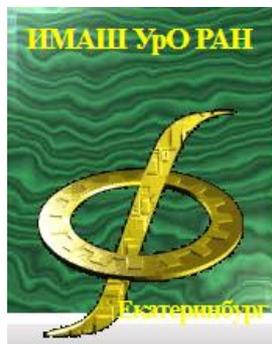


**ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ  
БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ, ОСНАЩЕННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ  
ПОВОРОТОМ С ДИСКРЕТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**



**Аспирант: Волков Александр Александрович**

**Научный руководитель: д.т.н., проф. Держанский Виктор Борисович**

**Курган 2017г.**

# Основные недостатки существующей системы и направление её совершенствования

## Актуальность

Одним из основных эксплуатационных свойств гусеничных машин является подвижность. В процессе проектирования машин обеспечивается высокая скорость движения, однако реализовать ее в реальных условиях, особенно при роботизированном управлении не удастся. Это определяет необходимость разработки методов повышения степени реализации потенциальных скоростных свойств. Анализ литературных данных, результаты экспериментального исследования показывает, что основными ограничениями подвижности являются следующие.

- Фазовое отставание реакции машины на управляющее воздействие.
- Недостаточно удерживающей способности грунта, реакция гусеничной машины характеризуется забросом до 50% и выше. При этом угловые ускорения корпуса машины достигают 74град/с<sup>2</sup>.
- Дискретность системы которая может привести к большой цикличности включения механизма поворота (до 96 включений на 1 км пути), и для обеспечения точности траектории движения по условиям безопасности водитель снижает скорость движения машины.

# Цель и задачи исследования

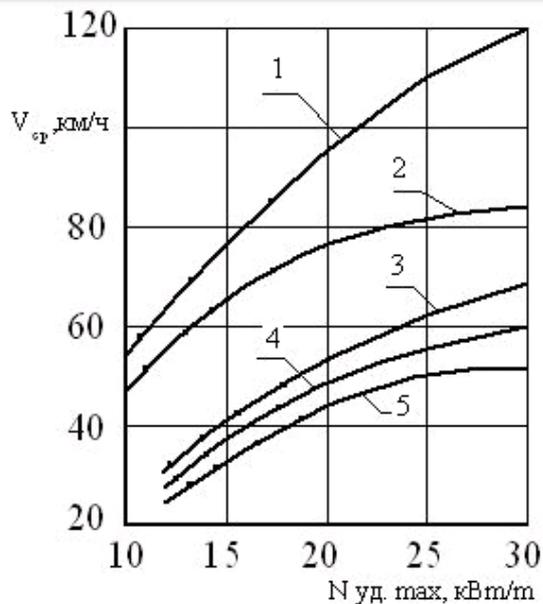
Цель исследования состоит в повышении степени реализации потенциальных скоростных качеств быстроходных гусеничных машин оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. **Теоретическое исследование динамики управляемого движения БГМ.** Имитационное моделирование процессов движения, определение кинематических параметров, их зависимости от параметров конструкции машины и условий движения и динамических свойств системы, определение цикличности включения системы управления поворотом при детерминированном и случайном характере управления.
2. **Экспериментальное исследование** динамики управления движением быстроходной гусеничной машины **для** идентификации параметров системы, **определение динамических, кинематических и силовых параметров движения ГМ.**
3. **Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования, валидация модели движения машины, обоснование и разработка новых способов определения требуемого поворачивающего момента и коэффициента сопротивления уводу, обоснование метода повышения подвижности быстроходной гусеничной машины.**

Решение этих задач позволит дополнить существующий метод прогнозирования быстроходности гусеничных машин оснащенных дискретной системой управления поворотом, а так же обосновать пути повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств.

# Зависимость средней скорости движения машины от удельной мощности



Прогноз ВАБТВ (1965 г.)

1 – по дорогам;

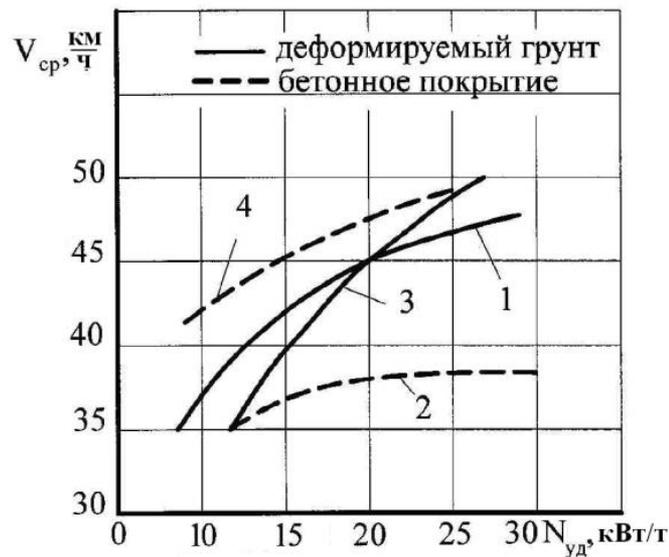
2 – по местности;

Прогноз ВНИИТМ (1982 г.)

3 – фактор внешних условий;

4 – управляемость;

5 – плавность входа

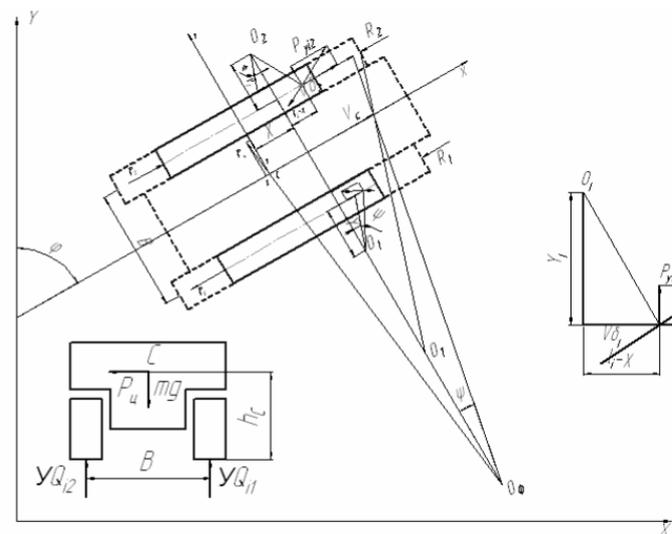


Зависимость средней скорости движения от удельной мощности машины:

1,2 – механизм поворота с дискретными свойствами;

3,4 – механизм поворота с непрерывными свойствами

# Математическая модель движения машины относительно подвижной системы координат



$$\left\{ \begin{aligned} m\ddot{x} + m\dot{y}\dot{\phi} &= mg(f_D - f_c) \\ m\ddot{y} - m\dot{x}\dot{\phi} + \frac{\dot{\phi}}{\dot{x}} \sum_{i=1}^n C_{y_i}(l_i - \chi) + \theta \sum_{i=1}^n C_{y_i} &= 0 \\ \ddot{\phi} I_z + \frac{\dot{\phi}}{\dot{x}} \sum_{i=1}^n C_{y_i} (l_i - \chi)^2 + \theta \sum_{i=1}^n C_{y_i} (l_i - \chi) &= M_n \end{aligned} \right.$$

$$M_c = \frac{\dot{\phi}}{\dot{x}} \sum_{i=1}^n C_{y_i} l_i^2$$

- момент сопротивления повороту

$$k = \frac{(\tan \theta_6 - \tan \theta_1)}{L}$$

- кривизна траектории

$$\chi = \frac{\dot{x}^2 k L}{2\mu g}$$

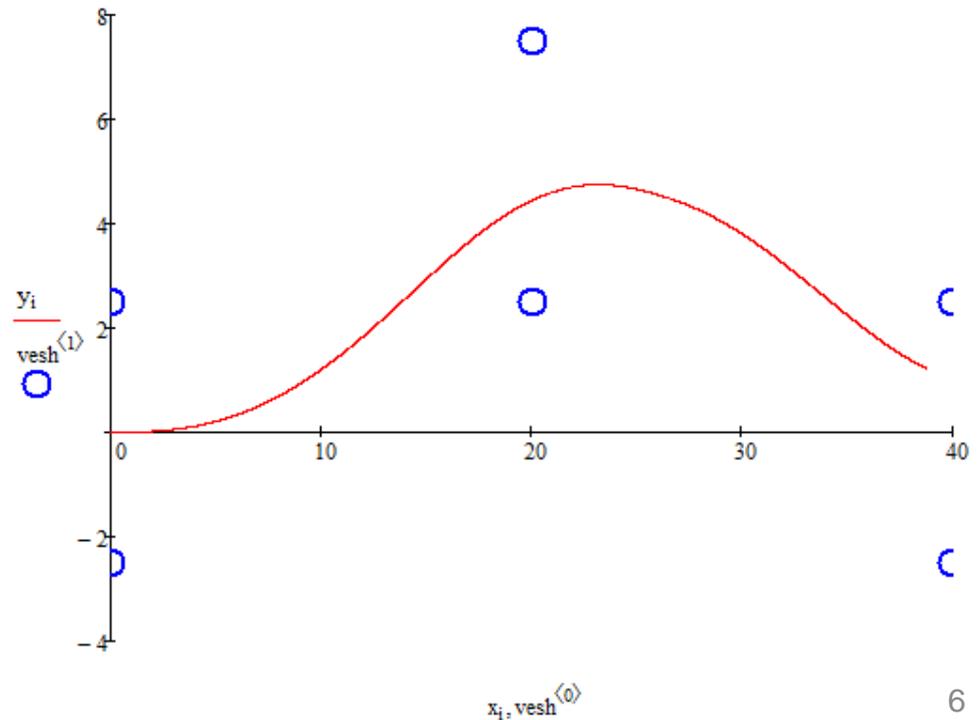
- смещение полюса поворота



# Система уравнений для перехода из подвижной системы координат в неподвижную

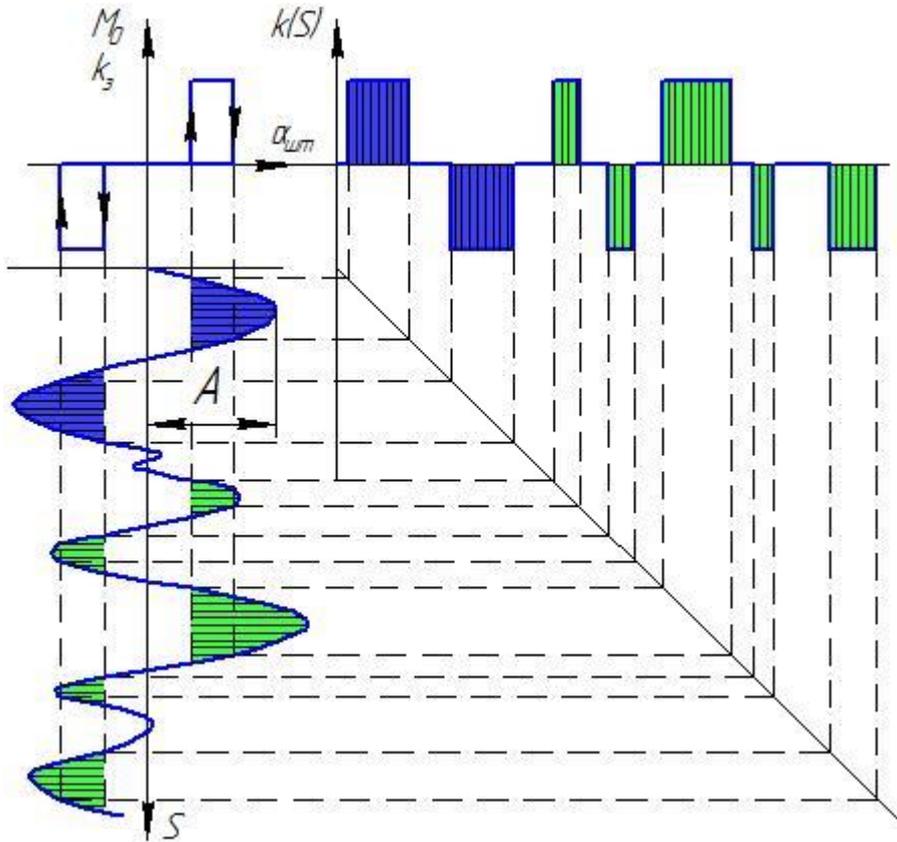
$$\begin{cases} x = \int_0^t (V_{CX} \cdot \cos\beta - V_{CY} \cdot \sin\beta) dt \\ y = \int_0^t (V_{CX} \cdot \sin\beta + V_{CY} \cdot \cos\beta) dt \\ \beta = \int_0^t \omega_z dt \end{cases}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО  
ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО  
КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ  
(ТЕСТОВАЯ «ЗМЕЙКА»)





# Формирование управляющего воздействия в нелинейной системе управления поворотом с дискретными свойствами



Вид управляющей функции

$$k_3 = \phi(k_0(s)) = \begin{cases} 0, \\ |k_1| \end{cases}$$

Кусочно-линейная форма

$$K_3(\alpha_{шт}) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq \phi \leq \phi_1; \\ k_1, & \text{при } \phi_1 < \phi \leq \phi_2; \\ 0, & \text{при } \phi_2 < \phi \leq \pi + \phi_1; \\ -k_1, & \text{при } \pi + \phi_1 < \phi \leq 2\pi - \phi_2; \\ 0, & \text{при } 2\pi - \phi_2 < \phi \leq 2\pi. \end{cases}$$

При приближенном решении управляющая функция определяется по уравнению:

$$k_3(\alpha_{шт}) = e^{-\tau \cdot s} (q + q') \cdot \alpha_{шт}$$

где  $q$  и  $q'$  – коэффициенты гармонической линеаризации:

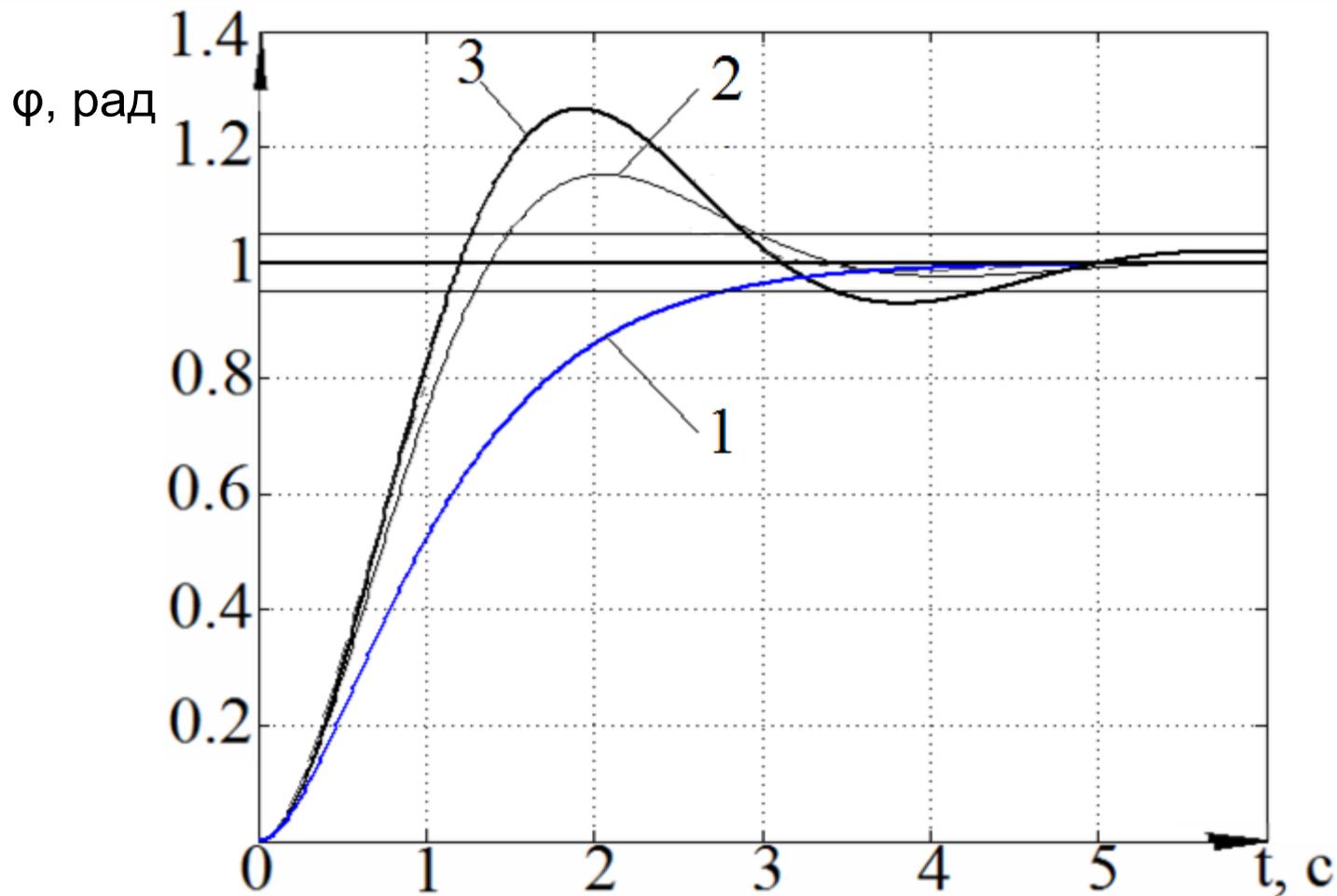
$$q(A) = \frac{2 \cdot c}{\pi \cdot A} \cdot \left( \sqrt{1 - \frac{b^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{m^2 \cdot b^2}{A^2}} \right)$$

$$q'(A) = \frac{2 \cdot c \cdot b}{\pi \cdot A^2} \cdot (1 - m), \text{ при } A > b$$

Модель позволяет определить:

- изменение кинематических параметров при криволинейном движении (угловую скорость, кривизну траектории, смещение полюса поворота),
- силовые (силы тяги на ведущих колесах т.е. момент сопротивления и поворачивающий),
- фазово-частотную характеристику,
- качество переходных процессов.

# Анализ качества переходных процессов в зависимости от скорости движения и вида грунт



1 – деформируемый грунт  $V=10$  м/с; 2 – деформируемый грунт  $V=15$  м/с;  
3 – твердый грунт  $V=15$  м/с.

Целью экспериментального исследования быстроходной гусеничной машины являлась идентификация параметров системы, оценка адекватности математической модели объекта и корректности принятых допущений.

При этом решались следующие задачи:

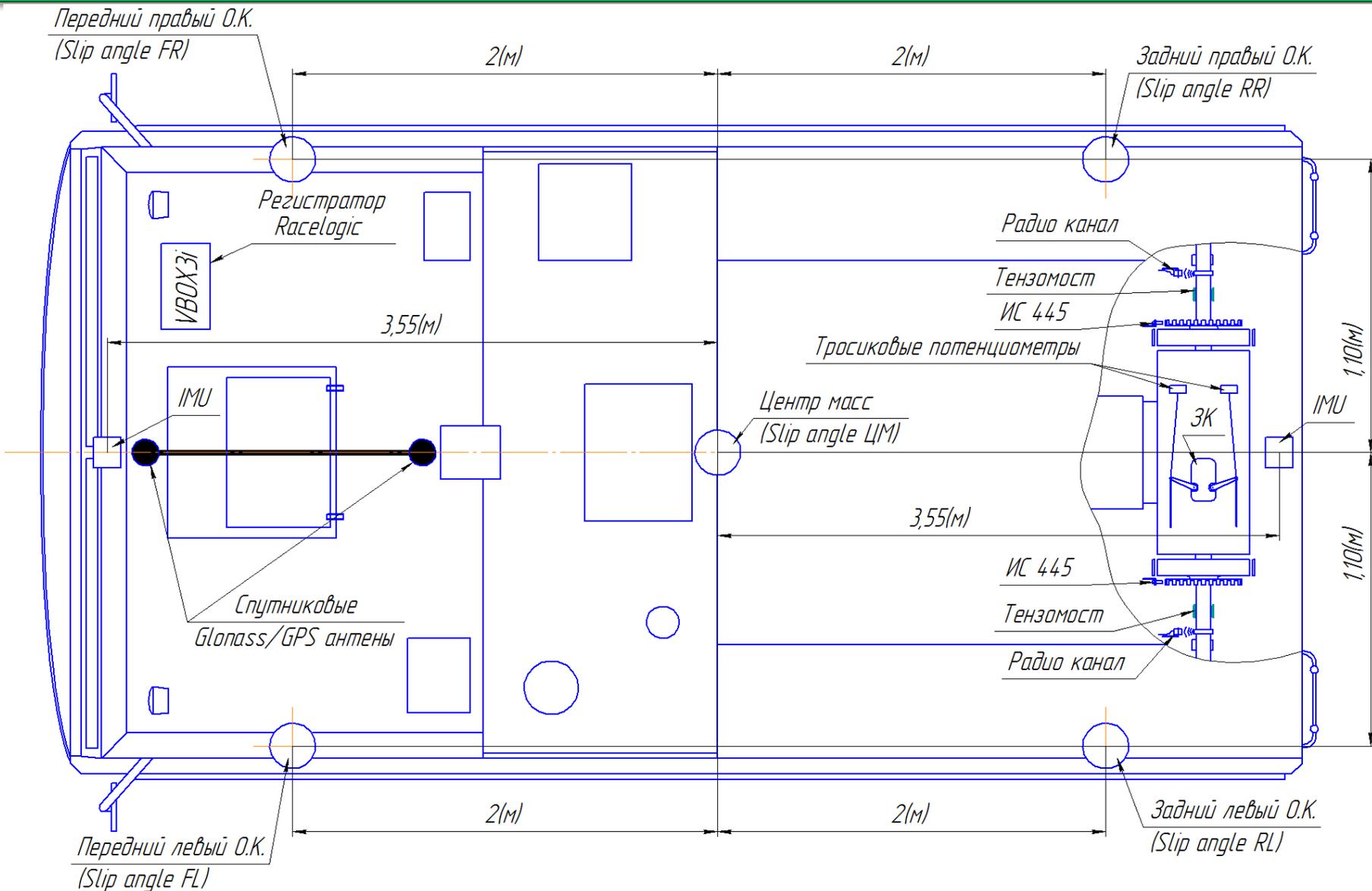
- 1) экспериментальное измерение угловой скорости поворота машины, кривизны траектории, и величину продольного смещения полюса поворота при движении БГМ по «тестовой змейке», а также параметры не линейности характеристики системы управления поворотом;
- 2) определение величины поворачивающего момента с учетом углового ускорения корпуса машины и значения коэффициента сопротивления уводу по углам скольжения крайних опорных катков.
- 3) оценка адекватности математической модели плоскопараллельного движения и корректности принятых допущений.

# Объект экспериментального исследования Роботизированный комплекс на базе ТМ-140



Параметр	Значение
Масса	$12 \cdot 10^3$ кг
Удельная мощность	14.1 кВт/т
Угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси	1.1 рад/с
Момент инерции вокруг вертикальной оси	$31.5 \cdot 10^3$ кг*м <sup>2</sup>
Число осей опорных катков	6 шт.
Максимальная линейная скорость	15м/с
Тип системы управления поворотом	С дискретными свойствами, планетарный механизм поворота управляемый фрикционными элементами

# Аппаратура установленная на машине

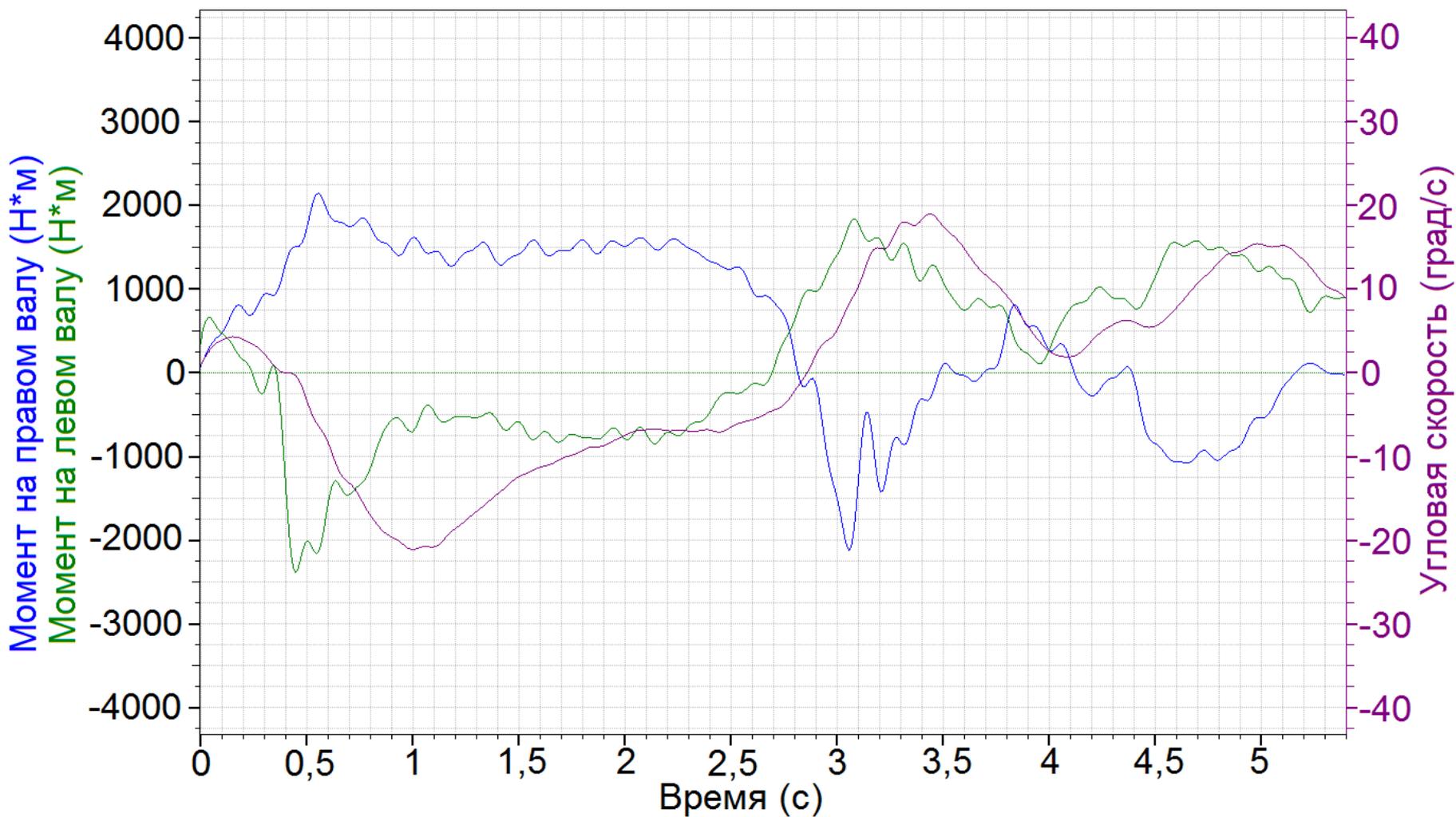


# Общий вид тестовой трассы из движущейся машины

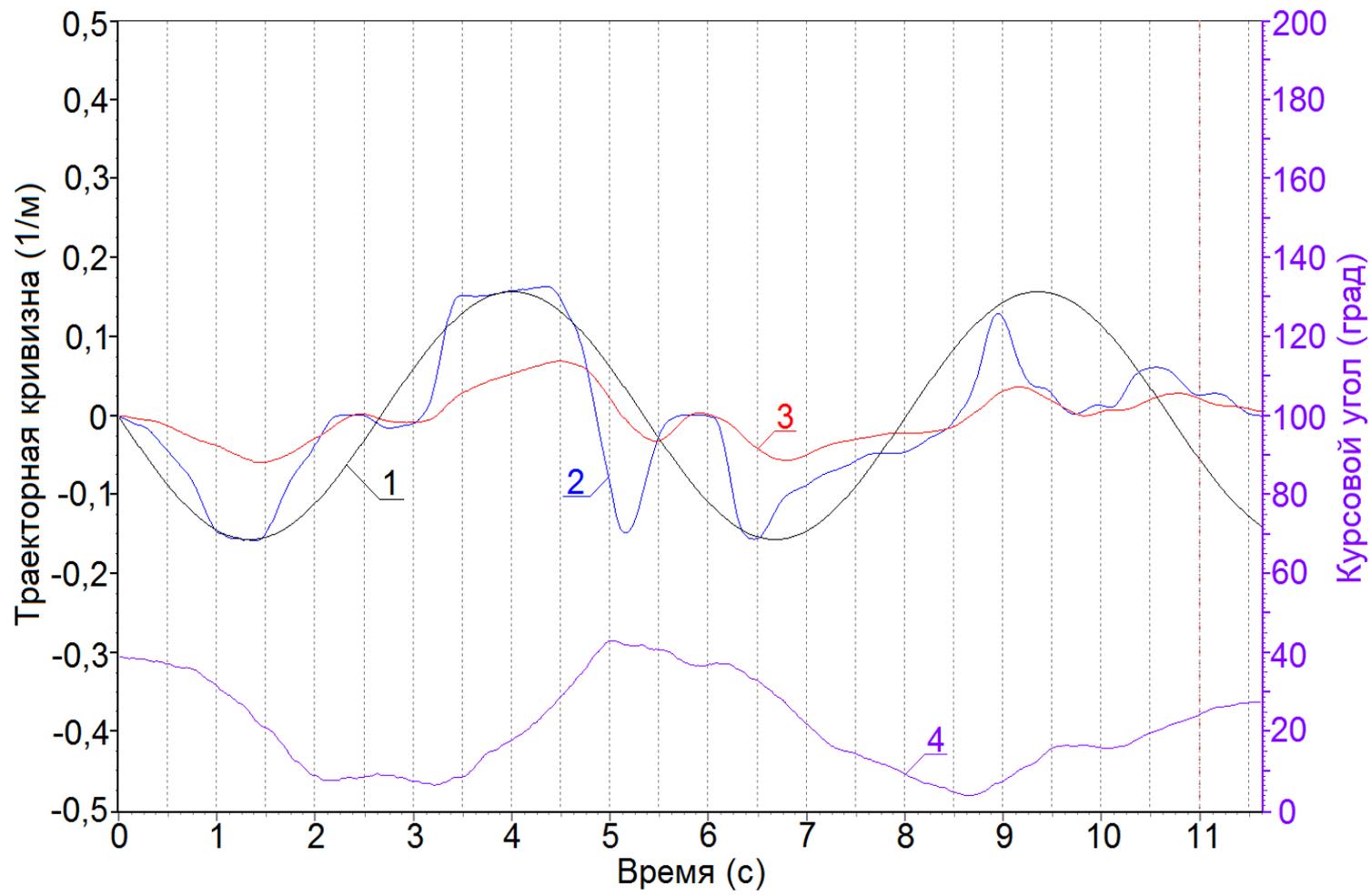




# Изменение кинематических и силовых параметров при повороте машины



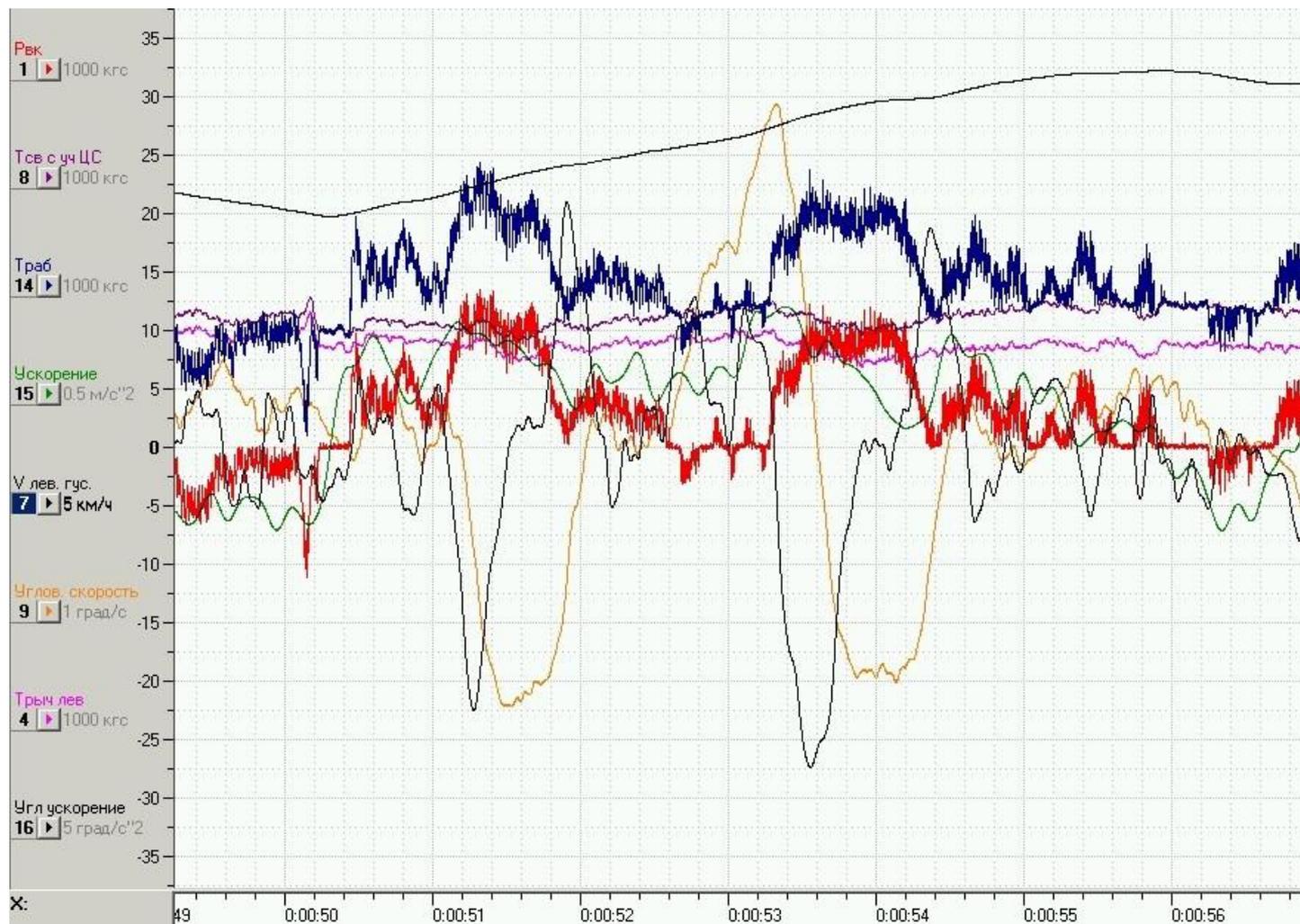
# Изменение кривизны траектории при повороте машины



1 – траекторная кривизна (черный); 2 – теоретическая кривизна, рассчитанная по оборотам грузовых валов (синий); 3 – фактическая кривизна (красный);  
4 – курсовой угол (фиолетовый)

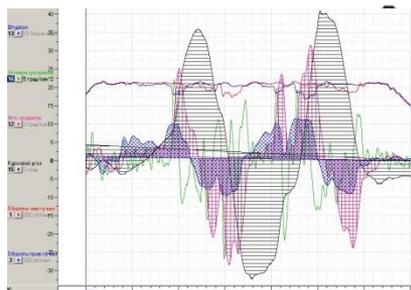
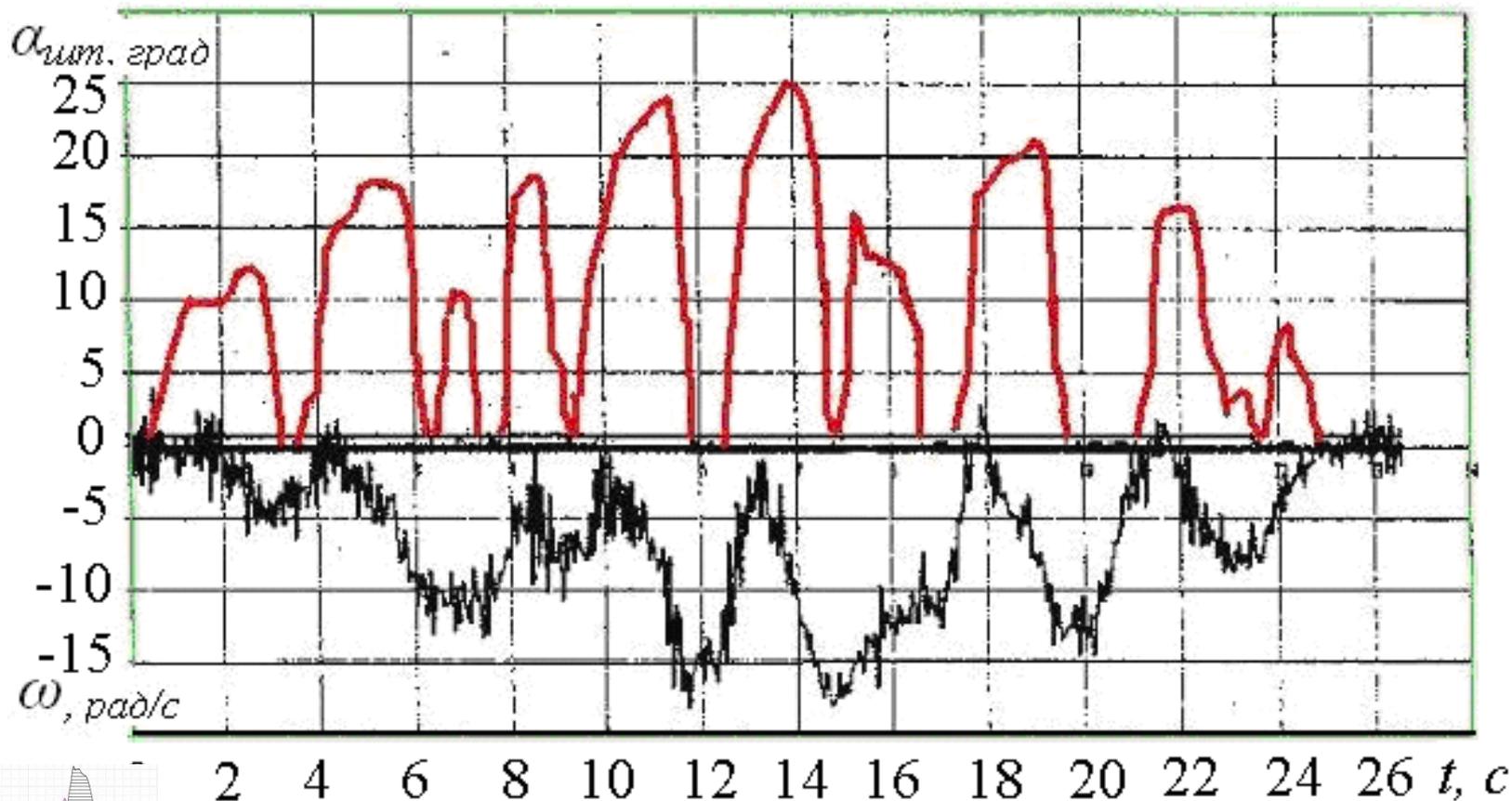


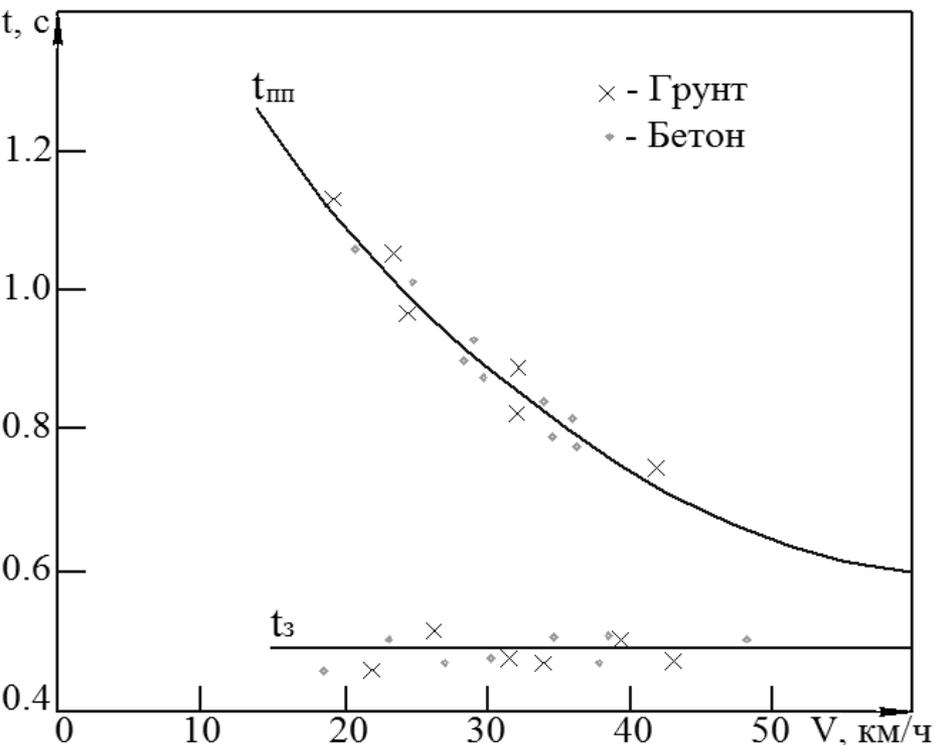
# Изменение параметров при движении гусеничной машины со ступенчатым механизмом поворота по твердому грунту





# Изменение кинематических параметров при движении на затяжных поворотах ограниченной кривизны

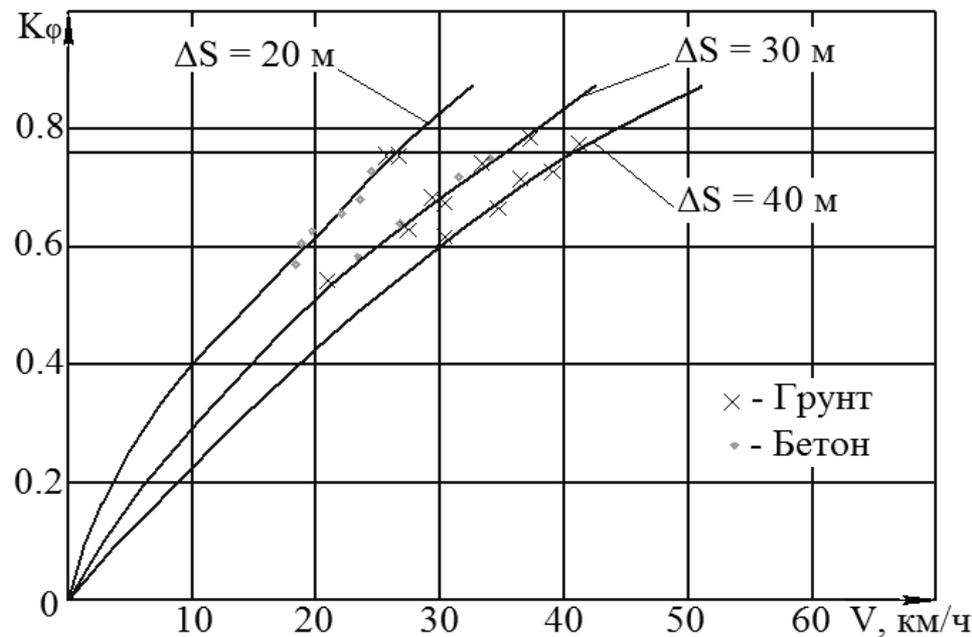




Зависимость длительности процессов от скорости движения

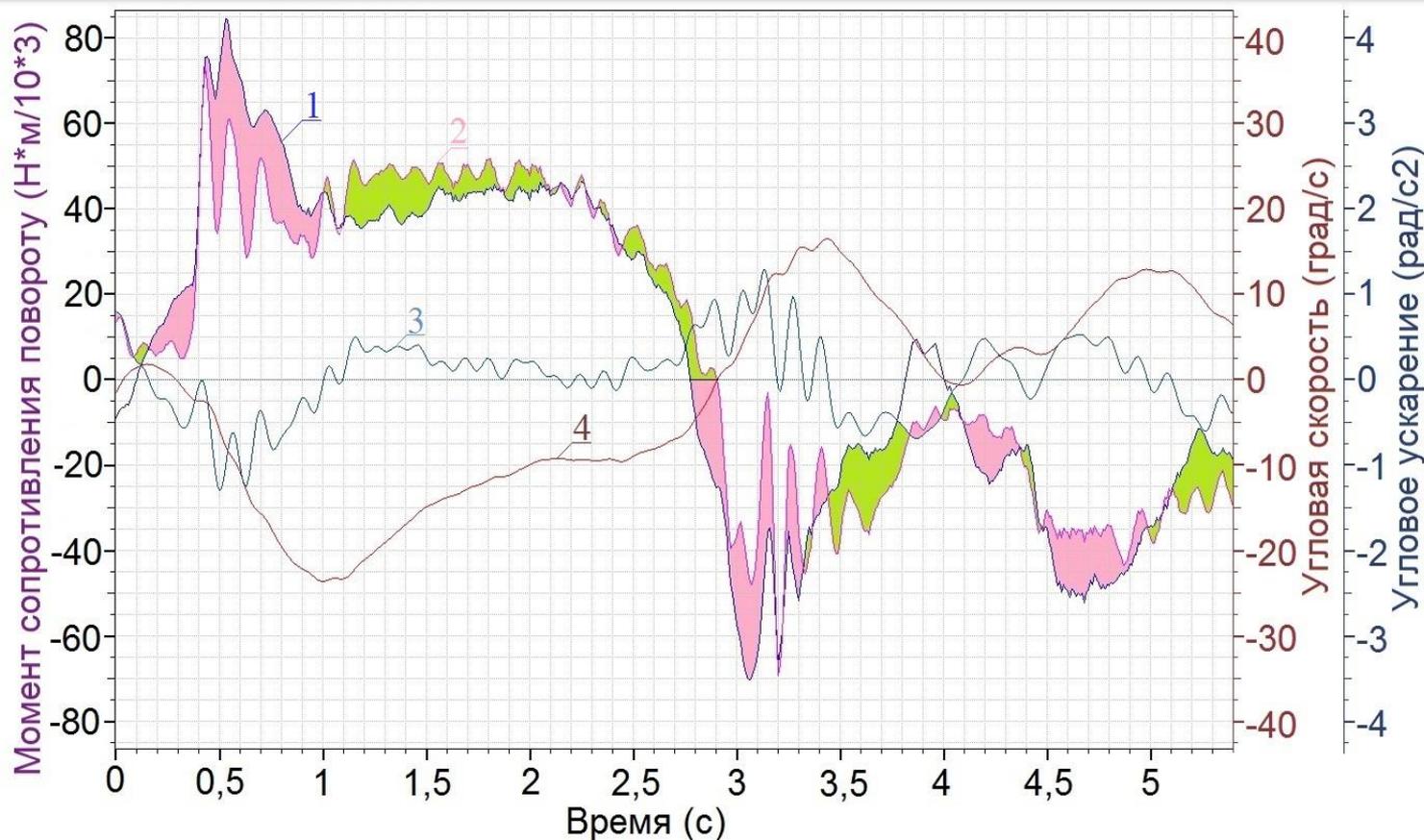
Критерием сложности управления принимается коэффициент фазовой напряженности регулирования направлением движения:

$$K_{\varphi}(v) = \frac{\varphi}{\pi}$$



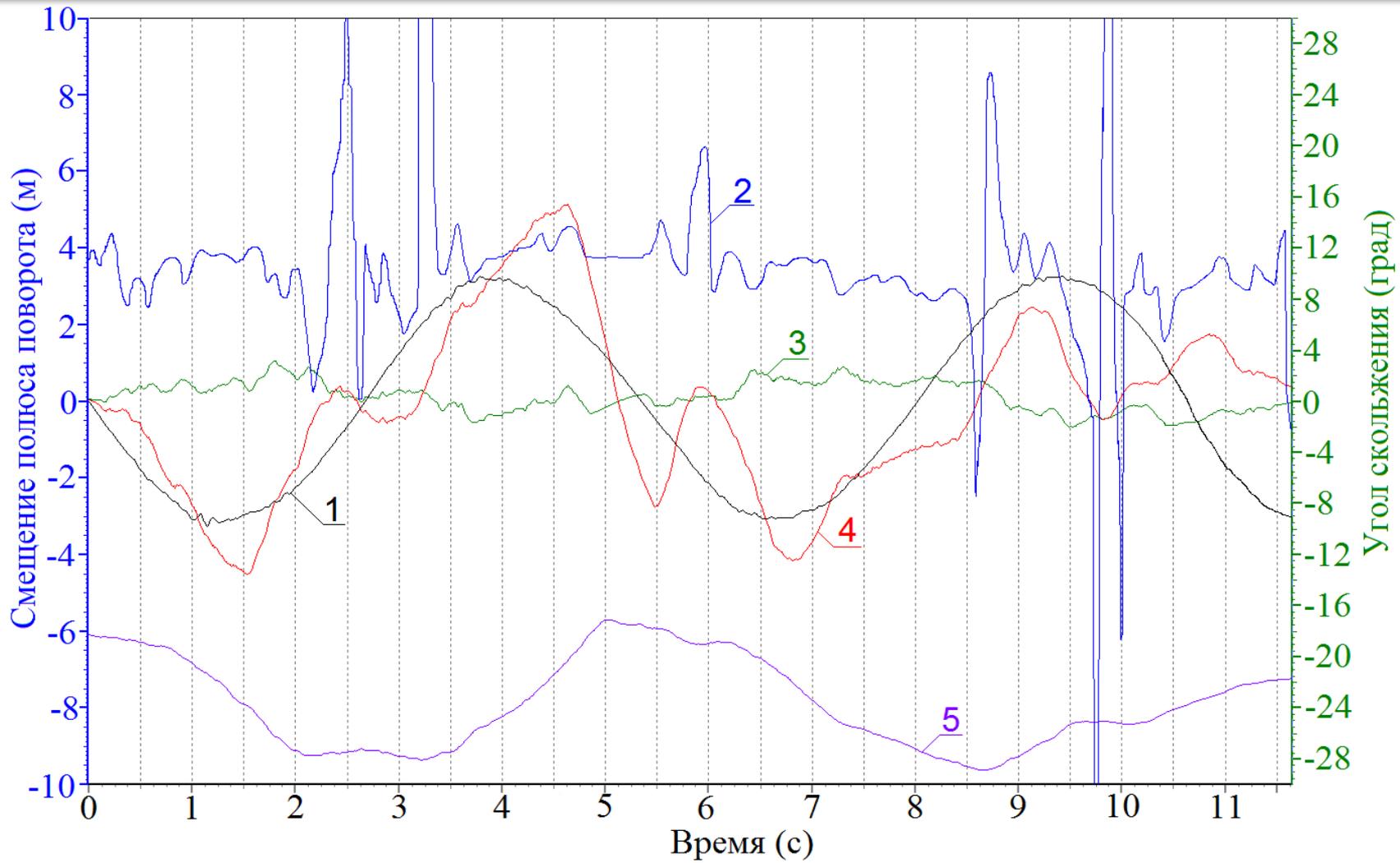
Зависимость коэффициента фазовой напряжённости от скорости движения

# Фрагмент осциллограммы, характеризующий изменение момента сопротивления повороту машины



1 – суммарный момент сопротивления повороту (синий); 2 – момент сопротивления повороту, формируемый взаимодействием гусеничного движителя с опорной поверхностью (без учета инерционной составляющей - розовый); 3 – угловое ускорение машины (серый); 4 – угловая скорость поворота машины (коричневый).

# Изменение кинематических параметров



1 – траекторное значение смещения полюса поворота (черный); 2 – экспериментальное значение смещения полюса поворота (синий); 3 – угол скольжения передних опорных катков (зеленый); 4 – угол скольжения задних опорных катков (красный); курсовой угол (фиолетовый).

# Определение коэффициента сопротивления уводу

$$C_y = \frac{\partial P_y}{\partial \theta}$$

Формула для определения коэффициента сопротивления уводу  
по экспериментальным данным

$$C_y = \frac{M_{\Pi}}{k \sum_{i=1}^n l_i^2 + \theta \sum_{i=1}^n l_i}$$

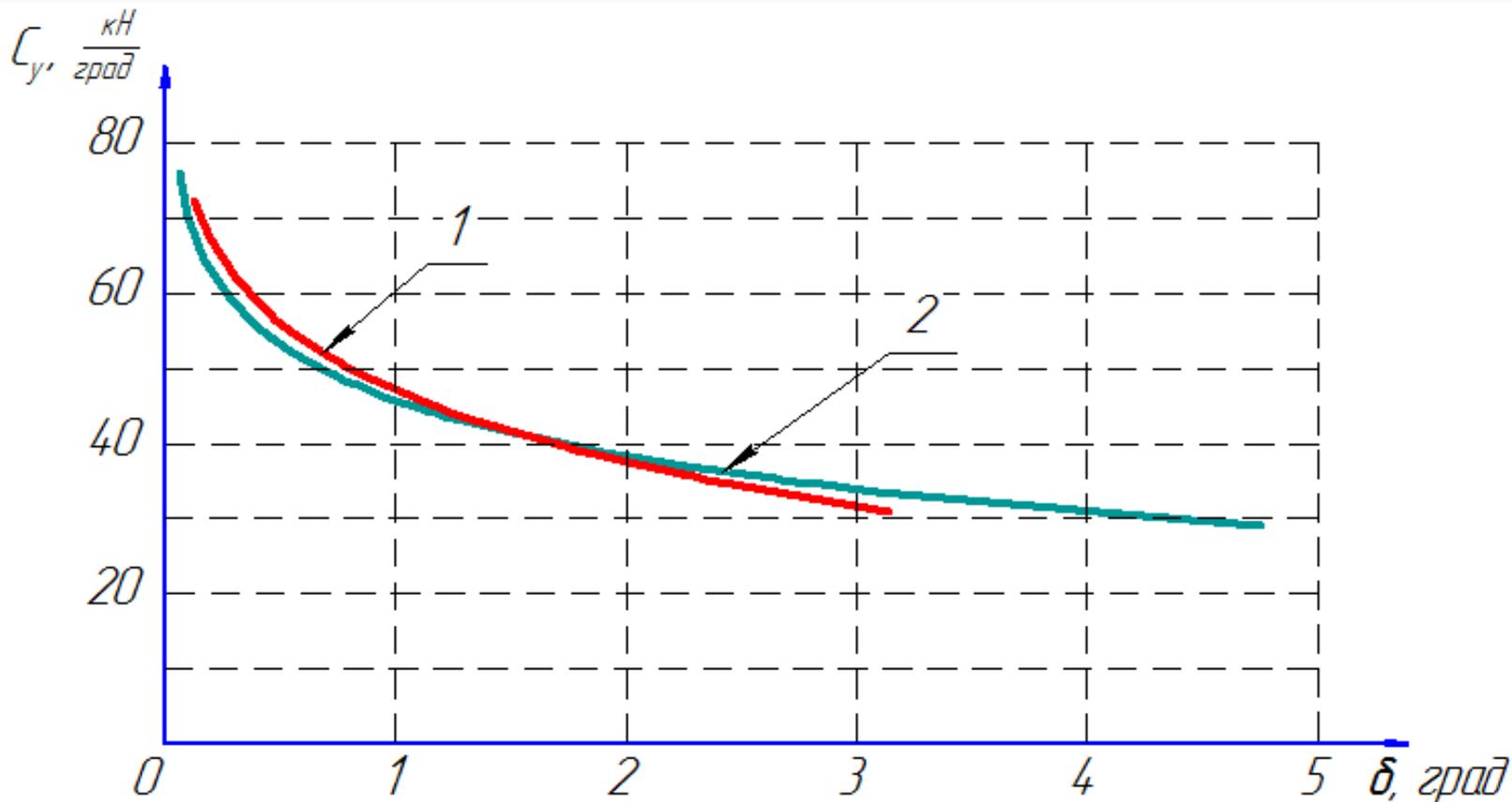
УРАВНЕНИЕ, ОПИСЫВАЮЩЕЕ АППРОКСИМИРУЮЩУЮ ФУНКЦИЮ

$$C_y(\delta) = a \cdot \delta^b + c$$

a, b, c – коэффициенты, полученные при аппроксимации



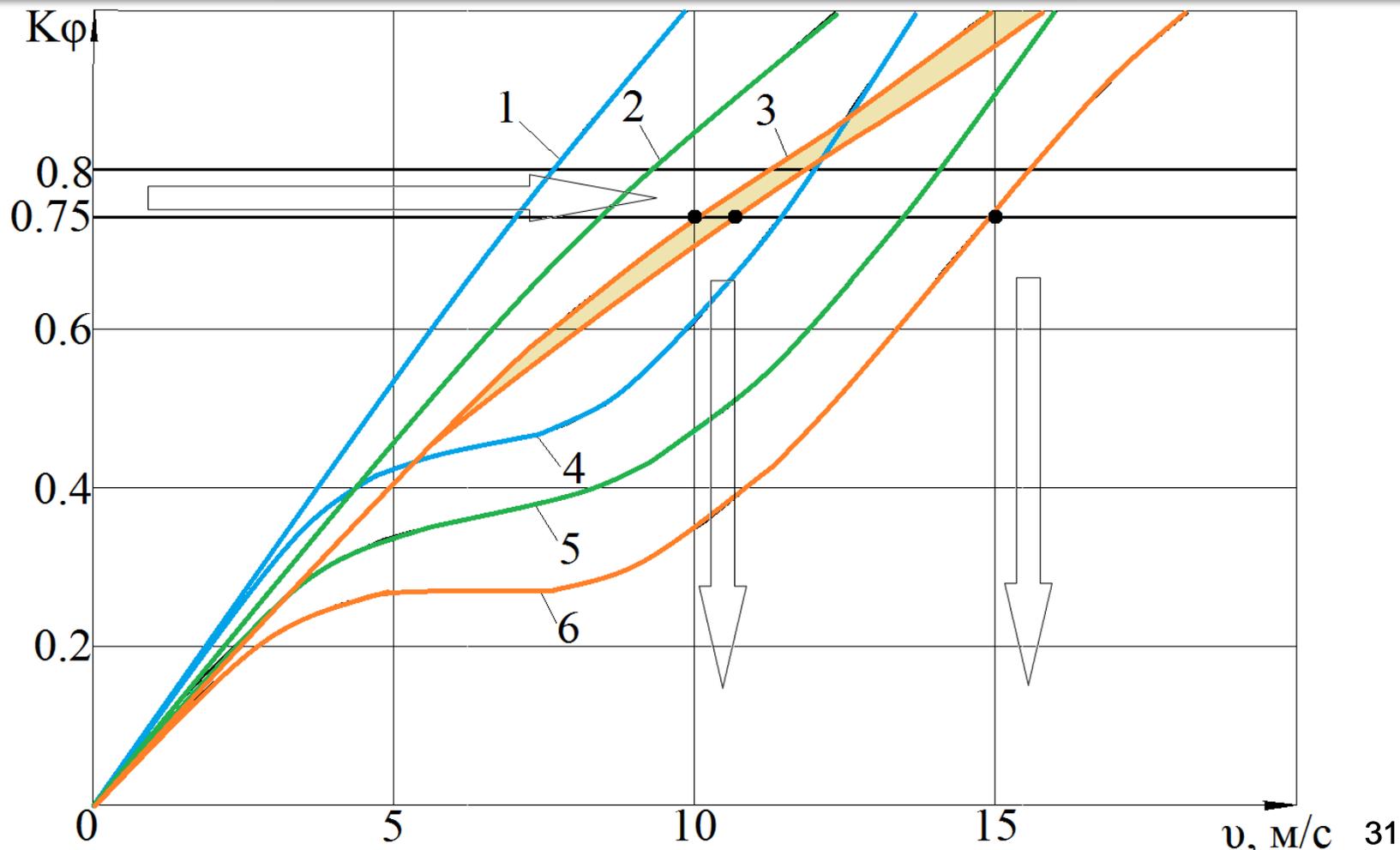
# Результаты определения зависимости коэффициента сопротивления уводу от угла увода для грунтов



1 – дернистый грунт, 2 – песчаный грунт

# Прогнозирование подвижности БГМ по коэффициенту фазовой напряжённости от скорости движения:

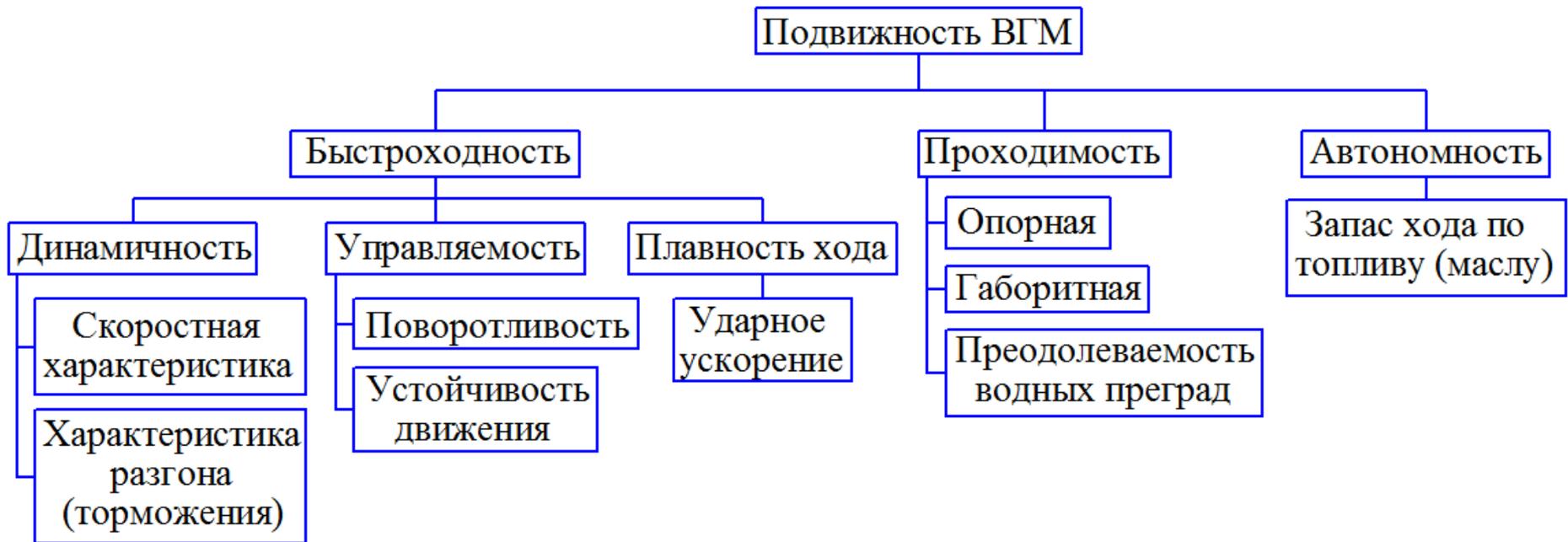
1, 2, 3 – исходная система, 4, 5, 6 – с учетом предложенных мероприятий

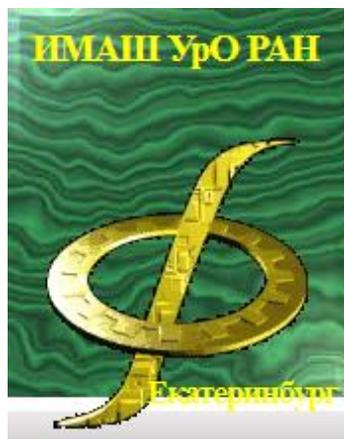


Скорость управляемого движения выросла с 10 м/с до 15 м/с при  $\Delta S = 40$  м

1. Благодаря теоретическими и экспериментальными исследованиями **уточнены и получены новые математические зависимости кинематических, силовых и динамических параметров, характеризующих управляемое движения БГМ.**
2. На основе верификации результатов моделирования по уточненной математической модели с экспериментально полученными данными **установлена степень достоверности, корректности допущений и начальных условий, принимаемых при теоретическом исследовании динамики управляемого движения.**
3. При использовании новых информационных технологий разработан высокоточный метод экспериментального определения кинематических параметров, характеризующих траекторию и боковое движение: угловая скорость ( $\omega$ ), углы увода крайних опорных катков ( $\theta$ ), продольное смещение полюса поворота ( $\chi$ ) боковые ускорения и установлены их зависимости как функции со смещением. **Расчетные значения параметров отличаются от действительных в 1,5...2 раза вследствие случайностей и трудно формализуемых процессов юза и буксования движителей.**
4. Разработанный метод экспериментального определения кинематических и динамических параметров, характеризующих особенности плоскопараллельного движения гусеничной машины, который с высокой эффективностью может быть использован при разработке систем управления движением РТК, создаваемых на базе быстроходных гусеничных машин.

# Подвижность ВГМ





**Спасибо за внимание!**