результаты парных сравнений критериев (локальные приоритеты)

Критерий	Значимость
Проходимость	0,637
Быстроходность	0,105
Автономность	0,258

Критерий	Значимость
Опорная проходимость	0,6
Профильная проходимость	0,2
Бродоходимость	0,2

Критерий	Значимость
Динамичность	0,142
Способность двигаться по неровностям пути	0,429
Управляемость и устойчивость	0,429

Глобальные приоритеты

Критерий	Значимость
Опорная проходимость	0,382
Запас хода	0,258
Профильная проходимость	0,1275
Бродоходимость	0,1275
Способность двигаться по неровностям пути	0,045
Управляемость и устойчивость	0,045
Динамичность	0,015

Альтернатива	Значимость
Альтернатива «А»	?
Альтернатива «В»	?
Альтернатива «С»	?
Альтернатива «D»	?

Кардинальное повышение подвижности ТС для внедорожных контейнерных перевозок возможно только с использованием гусеничных поездов



Анализ конструктивных параметров гусеничных поездов



ДГМ-1



«объект 825»



СВГ-701 «Ямал»



БТ361А-01 «Тюмень»



Урал-5920



ДТ-30МН



Nodwell «RN400»



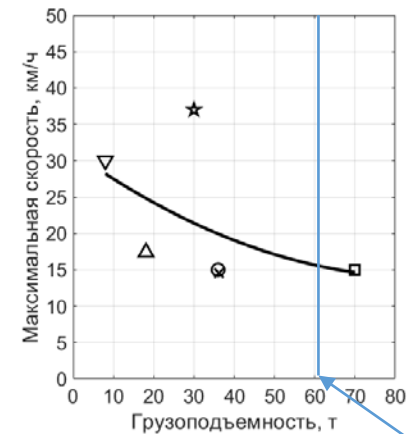
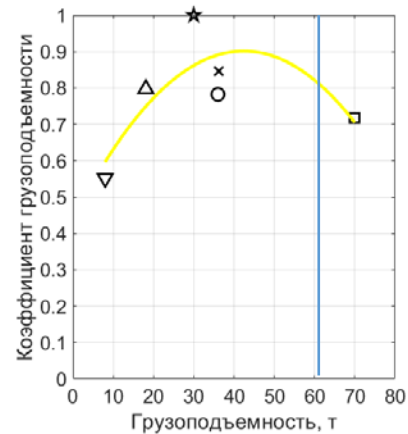
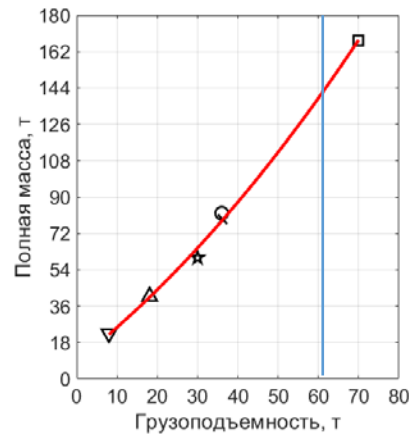
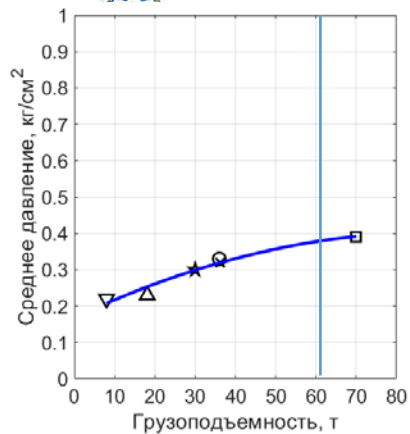
Foremost «Husky-8»

Midgetman

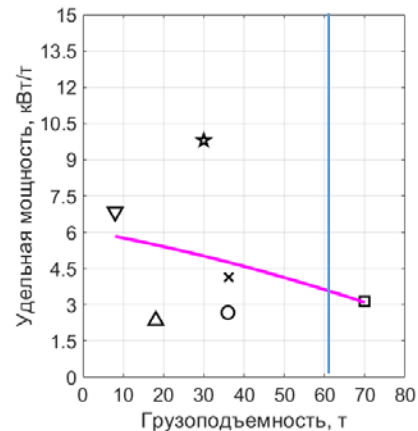
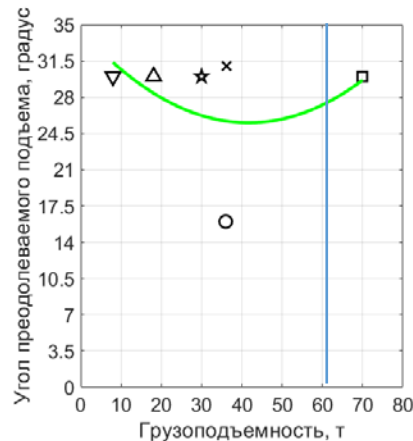
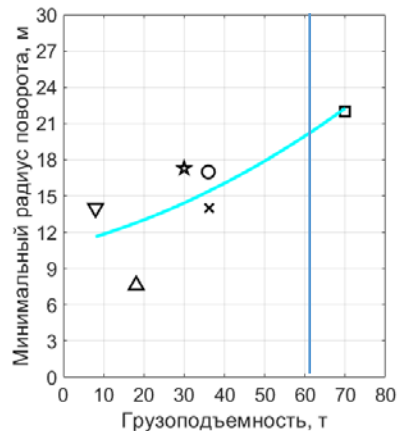




Анализ конструктивных параметров гусеничных поездов



Грузоподъемность: 61т



- БТ361А-01 "Тюмень"
- СВГ-701 "Ямал"
- ▽ Урал-5920
- × Foremost Husky-8
- ★ ДТ-30
- △ Nodwell "RN400"

Среднее давление на грунт: не более $0,4 \text{ кг/см}^2$;
Полная масса: не более 145 т;
Коэффициент грузоподъемности: не менее 0,7;

Минимальный радиус поворота: не более 20 м;
Угол преодолеваемого подъема: не менее 30 град;
Удельная мощность: не менее 4 кВт/т .



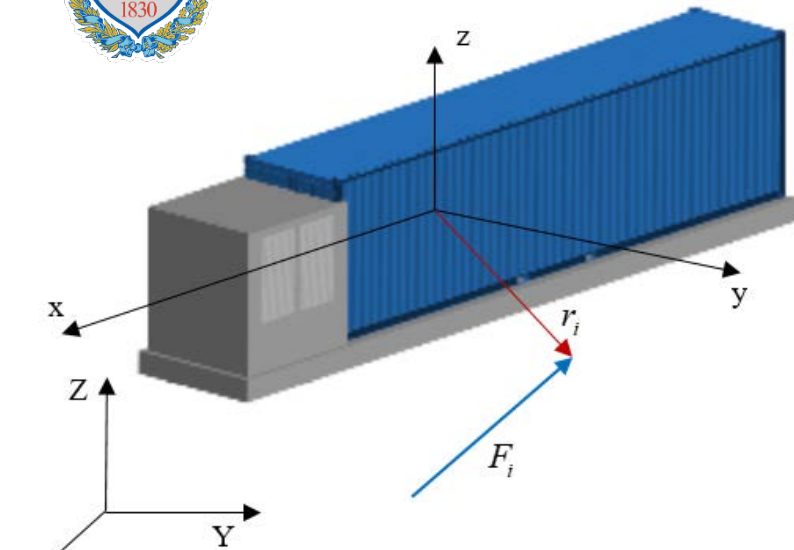
Этапы сравнения различных вариантов конструктивно-компоновочных исполнений гусеничных поездов



- 1) формирование иерархии эксплуатационных свойств с разделением на уровни критериев;
- 2) определение альтернатив по результатам анализа конструктивно-компоновочных исполнений;
- 3) экспертная оценка вариантов альтернатив с использованием метода анализа иерархий, выбор альтернатив;
- 4) определение показателей свойств для выбранных альтернатив методами имитационного математического моделирования (натурно-математического моделирования);
- 5) определение приоритетного технического решения с учетом результатов, полученных при проведении имитационного математического моделирования (натурно-математического моделирования).



Метод имитационного математического моделирования движения гусеничных поездов



Система уравнений движения, дополненная уравнениями связи

$$\begin{cases} M_j \ddot{q} + D^T \vec{\lambda} = \overrightarrow{f(\dot{q}, q, t)}; \\ D \ddot{q} = \overrightarrow{h(\dot{q}, q)}, \end{cases}$$

M_j – матрица инерции; \vec{q} – вектор обобщенных координат (размерностью n , где n – количество обобщенных координат, необходимых для описания движения системы); D – матрица переменных коэффициентов уравнений кинематических связей размерностью $k \times n$, где k – число уравнений связи; $\vec{\lambda}$ – вектор множителей Лагранжа; $\overrightarrow{f(\dot{q}, q, t)}$ – вектор внешних сил, включающий в себя силы нагрузок, силы от упругодемпфирующих элементов, а также гироскопические силы; $\overrightarrow{h(\dot{q}, q)}$ – вектор правых частей уравнений связи.

Уравнения динамики

твердого тела в пространстве

$$\begin{cases} m \ddot{\vec{s}} = \sum_{i=1}^{k_f} \vec{F}_i; \\ J \ddot{\vec{\omega}} = \sum_{i=1}^{k_f} (R^T \vec{F}_i) \times \vec{r}_i + \sum_{j=1}^{k_M} \vec{M}_j + \vec{K} \times \vec{\omega}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = (\omega_x \cos(\psi) - \omega_y \sin(\psi)) / \cos(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_x \sin(\psi) - \omega_y \cos(\psi); \\ \dot{\psi} = (\omega_y \sin(\psi) - \omega_x \cos(\psi)) \tan(\theta) + \omega_z, \end{cases}$$

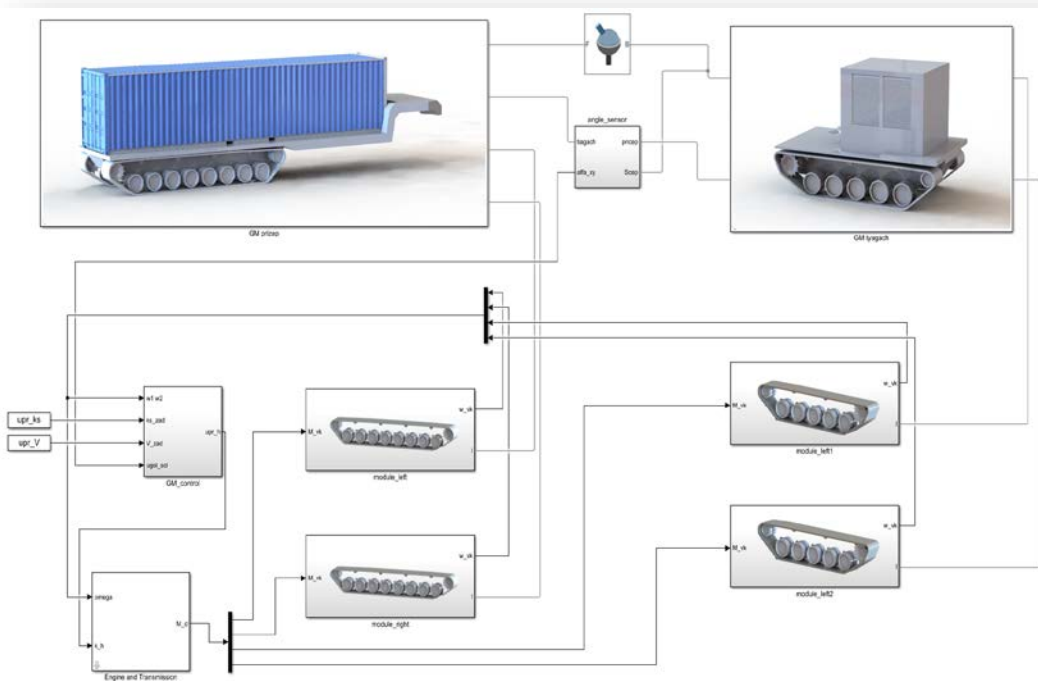
m – диагональная матрица масс тела; \vec{s} – вектор координат центра масс тела в неподвижной (глобальной) системе координат XYZ ; \vec{F}_i – вектор i -ой внешней силы, приложенный к некоторой точке тела, заданный в глобальной системе координат XYZ ; k_f – количество внешних сил, приложенных к телу; J – тензор инерции тела; $\vec{\omega}$ – вектор угловых скоростей тела в подвижной системе координат xuz , связанной с телом в центре масс; R – ортогональная матрица поворота, переводящая вектор, заданный в подвижной системе координат xuz , связанной с телом в центре масс, в неподвижную систему координат XYZ ; \vec{r}_i – радиус-вектор точки приложения i -ой силы в подвижной системе координат xuz , связанной с телом в центре масс; \vec{M}_j – вектор j -ого внешнего момента, действующего на тело, заданный в подвижной системе координат xuz ; k_M – количество внешних моментов, действующих на тело; $\vec{K} \times \vec{\omega}$ – вектор моментов гироскопических сил (\vec{K} – вектор кинетического момента тела)



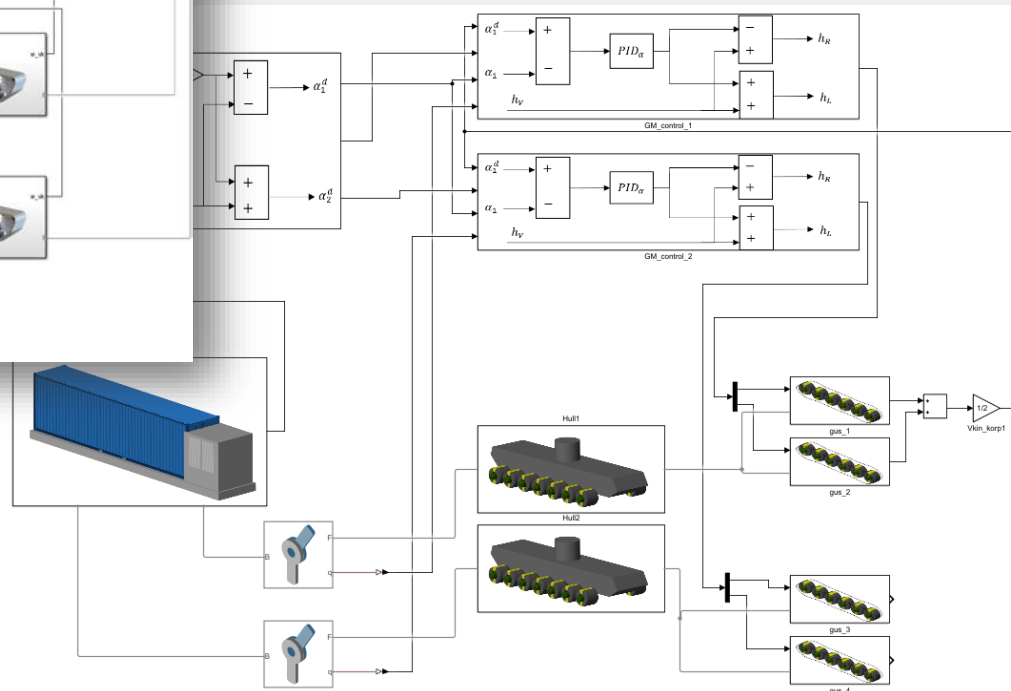
Схема имитационной модели гусеничного поезда



Структурная схема математической модели гусеничного поезда, выполненного по седельной двухшарнирной схеме



Структурная схема математической модели гусеничного поезда, выполненного по полуприцепной схеме



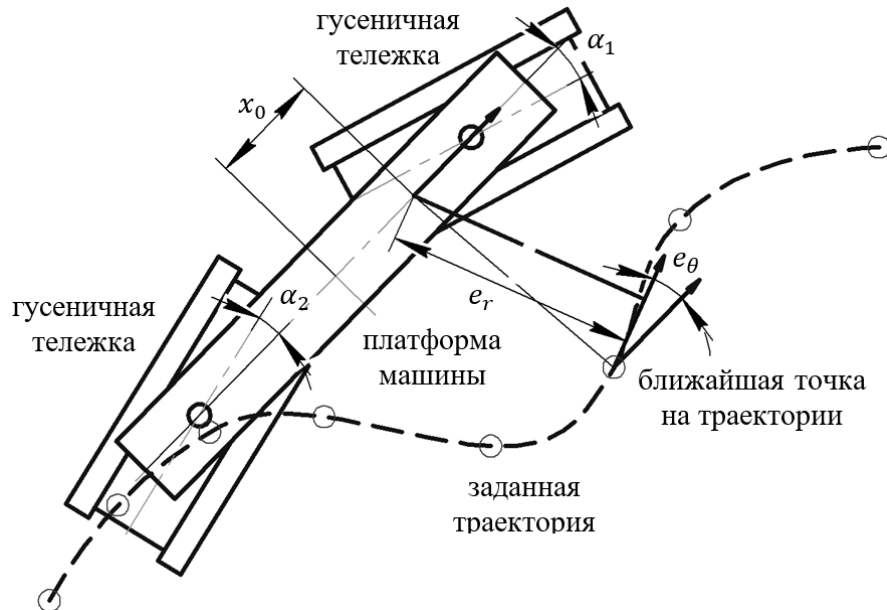
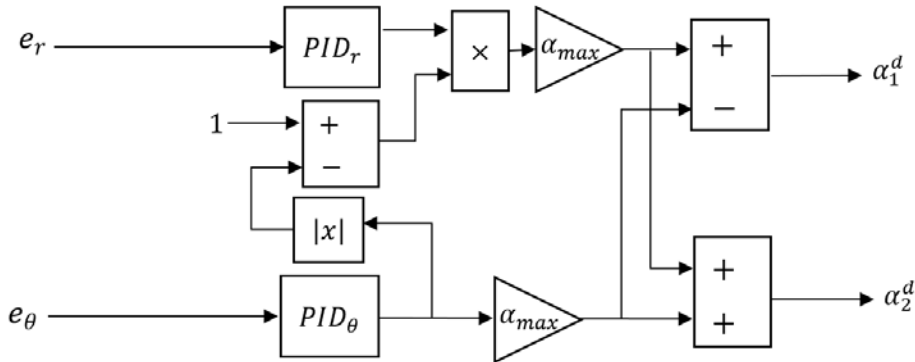


Регуляторы управления поворотом для следования заданной траектории



$$\alpha_1^d = (1 - |PID_\theta(e_\theta)|) \cdot \alpha_{max} \cdot PID_r(e_r) - \alpha_{max} \cdot PID_\theta(e_\theta);$$

$$\alpha_2^d = (1 - |PID_\theta(e_\theta)|) \cdot \alpha_{max} \cdot PID_r(e_r) + \alpha_{max} \cdot PID_\theta(e_\theta),$$

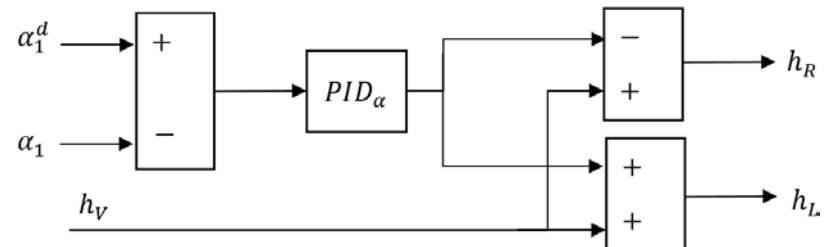


α_1^d, α_2^d – требуемые углы поворота гусеничных тележек; $PID_\theta(e_\theta), PID_r(e_r)$ – регуляторы, определяющие управляющее воздействие исходя из углового e_θ и линейного e_r отклонения от траектории; α_{max} – максимальный угол поворота гусеничной тележки

Вычисление управляющих воздействий осуществляется исходя из положения органа управления скоростью машины h_V и ПИД регулятора PID_α , обеспечивающего согласование требуемого α_1^d и фактического α_1 угла поворота гусеничной тележки относительно продольной оси машины

$$h_R = h_V - PID_\alpha(\alpha_1^d - \alpha_1);$$

$$h_L = h_V + PID_\alpha(\alpha_1^d - \alpha_1).$$

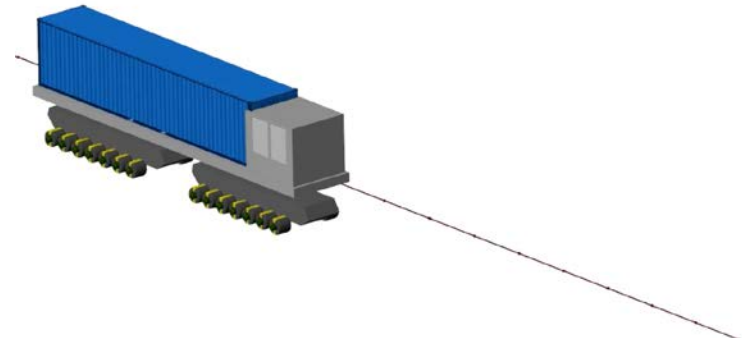
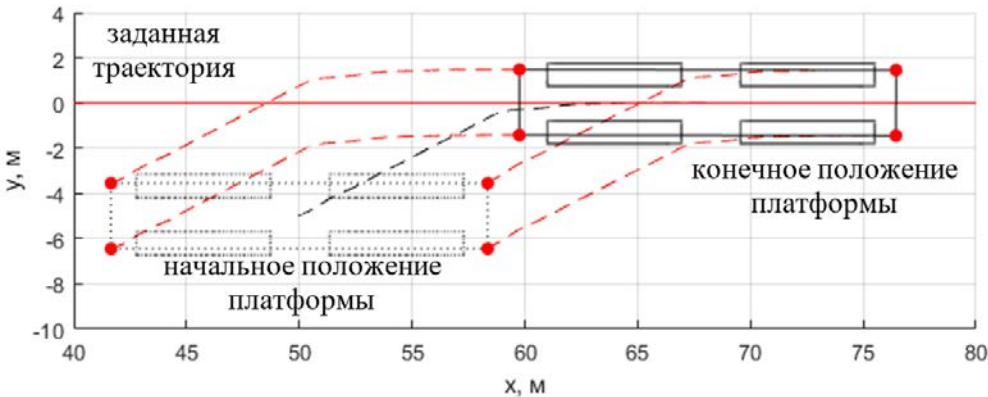




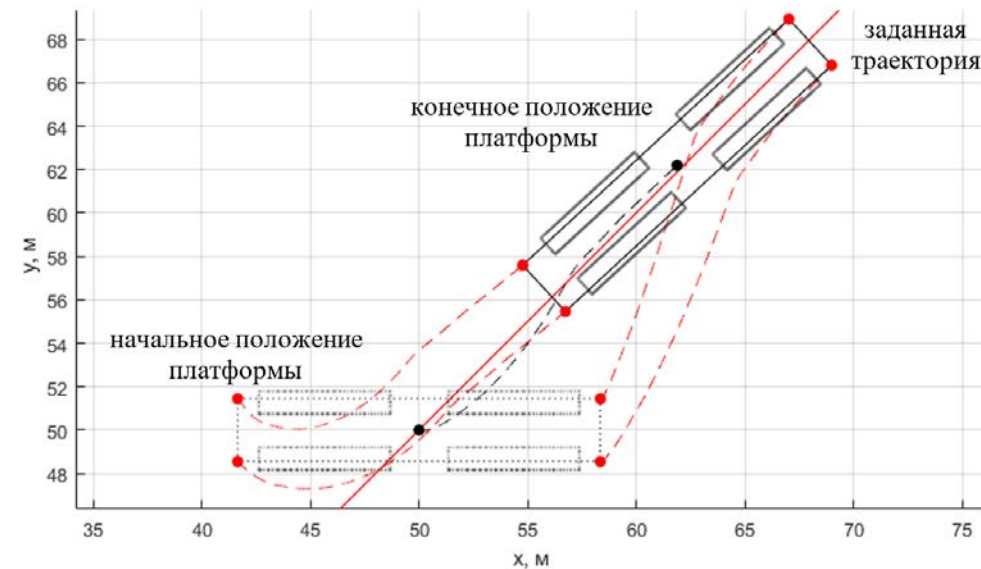
Определение параметров регуляторов



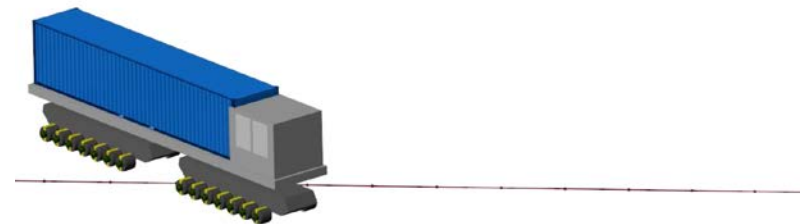
Компенсация линейного отклонения



Компенсация углового отклонения

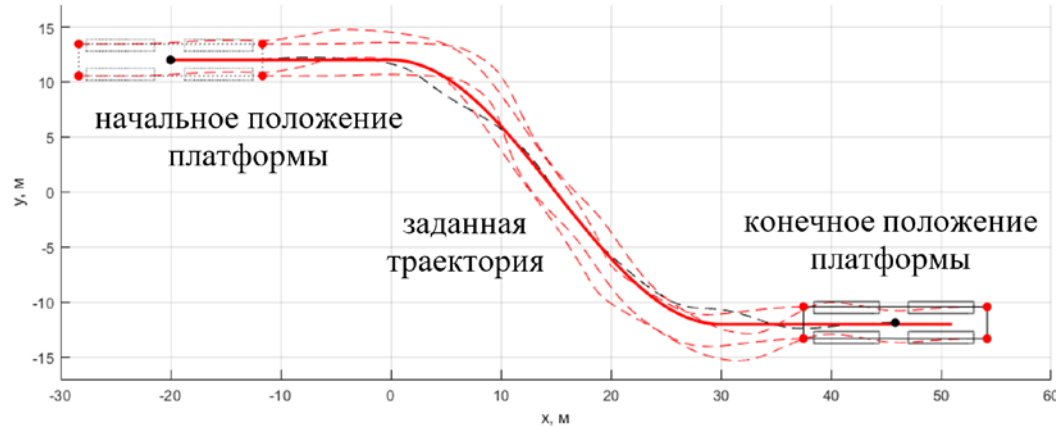


Возврат транспортного средства на траекторию с помощью параллельного движения позволяет оптимизировать параметры регулятора линейного отклонения. Возврат на траекторию при некотором угловом отклонении позволит оптимизировать параметры регулятора углового отклонения



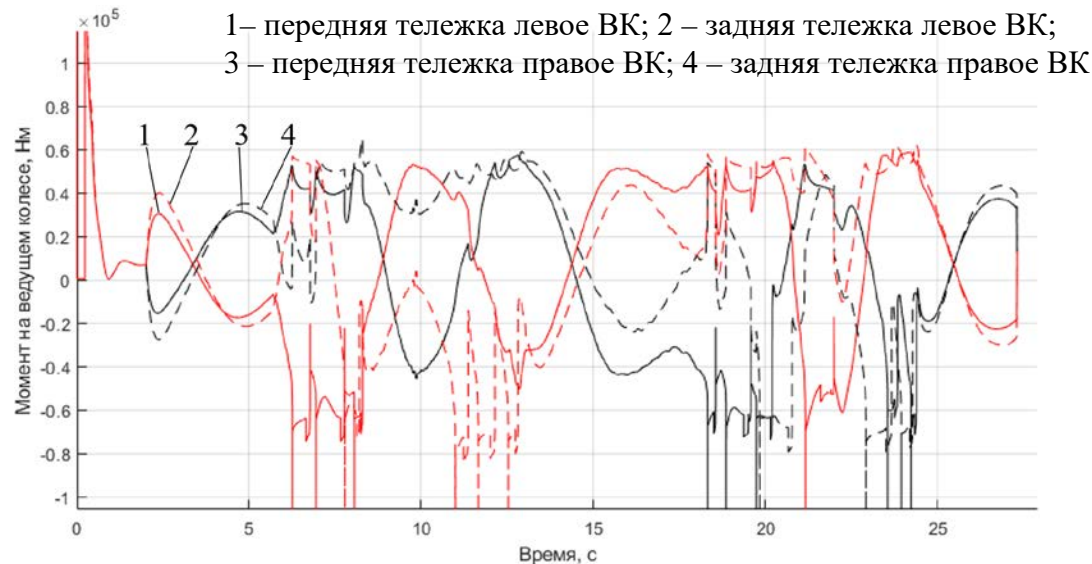


Моделирование криволинейного движения



4x

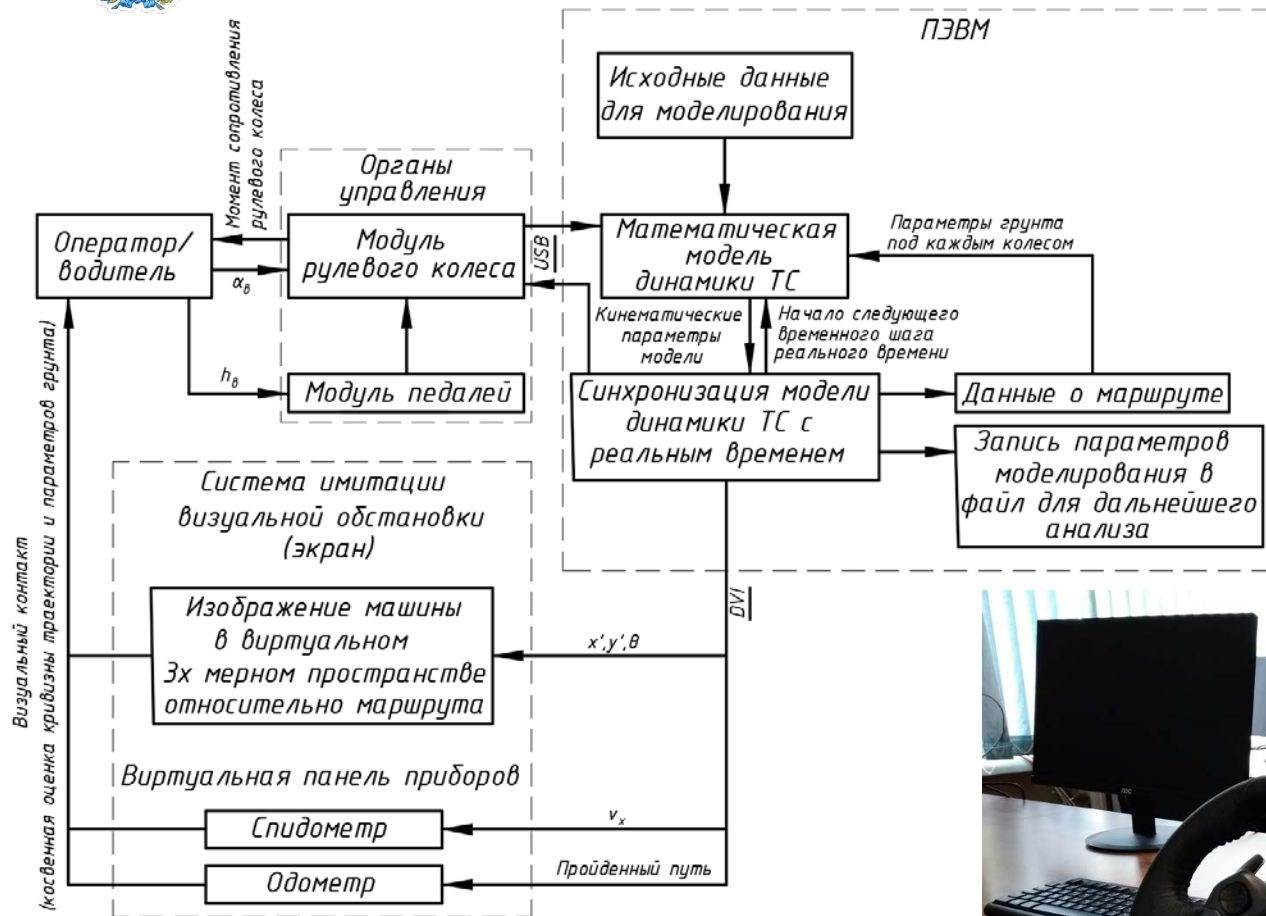
Вращающие моменты на ведущих колесах тележек гусеничного поезда



Для обеспечения энергоэффективного движения гусеничного поезда и минимизации габаритных размеров привода потребуются применения специальных механизмов для силового способа поворота, кинематического способа поворота или комбинации силового и кинематического способов поворота каждой тележки



Метод натурно-математического моделирования



Рабочее место и интерфейс оператора комплекса натурно-математического моделирования





Вывод



Наряду с колесными ТС не следует исключать и гусеничные поезда для **внедорожных** контейнерных перевозок. Для определения приоритетных конструктивных исполнений ТС предложена совокупность научных методов, направленных на решение проблемы повышения подвижности гусеничных поездов путем реализации беспилотного движения по заданной траектории или движения за машиной-лидером (с дистанционным управлением).



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



Научные методы повышения подвижности транспортных средств для перевозки контейнерных грузов вне дорог

доцент кафедры «Колесные машины»,
к.т.н., Евсеев К. Б.

Москва 2021