

**СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ  
СТРУКТУР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОРАБЕЛЬНЫХ  
МНОГОАГРЕГАТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И РАЗРАБОТКИ  
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЁРОВ**

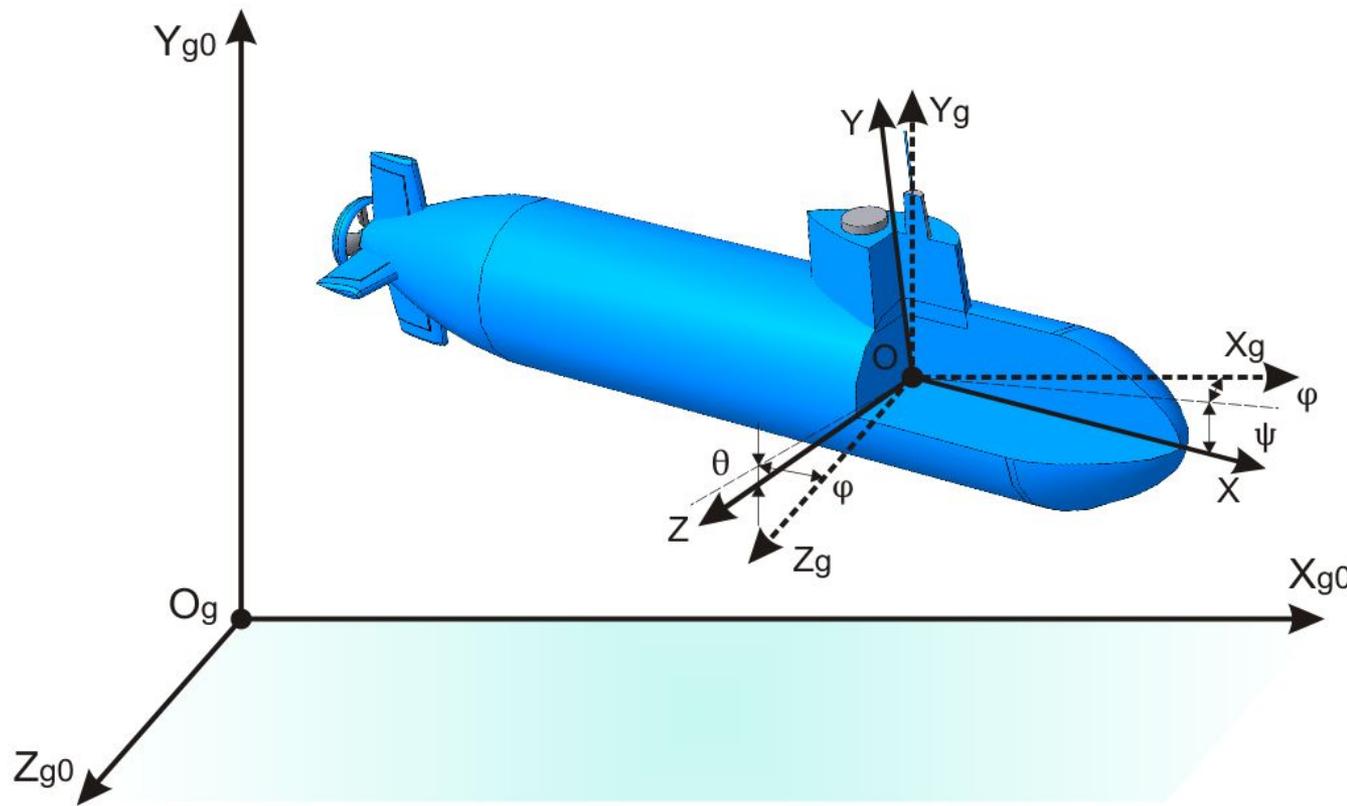


Изучение специфические особенности ПА как объекта оптимального управления и синтез функционально-алгоритмических структур ИУС координированного управления рулевыми органами и силовой установкой

# Цели и задачи

- Анализ предельных возможностей и свойств исследуемой модели подводного аппарата (ПА) как объекта оптимального управления
- Сравнительный анализ процессов пространственного маневрирования в горизонтальной плоскости для ПА и летательных аппаратов
- Синтез на основе полученных результатов различных вариантов функциональной и алгоритмической структур оптимального управления процессами пространственного маневрирования ПА в экстремальных ситуациях с организацией скоординированных воздействий на силовую установку аппарата (двигательно-двигательный комплекс - ДДК) и рулевые устройства (рулевые машины) вертикальных (ВР) и горизонтальных (ГР) рулей при обеспечении условий безопасности плавания, заданных в виде ограничений на потенциально опасные координаты объекта - крен и дифферент (тангаж).

# Системы координат пространственного движения подводного аппарата



Связанная и  
земная  
«неподвижная»  
системы  
координат

# Критерии оптимизации

- Минимум радиуса циркуляции при пространственном маневре в горизонтальной плоскости.
- Минимизация времени выхода на заданный курс
- Соблюдение наложенных ограничений на опасные координаты - крен и дифферент

# Модель ПА

Уравнения сил:

$$\frac{dV_x}{dt} = -2,2 \cdot W_y \cdot V_z + 2,1 \cdot W_z \cdot V_y + 0,003 \cdot n \cdot n - 0,001 \cdot V_x \cdot V_x$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_y}{dt} = & 1,02 \cdot W_x \cdot V_z - 1,0365 \cdot W_x \cdot W_y - 0,0015 \cdot \psi - \\ & - 0,0057 \cdot V_x \cdot V_y - 0,00186 \cdot D_g \cdot V_x \cdot V_x - 0,3375 \cdot V_x \cdot W_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_z}{dt} = & -0,97 \cdot W_x \cdot V_y + 0,45 \cdot W_y \cdot V_z - 0,007 \cdot V_x \cdot V_z - 0,23 \cdot V_x \cdot W_y - \\ & - 0,00086 \cdot D_v \cdot V_x \cdot V_x \end{aligned}$$

# Модель ПА

Уравнения моментов:

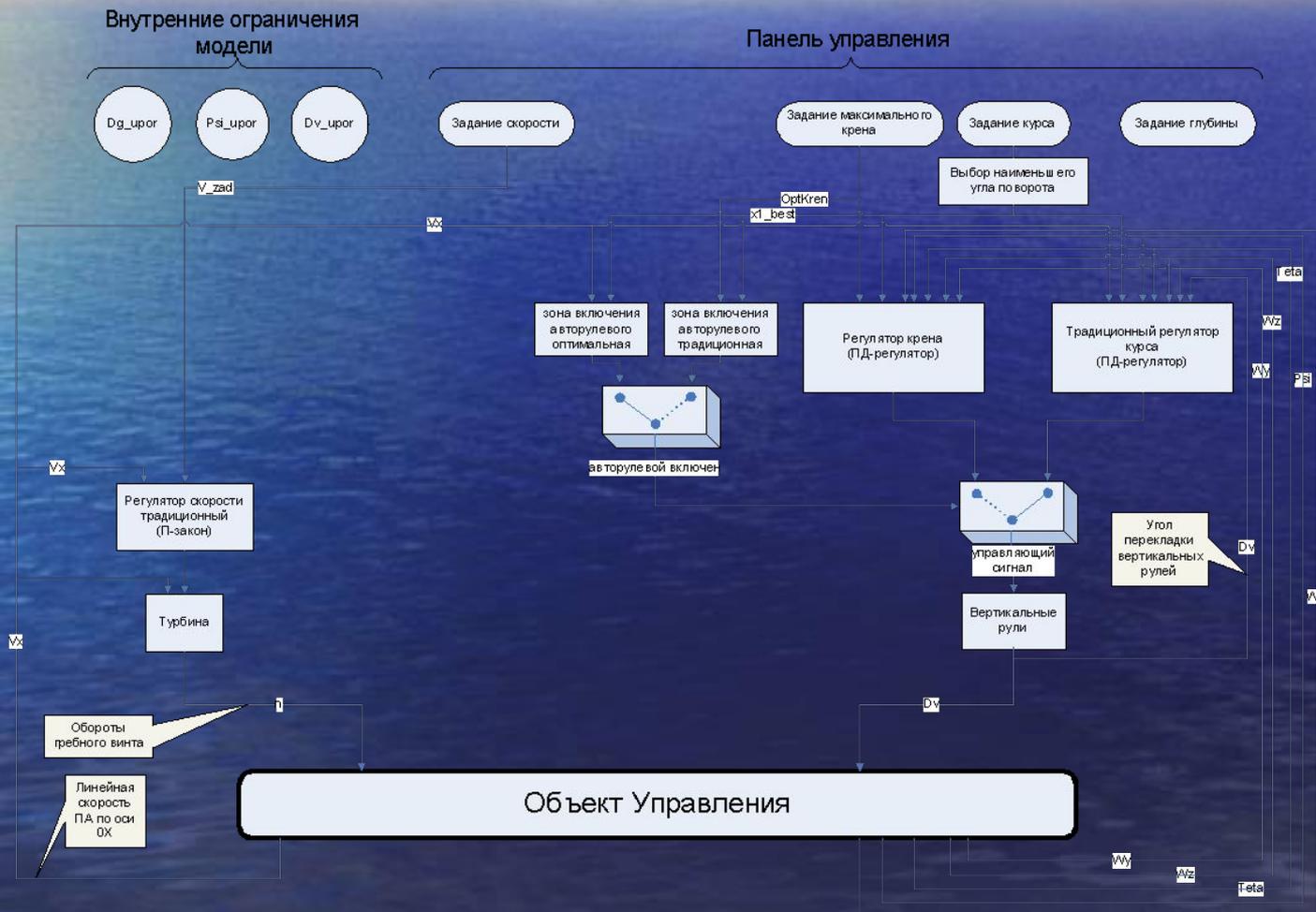
$$\frac{dW_y}{dt} = 0,86 \cdot W_z W_x + 0,0003 \cdot V_x \cdot V_z - 0,018 \cdot V_x \cdot W_y - \\ - 0,00007 \cdot D_v \cdot V_x \cdot V_x$$

$$\frac{dW_x}{dt} = 0,485 \cdot W_x \cdot V_y + 0,0043 \cdot D_v \cdot V_x \cdot V_x - 0,24 \cdot V_x \cdot W_x - \\ - 0,00024 \cdot W_x \cdot |W_x| - 1,2 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_x \cdot W_y - 0,0085 \cdot V_x \cdot V_z$$

$$\frac{dW_z}{dt} = -1,1517 \cdot W_x \cdot W_y + 0,00029 \cdot V_x \cdot V_y - 0,0305 \cdot V_x \cdot W_z - 0,0017 \cdot \psi - \\ - 0,00016 \cdot D_g \cdot V_x \cdot V_x + 0,001736 \cdot W_x \cdot V_z$$

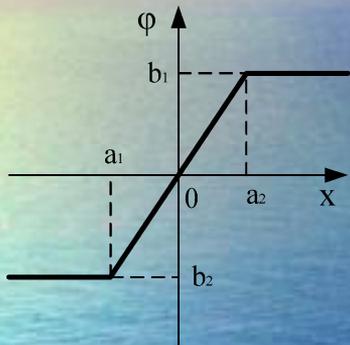
# Создание моделирующего комплекса в среде «МВТУ»

Структура управления:



# Нелинейности в моделях устройств

## Скоростная характеристика сервомотора без зоны нечувствительности



предикатное описание:

$$\varphi = \begin{cases} b_2, & x < a_1 \\ kx, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ b_1, & x > a_2 \end{cases}$$

$$k = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1};$$

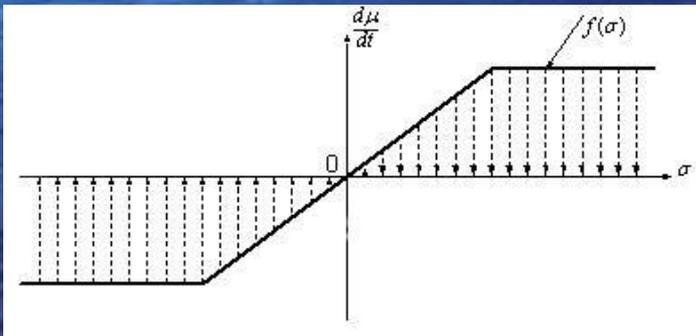
оператор В.Н.

Козлова:

$$\varphi = b_2 + \frac{k}{2} (|x - a_1| - |x - a_2| - a_1 + a_2);$$

$$f(\sigma) = -\bar{x} + K \cdot (|\sigma + \bar{x}| - |\sigma - \bar{x}| + 2 \cdot \bar{x}) \cdot \frac{1}{2}.$$

## Динамическая нелинейная характеристика типа «упор»:



предикатное описание;

$$\underline{\mu} \leq \mu \leq \bar{\mu}$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \begin{cases} f(\sigma) & \begin{cases} \text{if } \underline{\mu} \leq \mu < \bar{\mu} & \text{and } \sigma > 0; \\ \text{if } \underline{\mu} < \mu \leq \bar{\mu} & \text{and } \sigma < 0; \end{cases} \\ 0 & \begin{cases} \text{if } \mu = \bar{\mu} & \text{and } \sigma > 0; \\ \text{if } \mu = \underline{\mu} & \text{and } \sigma < 0. \end{cases} \end{cases}$$

оператор В.Н.

Козлова:

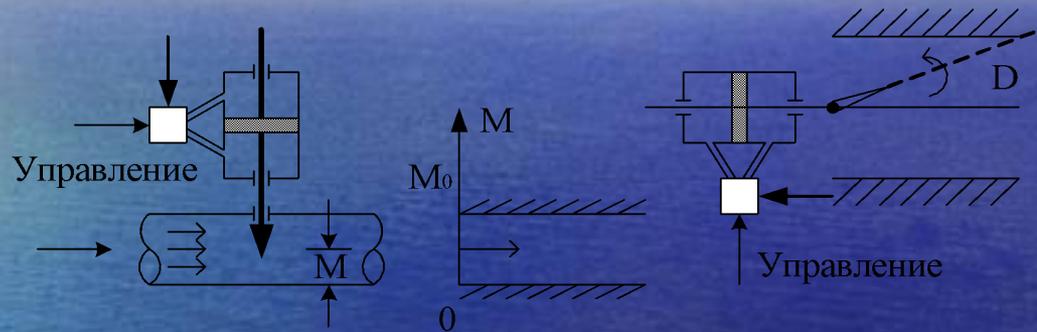
$$\frac{d\mu}{dt} = [(1 - \varphi_i) + v \cdot (\varphi_i - \varphi_a)] \cdot f(\sigma),$$

$$\varphi_i(\mu) = \frac{1}{2} \cdot (1 - \text{Sign}(\mu - \underline{\mu}));$$

$$\varphi_a(\mu) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{Sign}(\mu - \bar{\mu}));$$

$$v(\sigma) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{Sign}(\sigma));$$

# Математическая модель гидравлического сервопривода регулирующего клапана турбины



$$\frac{d\mu}{dt} = [(1 - \varphi_i) + v \cdot (\varphi_i - \varphi_a)] \cdot f(\sigma),$$

где  $\phi_H$ ,  $\phi_B$  и  $v$  вычисляются по формулам:

$$\varphi_i(\mu) = \frac{1}{2} \cdot (1 - \text{Sign } \mu) \quad ;$$

$$\varphi_a(\mu) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{Sign}(\mu - \mu_0)) ;$$

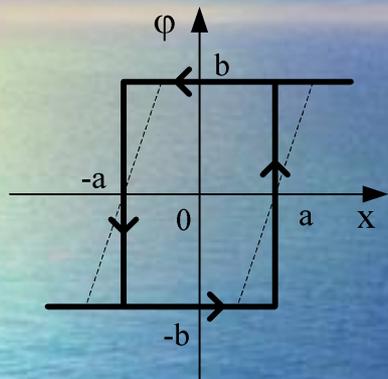
$$v(\sigma) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{Sign} \sigma).$$

# Модель рулевой машины - нелинейное динамическое звено типа «упор»

Уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dD}{dt} = [(1 - \varphi_H) + \nu(\varphi_H - \varphi_B)] \cdot F_D(\sigma), \quad \boxtimes \\ \varphi_H(D) = (1 - \text{sign}(D)) \cdot \frac{1}{2}, \\ \varphi_B(D) = (1 - \text{sign}(D - D_0)) \cdot \frac{1}{2}, \\ \nu(\sigma) = (1 + \text{sign}(\sigma)) \cdot \frac{1}{2} \end{array} \right.$$

# Элемент – Динамическое нелинейное звено типа «Гистерезис»



$$\frac{dP}{dt} = M(y + (|y-a| - |y+a|)\frac{1}{2}),$$

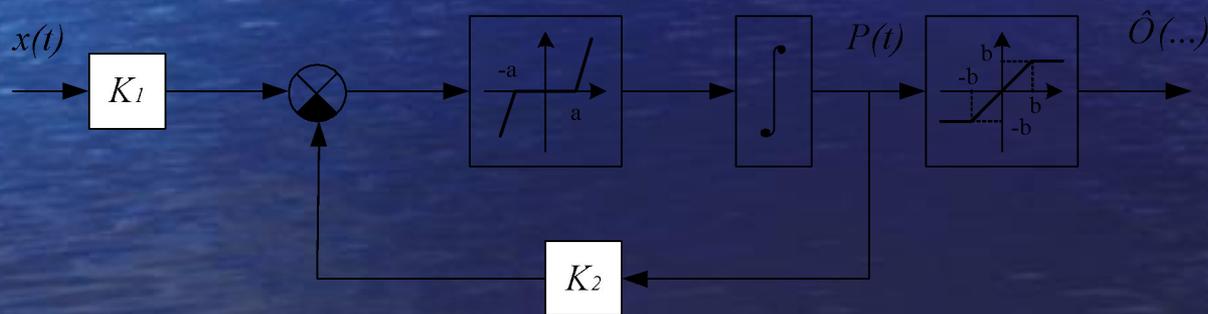
$$y = K_1 x(t) - K_2 P(t),$$

$$\varphi = (|P(t) + b| - |P(t) - b|)\frac{1}{2},$$

$$M \gg 1 \quad (10^{-8}) \quad K_2 \ll K_1$$

$$K_1 = 1, K_2 = 0,01$$

Структурное представление гистерезисного звена



# Реализация в МВТУ

The image displays a MATLAB/Simulink workspace with three windows:

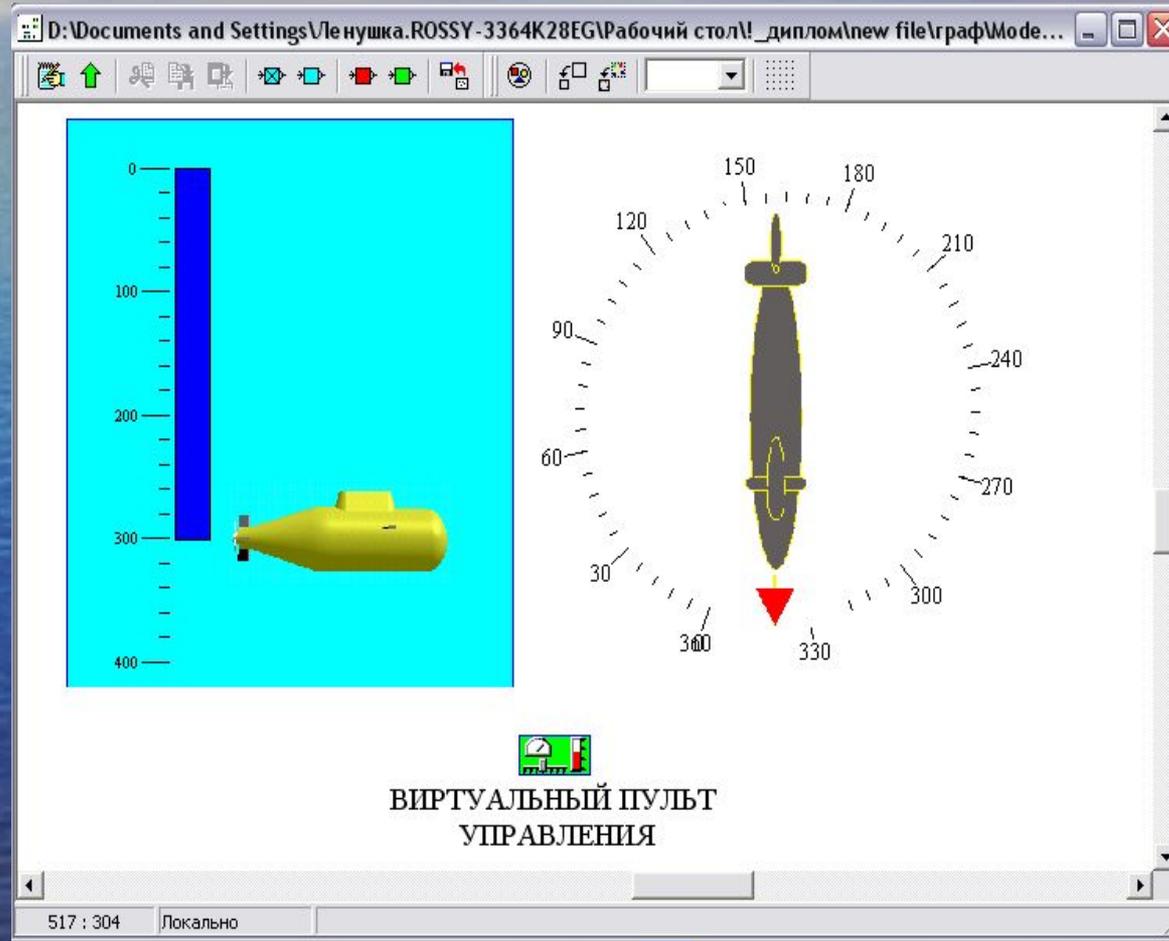
- Top window:** A Simulink model showing three interconnected blocks labeled 'M'.
- Middle window:** A Simulink model titled "Ограничение угла поворота вертикальных и горизонтальных рулей в 30 градусов". It features a control block with inputs for  $Dv\_upor$  and  $Dg\_upor$ , and outputs for  $OptMan$ ,  $OptKren$ , and  $Psi\_upor$ . A note indicates "Ограничение дифференциала в 20 градусов".
- Bottom window:** A "Редактор интерпретатора математических функций" (MATLAB Function Editor) containing the following code:

```
input Fi, Dv, Dg, Dv_upor, Dg_upor, n;  
  
{Ввод начальных условий}  
init Ksi=0, Psi=0, Teta=0, {Vx=1}Vx=14, Vy=0, Vz=0, Wx=0, Wy=0, Wz=0, Zit=0;  
  
{Уравнения сил}  
Vx'=-2.2*Wy*Vz+2.1*Wz*Vy+0.003*n-0.001*Vx*Vx;  
{Экспериментально}  
{Vx'=1/(52.3);}  
{Vx'=0.01;}  
Vy'=1.02*Wx*Vz-1.0365*Wx*Wy-0.0015*Psi-0.0057*Vx*Vy-0.001859*Dg*Vx*Vx-0.3375*Vx*Wz;  
Vz'=-0.97*Wx*Vy+0.45*Wy*Vz-0.007*Vx*Vz-0.23*Vx*Wy-0.00086*Dv*Vx*Vx;  
  
{Уравнения моментов}  
Wx'=0.485*Wx*Vy+0.0043*Dv*Vx*Vx-0.24*Vx*Wx-0.00024*Wx*abs(Wx)-1.2*Teta+0.01*Vx*Wy-0.0085*Vx*Vz;  
Wy'=0.86*Wz*Wx+0.0003*Vx*Vz-0.018*Vx*Wy-0.00007*Dv*Vx*Vx;  
Wz'=-1.1517*Wx*Wy+0.00029*Vx*Vy-0.0305*Vx*Wz-0.0017*Psi-0.00016*Dg*Vx*Vx+0.001736*Wx*Vz;  
  
{Расчёт углов Эйлера}  
Psi'=Wy*sin(Teta)+Wz*cos(Teta);  
Teta'=Wx-(Wy*cos(Teta)-Wz*sin(Teta))*tg(Psi);  
{Fi считается в блоке управления вертикальным рулем}  
{Экспериментально}  
{Teta'=0;}  
  
{Расчёт перемещения центра масс ПА в базовой земной системе координат}  
{Xog'}Ksi'=Vx*cos(Fi)*cos(Psi)+Vy*(sin(Teta)*sin(Fi)-cos(Fi)*cos(Teta)*sin(Psi))+Vz*(cos(Fi)*sin(Teta)*sin(Psi)+sin(Fi)*cos(Teta)*cos(Psi));  
{Zog'}Zit'=-Vx*sin(Fi)*cos(Psi)+Vy*(cos(Teta)*sin(Fi)*sin(Psi)+sin(Teta)*cos(Fi))+Vz*(cos(Teta)*sin(Fi)*sin(Psi)-sin(Teta)*cos(Fi));  
  
KPEH=180*Teta/pi;  
KYPC=180*Fi/pi;  
DUFFERENT=180*Psi/pi;  
V=sqrt(Vx^2+Vy^2+Vz^2);  
  
{Вывод переменных}  
output V, KYPC, KPEH, DUFFERENT, Ksi, Zit, Vx, Vy, Vz, Psi, Teta, Wy, Wz, Wx;
```

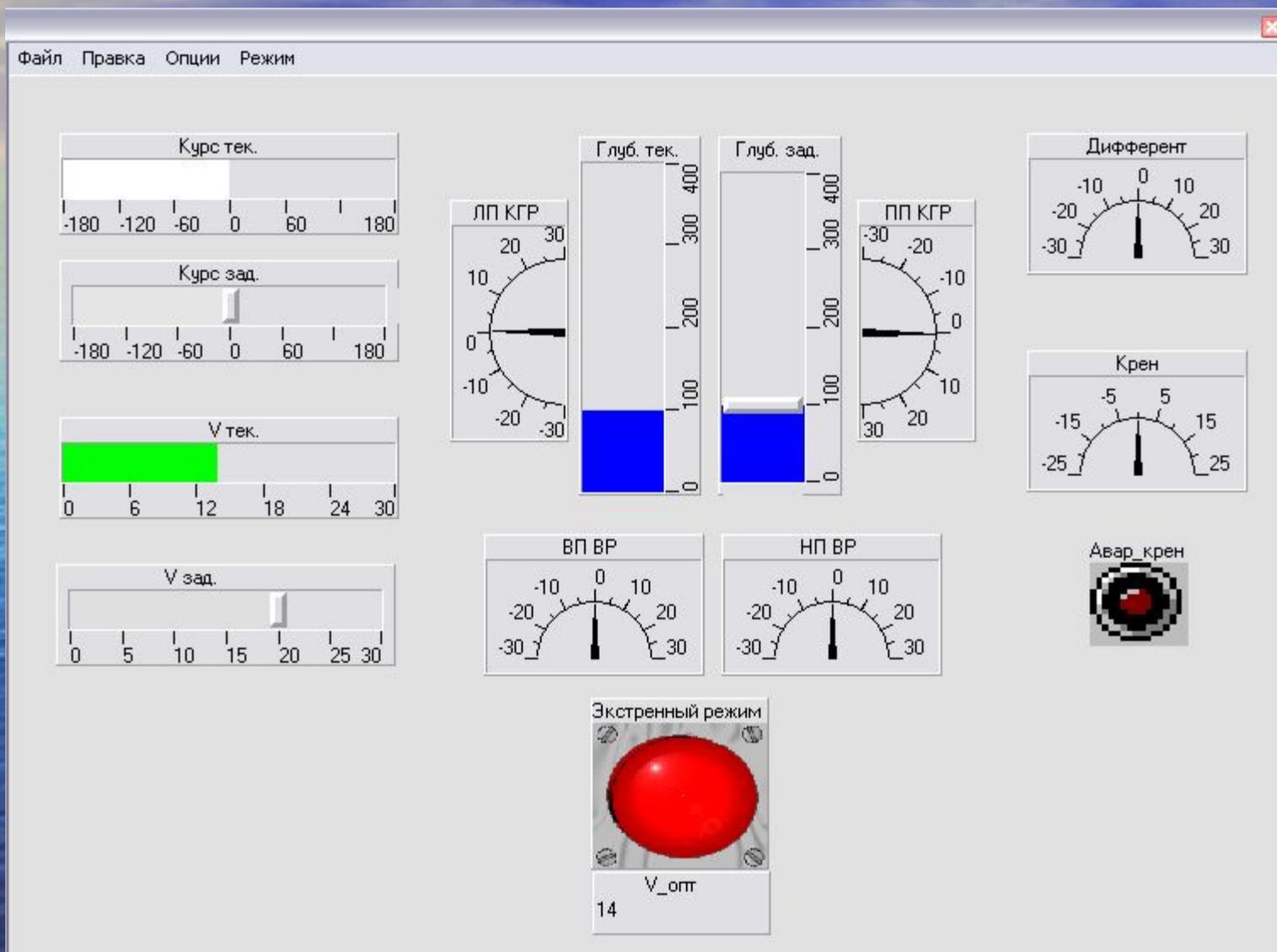
# Разработана сетевая версия



# Блок управления



# ВИРТУАЛЬНЫЙ ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ



# Внешний вид пульта управления и индикации

**Панель управления**

Файл Редактирование Лупа Вид Сервис Окно

Помощь

Курс заданный



180 160 140 120 100 80 60 40 20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180

Курс текущий



180 160 140 120 100 80 60 40 20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180

Скорость заданная



0 5 10 15 20 25

Скорость текущая



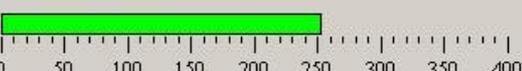
0 5 10 15 20 25

Глубина заданная



0 50 100 150 200 250 300 350 400

Глубина текущая



0 50 100 150 200 250 300 350 400

Режим безопасного маневрирования

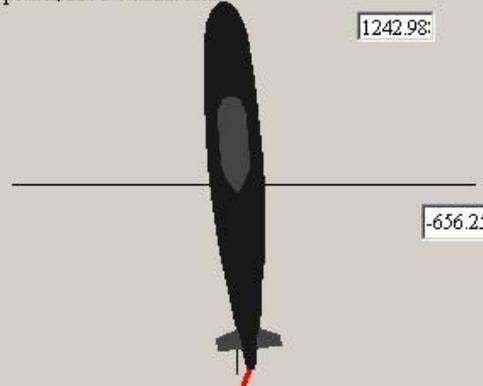
Общий вид



**Панель управления**

Файл Редактирование Лупа Вид Сервис Окно Помощь

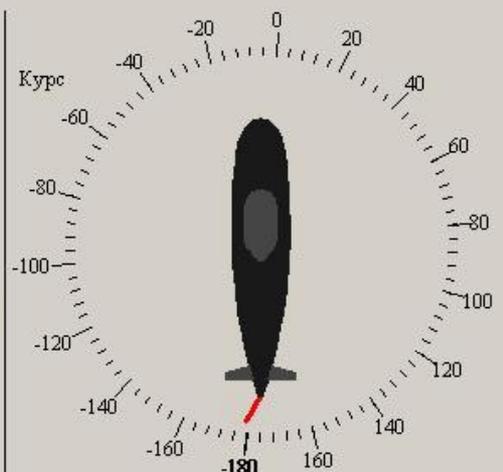
Перемещение в земных осях



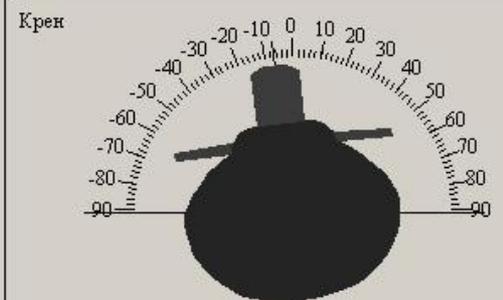
124.98

-656.2535

Курс

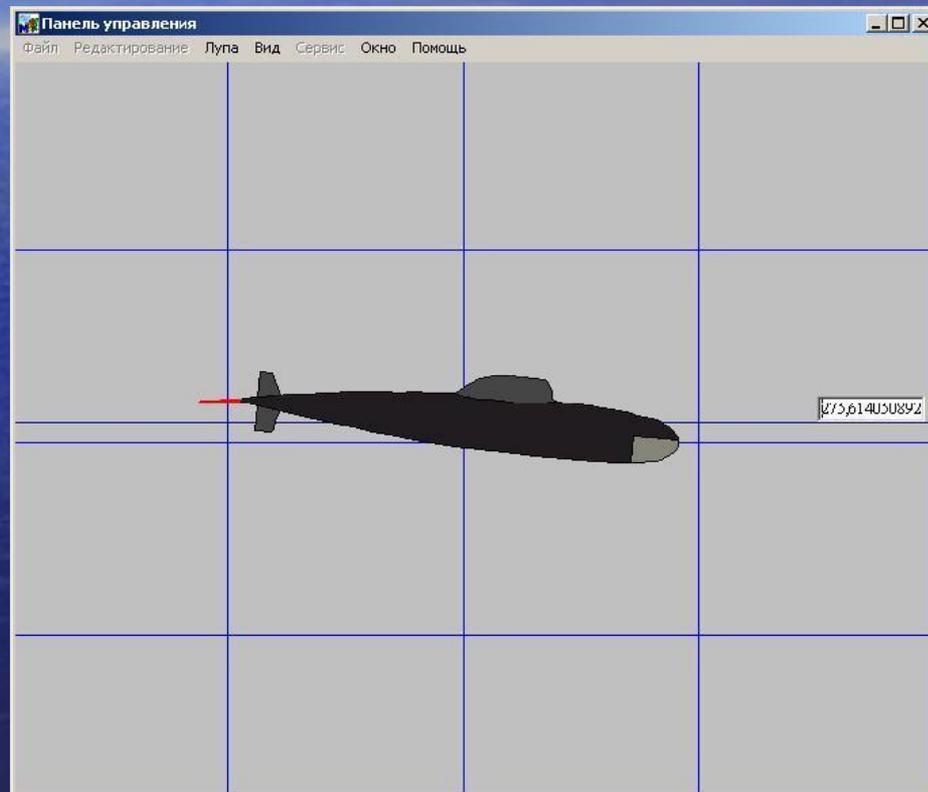
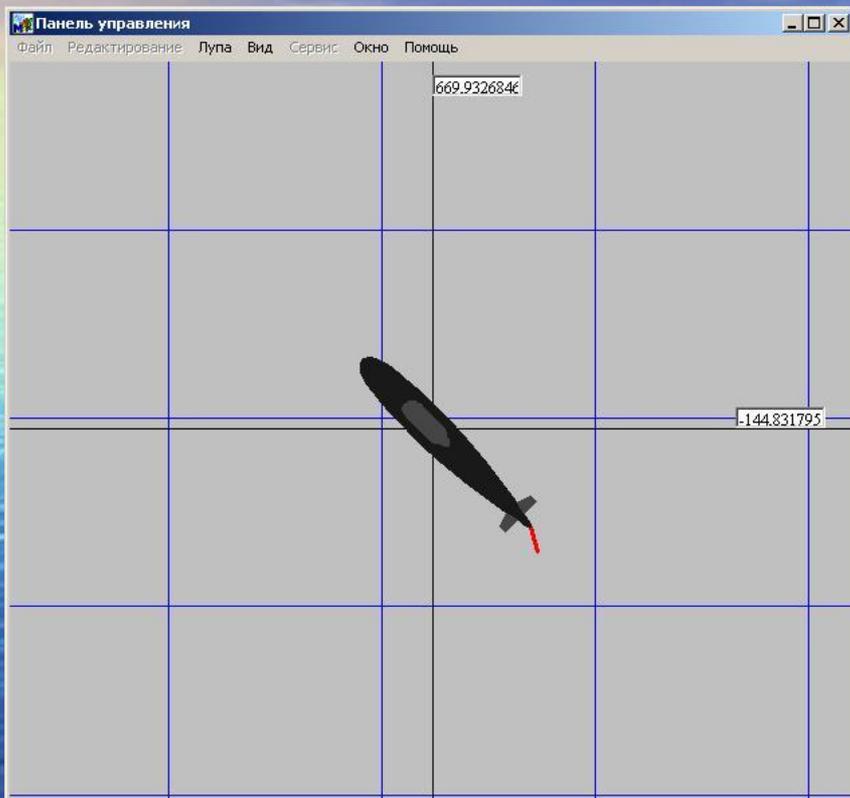


Крен



182.297

# Внешний вид дополнительных панелей анимации



# Анимированные панели управления и диагностики

The image shows a complex software interface for a control panel, consisting of several overlapping windows. The main window, titled "Панель управления", displays various data and controls. On the left, a vertical bar is labeled "ГЛУБИНА". The central area shows a table of key performance indicators. To the right, there are gauges for "Крен" (Roll) and "Дифферент" (List), each with a "Превышение" (Exceedance) indicator. At the bottom right, there is a "управления" (Control) section with a "норма" (norm) indicator and a "оптимальный" (optimal) indicator.

Параметр	Значение	Единица измерения
Угловая скорость:	1.7070	градусов/с
Радиус циркуляции:	466.7	метров
Время поворота на 180 градусов	105.45	сек
Время поворота на 90 градусов	0.05	сек
Оценка угла скольжения	0.0832	градусов
Угол атаки:	0.0800	градусов

Скорость: 13.9

Глубина: 99.21

Дифферент: -0.04

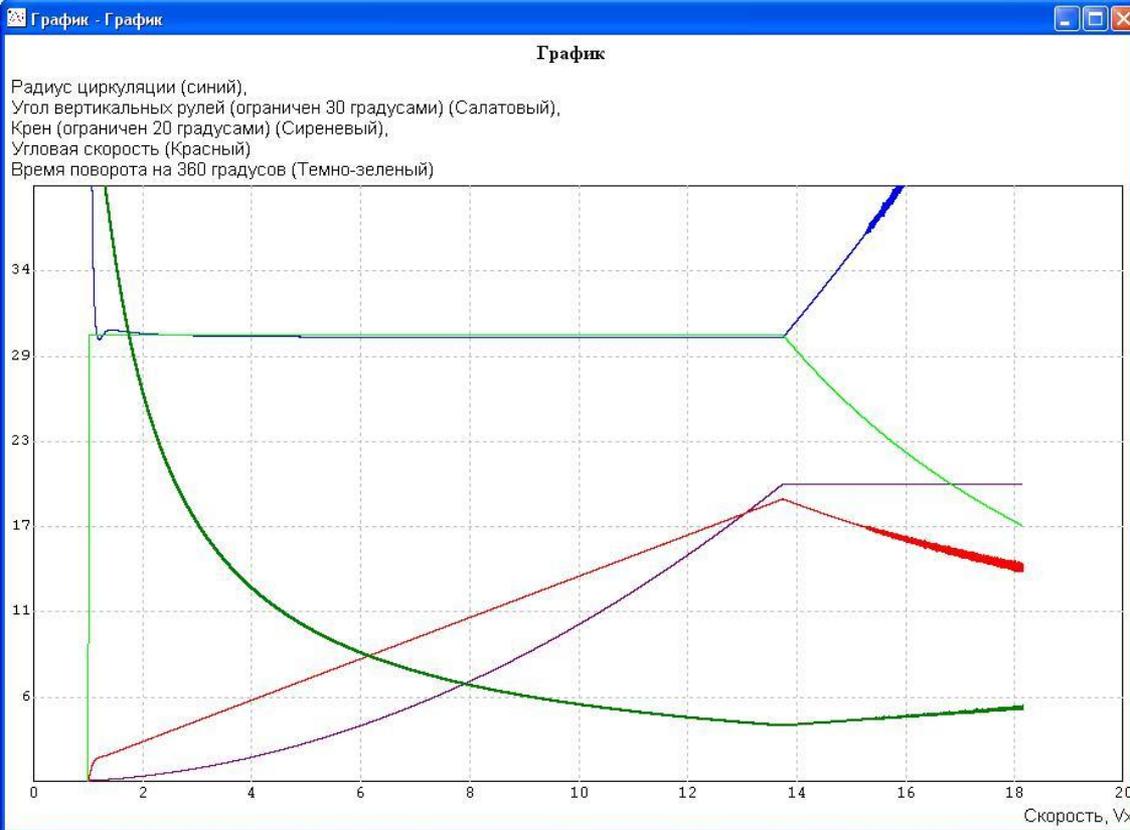
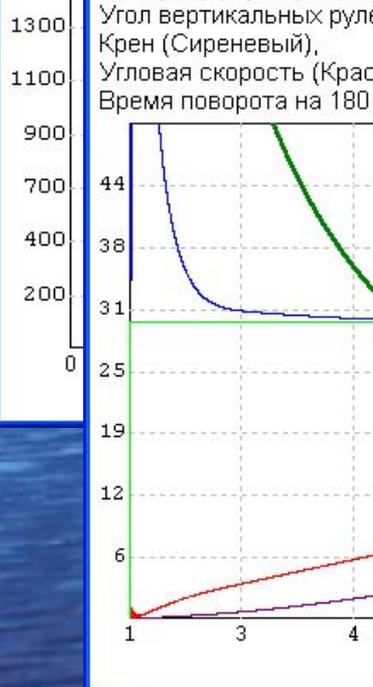
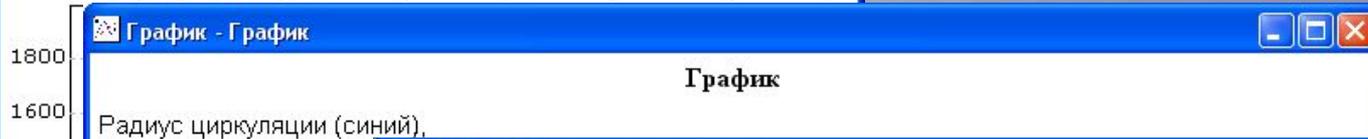
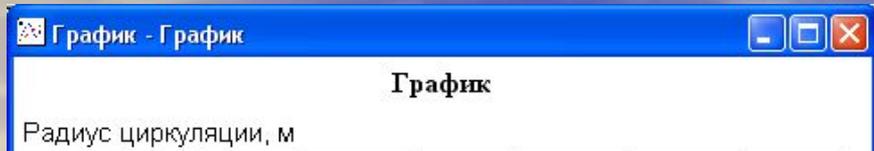
Виды:

- Общий
- Курс
- Сверху
- Глубина
- Крен
- Маневр

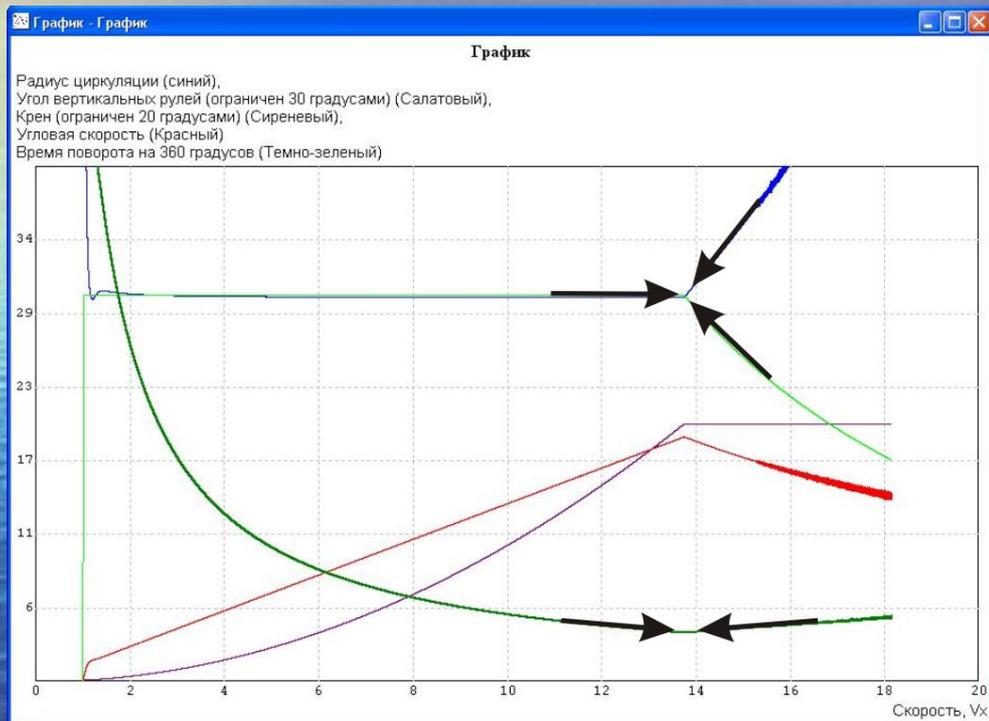
# Вычислительные эксперименты

- Анализ поведения системы при отключенном контуре стабилизации глубины.
- Анализ модели при идеальном удержании крена при помощи воображаемых дополнительных механизмов ПА (носовых горизонтальных рулей (НГР)) и при наличии контура стабилизации глубины.
- Анализ модели без ограничения на крен и при наличии контура стабилизации глубины.
- Выявление оптимальных по критериям быстродействия и минимизации радиуса циркуляции значений перекладки вертикального руля и скорости хода при стабилизации глубины и осуществлении глубоких маневров по курсу при различных ограничениях на допустимый крен.

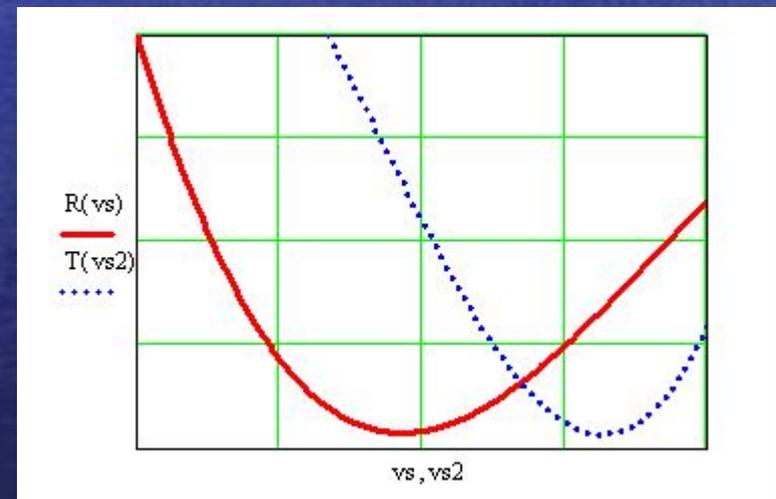
# Результаты



# Сравнение поведения ПА при «правильном вираже» с ЛА

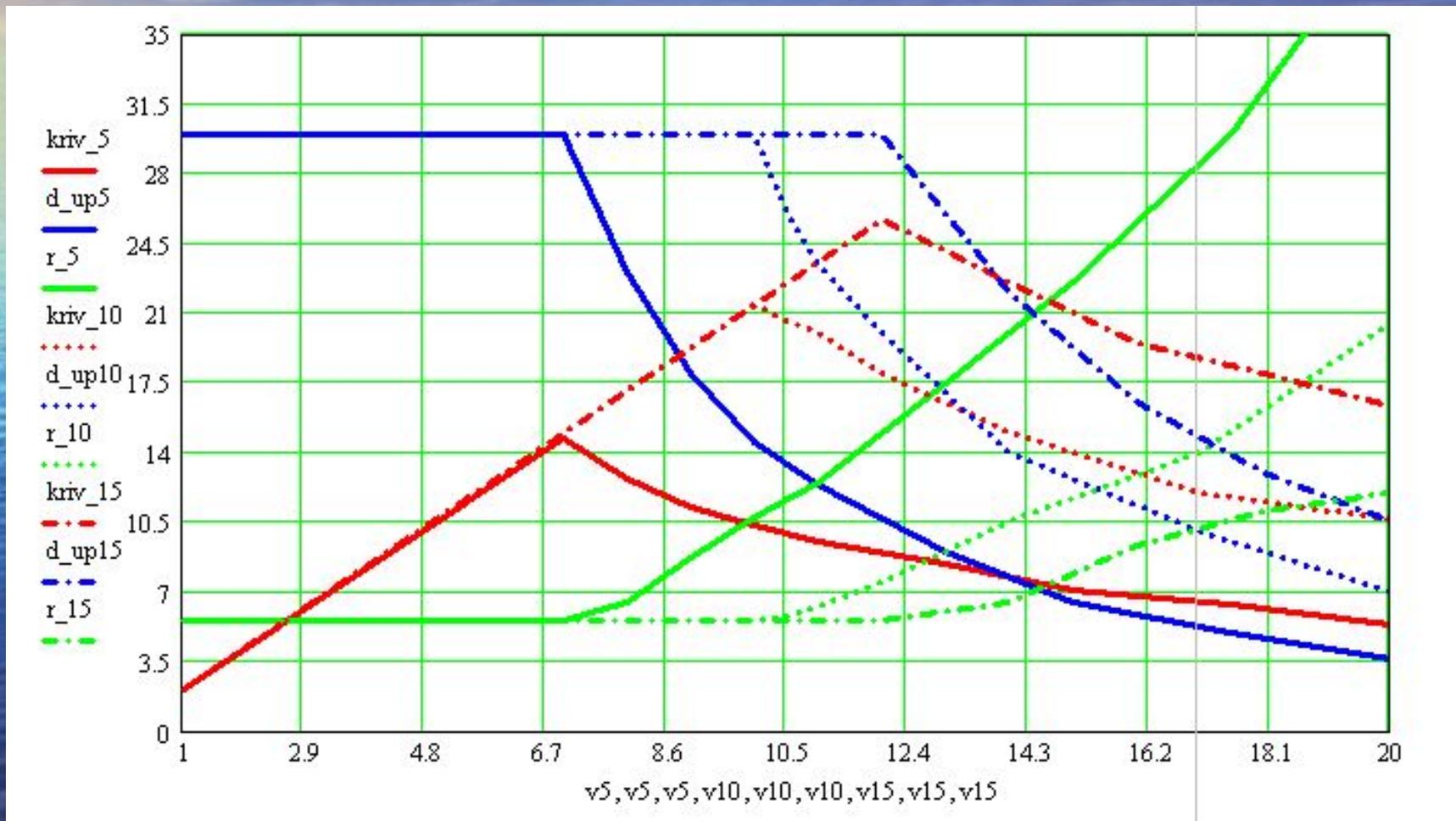


Минимум радиуса циркуляции и минимум времени выхода на курс достигается в одной точке!!!!

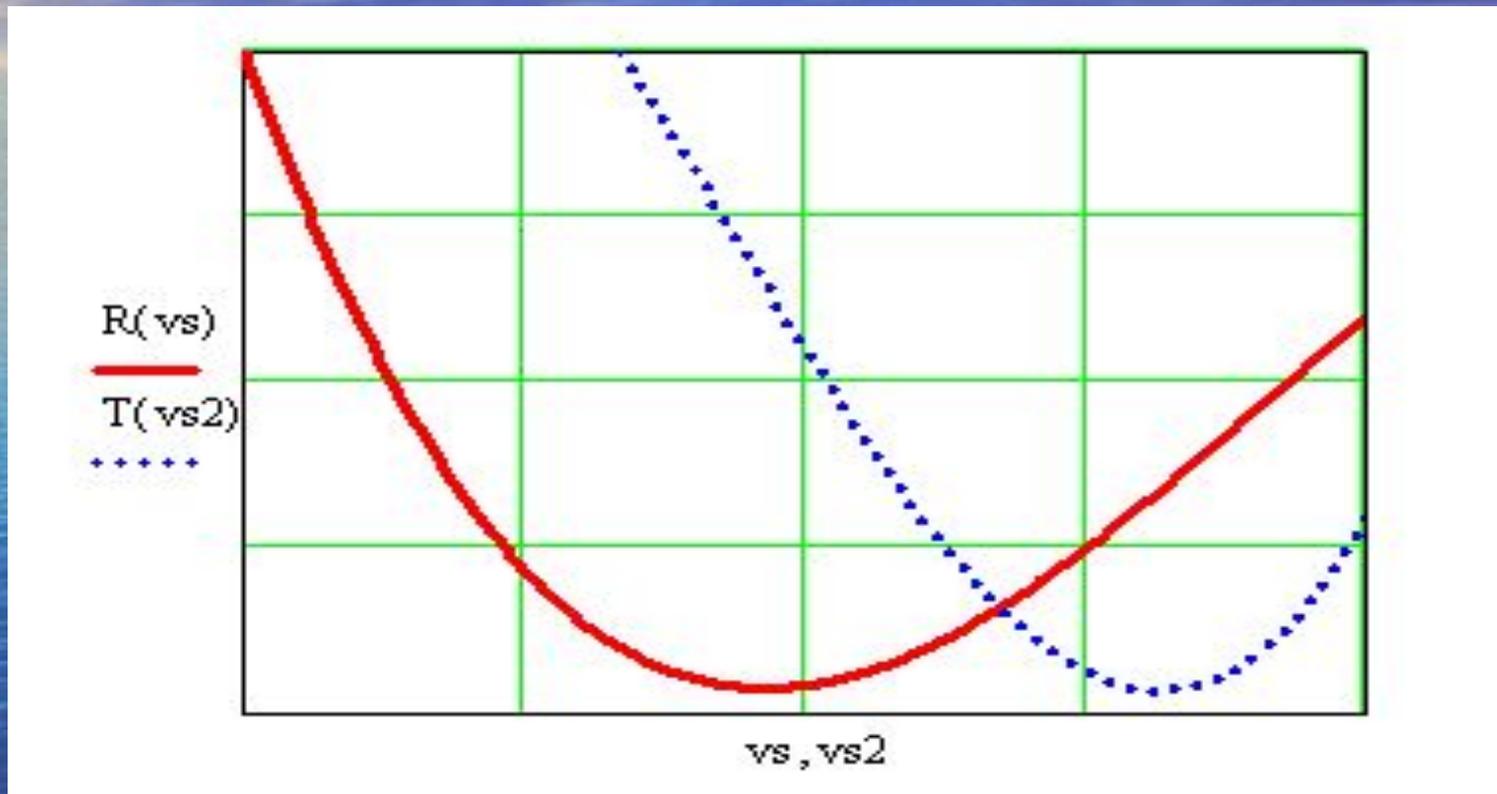


Минимум радиуса циркуляции и минимум времени выхода достигаются при разных значениях скорости V

# Зависимости радиуса циркуляции и угловой скорости от скорости хода и положения руля при ограничениях угла крена

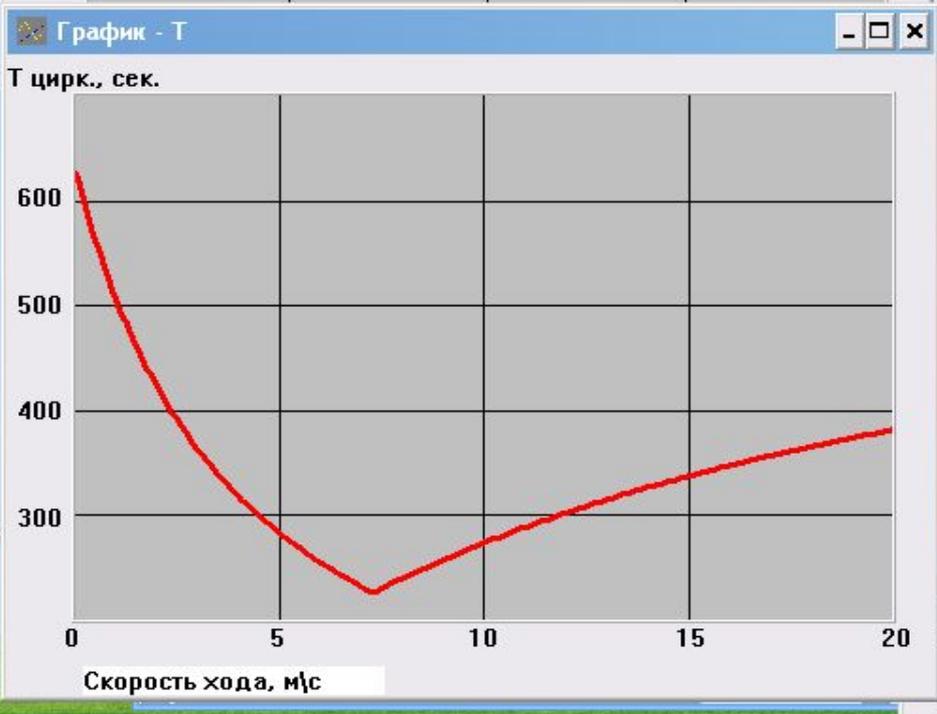
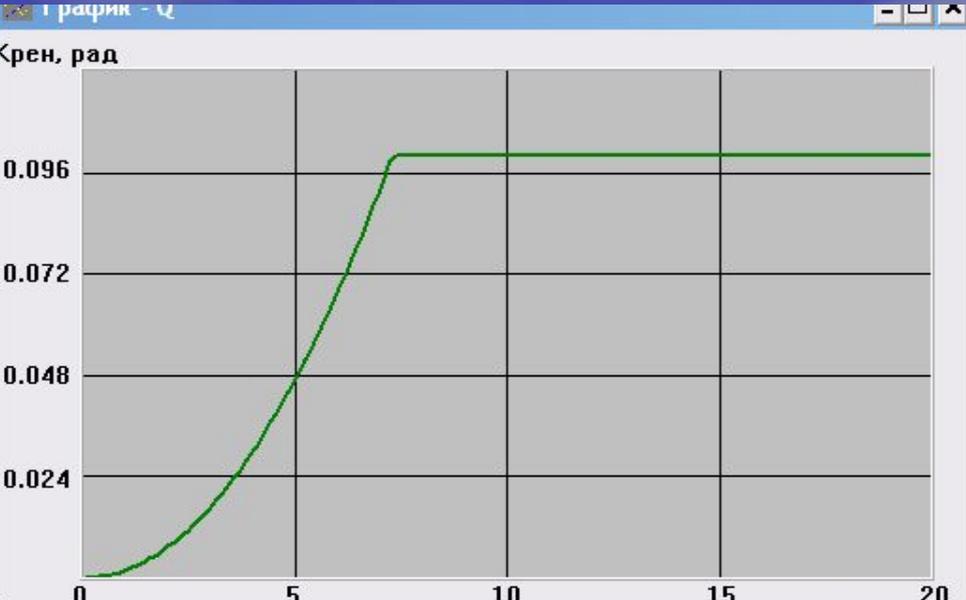


# Сравнение выявленных закономерностей для ПА с известными закономерностями для летательных аппаратов (ЛА) при осуществлении ЛА правильного виража



## Зависимость от времени радиуса и времени выполнения правильного установившегося виража

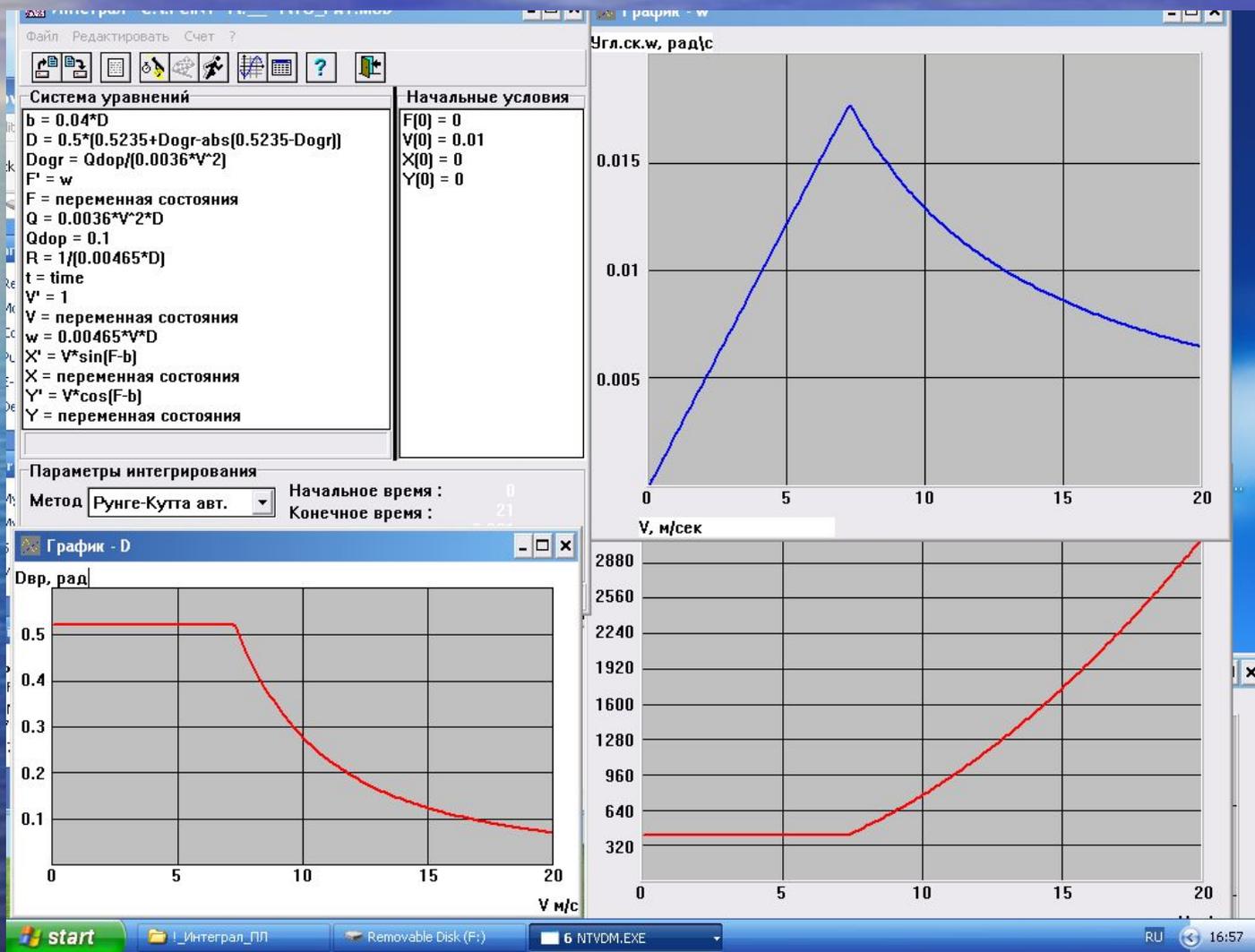
Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1969. (гл. IX «Движение летательного аппарата в горизонтальной плоскости. Понятие о пространственном маневре», с. 278 – 298).



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПА НА ЦИРКУЛЯЦИИ ОДНОВРЕМЕННО ПО ДВУМ КРИТЕРИЯМ:

-МИНИМУМИЗАЦИЯ РАДИУСА ЦИРКУЛЯЦИИ и

- МАКСИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЫХОДА НА ЗАДАННЫЙ КУРС





Система уравнений

```

Dg' = ((1-Fi_n_g)+Nu_g*(Fi_n_g-Fi_v_g))*f_sigma_g
Dg = переменная состояния
Dg_upor = 0.5
Dv' = ((1-Fi_n_v)+Nu_v*(Fi_n_v-Fi_v_v))*f_sigma_v
Dv = переменная состояния
Dv_upor = 0.5
Dvert = 57.3*Dv
Eta' = Vx*sin(Psi)+Vy*cos(Teta)-Vz*sin(Teta)*cos(Psi)
Eta = переменная состояния
eta_zad = 50
f_sigma_g = -0.05+0.5*(abs[sigma_g+0.05]-abs[sigma_g-0.05]+0.1)
f_sigma_v = -0.05+0.5*(abs[sigma_v+0.05]-abs[sigma_v-0.05]+0.1)
Fi' = (Wy*cos(Teta)-Wz*sin(Teta))/cos(Psi)
Fi = переменная состояния
Fi_n_g = 0.5*(1-sign(Dg+Dg_upor))
Fi_n_v = 0.5*(1-sign(Dv+Dv_upor))
Fi_v_g = 0.5*(1+sign(Dg-Dg_upor))
Fi_v_v = 0.5*(1+sign(Dv-Dv_upor))
Fi_zad = -3
Ksi' = Vx*cos(Fi)*cos(Psi)+Vy*(sin(Teta)*sin(Fi)-cos(Fi)*cos(Teta)*sin(Psi))
Ksi = переменная состояния
n = 12
Nu_g = 0.5*(1+sign(sigma_g))
Nu_v = 0.5*(1+sign(sigma_v))
Psi' = Wy*sin(Teta)+Wz*cos(Teta)
Psi = переменная состояния
sigma_g = 57.3*(4*Psi+(80-2*Vx)*(Wy*sin(Teta)+Wz*cos(Teta))-0.4*Dg)+Y_sigma_k
sigma_k = -eta_zad+Eta+16*(Vx*sin(Psi)+Vy*cos(Teta)-Vz*sin(Teta)*cos(Psi))
sigma_v = 100*(Fi-Fi_zad-(15-0.5*Vx)*0.1*(Wy*cos(Teta)-Wz*sin(Teta)))/cos(Psi)-{0.15+0.02*Vx}*Dv
T = 57.3*Teta
Teta' = Wx*(Wy*cos(Teta)-Wz*sin(Teta))*tg(Psi)
Teta = переменная состояния
    
```

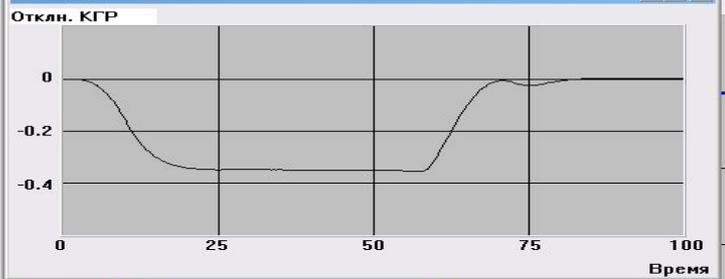
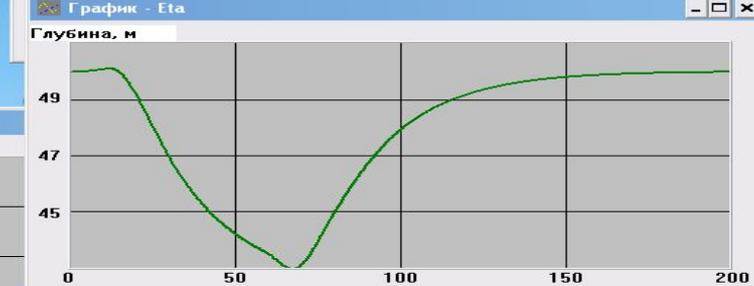
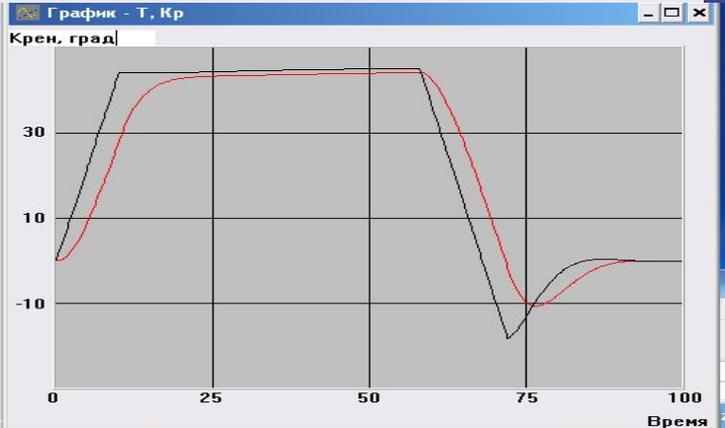
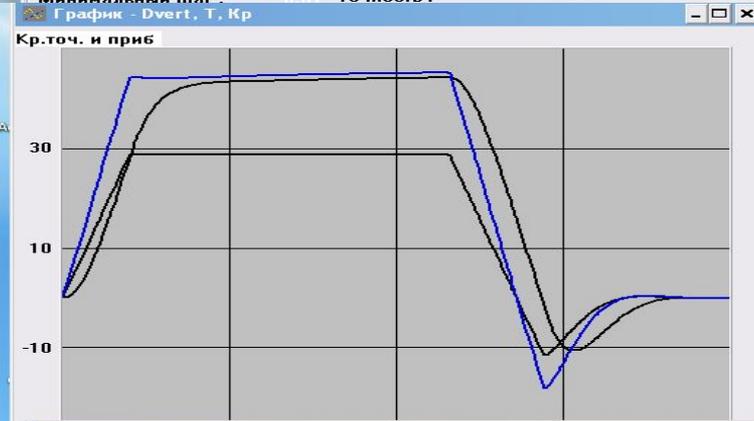
Начальные условия

```

Dg(0) = 0
Dv(0) = 0
Eta(0) = 50
Fi(0) = 0
Ksi(0) = 0
Psi(0) = 0
Teta(0) = 0
Vx(0) = 20.7
Vy(0) = 0
Vz(0) = 0
Wx(0) = 0
Wy(0) = 0
Wz(0) = 0
x(0) = 0
z(0) = 0
Zit(0) = 0
фи(0) = 0
    
```

Параметры интегрирования

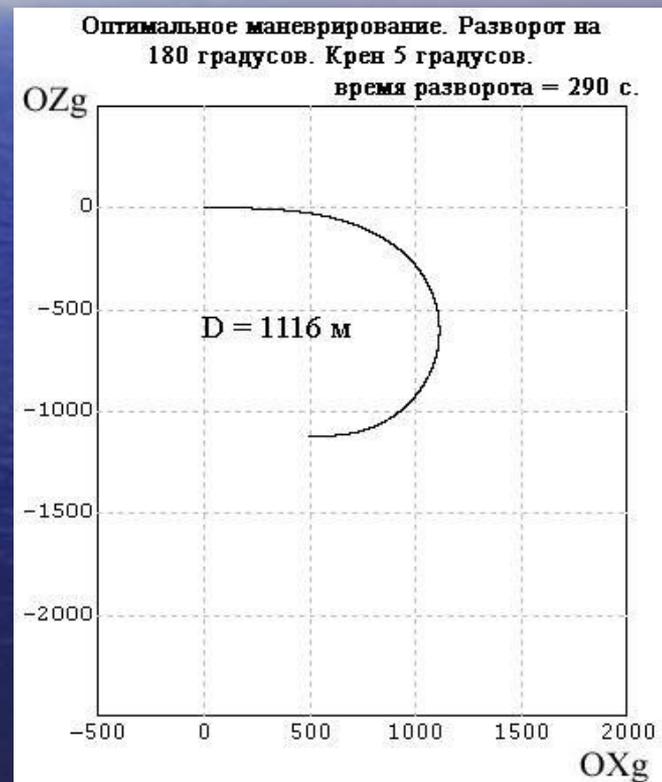
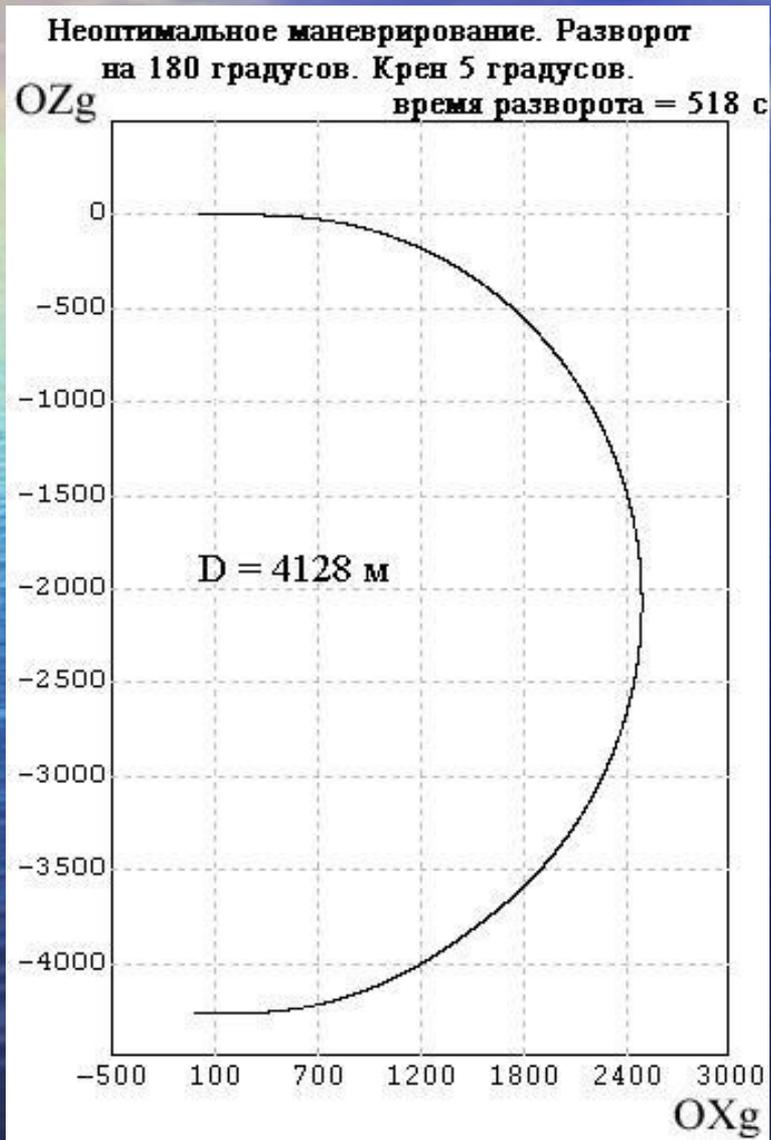
Метод: Рунге-Кутта авт. Начальное время: 0  
 Конечное время: 200  
 Минимальный шаг: Точность: 0.01



# Сравнение качества выполнения глубокой циркуляции (разворот на 180 градусов)

для различных значений максимально допустимого крена:  
5, 10, 15, 20, 25, 30 градусов.

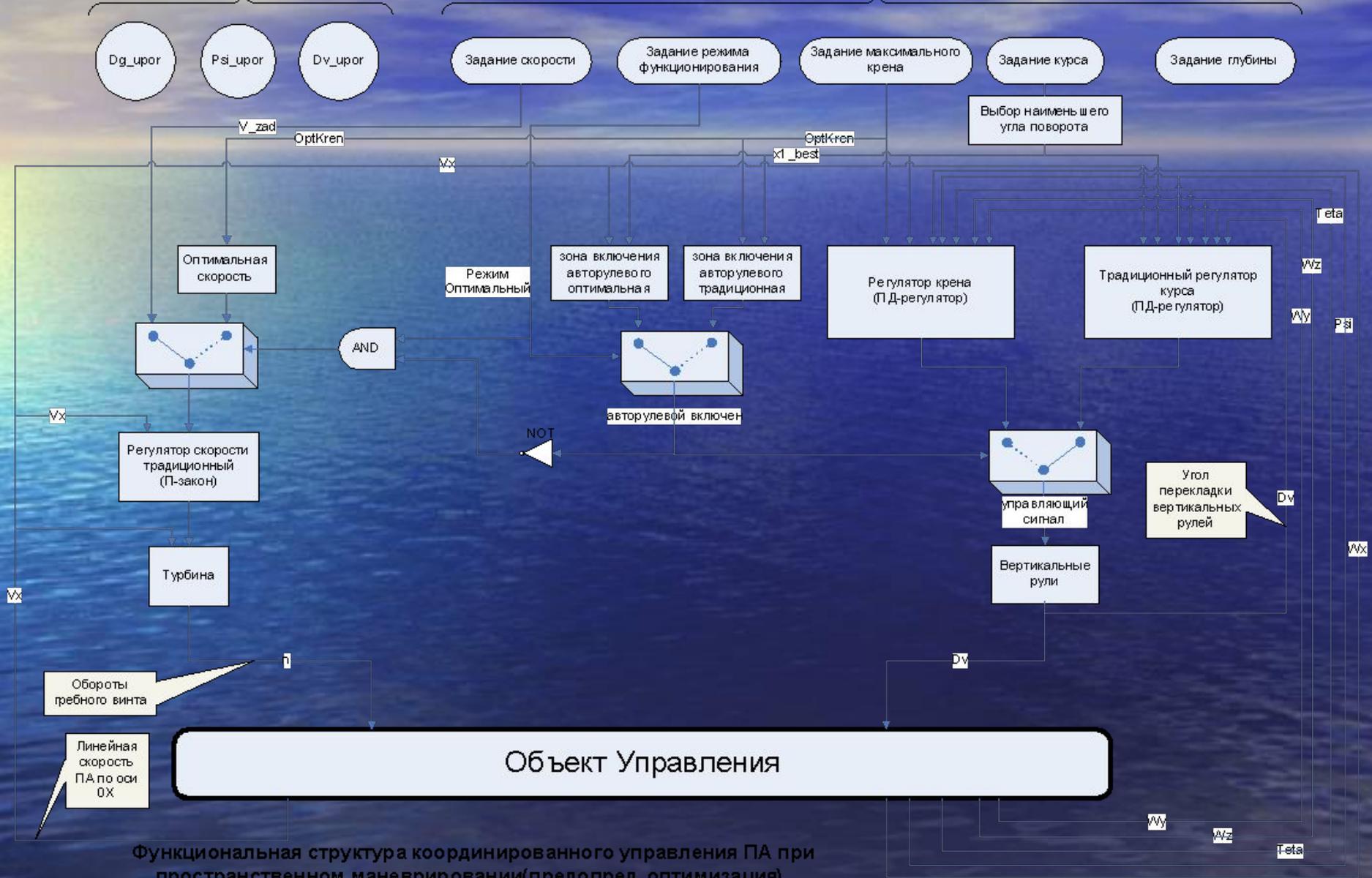
При этом начальная скорость в каждом случае будет одинакова  
- 14 м/с.





## Внутренние ограничения модели

## Панель управления



Функциональная структура координированного управления ПА при пространственном маневрировании(предопред. оптимизация)

# Основные результаты

1. Систематизированы основные положения математического моделирования динамики комплекса «Подводный аппарат – рулевые устройства – двигатель-двигательный комплекс»
2. Разработаны оригинальные математические модели существенно нелинейных динамических элементов, в частности, сервоприводов с ограничениями их скоростных характеристик и нелинейностями типа «упор», гистерезисных элементов, аналоговых мажоритарных элементов. Предложенные модели отмеченных и других типовых нелинейных звеньев исключают необходимость в использовании сложных предикатных описаний условий их функционирования.
3. Разработана и программно реализована в среде отечественного Программного Комплекса «Моделирование в технических устройствах» полная математическая модель пространственного движения «гипотетического» подводного аппарата (ПА) для целей исследования новых принципов управления и проектирования функциональных и алгоритмических структур систем управления рулевыми устройствами и двигатель-двигательным комплексом с отображением результатов моделирования в виде графиков изменения во времени определяющих переменных (глубины, курса, скорости, крена, дифферента, положения рулей, частоты вращения гребного винта) и в виде траекторий перемещения центра тяжести ПА в Земных осях координат.

4. Отработана технология создания в среде «МВТУ» компьютерных тренажеров с реализацией виртуальных панелей пультов управления. Продемонстрирована возможность обеспечения на виртуальных панелях пультов визуализации фактических угловых перемещений корпуса ПА (крена, дифферента и других параметров), то есть реализации «анимационных эффектов».

5. Проведена серия вычислительных экспериментов по исследованию некоторых принципов и алгоритмов координированного управления рулевыми устройствами кормовых горизонтальных и вертикальных рулей и двигательного движительным комплексом при оптимизации процессов пространственного маневрирования ПА по временным и траекторным критериям в экстремальных режимах при ограничениях на потенциально опасные координаты крен, дифферент), накладываемых условиями безопасности плавания.

## 6. Разработан ИВК в сетевом варианте с реализацией обмена информацией по протоколу ТСР/IP с :

- Моделями функциональных, алгоритмических и технических структур многоуровневой управляющей системы;
- Моделями внешних аварийных возмущений, в том числе при движении ПА вблизи взволнованной поверхности моря, при выходе из строя главных движителей и переходе на режим стабилизации без хода, при резком нарушении балансировок по силам и моментам при применении, например, оружия, при нарушении герметичности прочного корпуса (затопление отсеков), при заклинках рулевых устройств и других возмущений;
- Виртуальным пультом управления со всеми органами управления и приборами сигнализации и индикации, включая предложенные новые способы представления информации с элементами анимации и мультипликации;
- Дисплейным пультом Руководителя обучения для задания режимов обучения, ввода аварийных нарушений.

7. Создана применительно к ранним стадиям проектирования Система Автоматизированного Проектирования (САПР) функциональных, алгоритмических, технических и других видов структур управляющих систем (УС), обеспечивающей также проведение эргономических исследований для отработки новых способов отображения информации с моделированием в реальном масштабе времени процессов управления с реальным оператором (!) за многоэкраным дисплейным пультом управления и выявление в том числе фактически предельных возможностей Человека при управлении объектом в аварийных режимах и форс-мажорных ситуациях.
  
8. Исследованы с помощью разработанного ИМК нерешенные до настоящего времени вариационные задачи оптимального по временным и траекторным критериям пространственного маневрирования ПА в экстремальных ситуациях (задачи уклонения от оружия, предотвращения столкновений, обхода препятствий и др.) с организацией скоординированных воздействий на силовую установку аппарата и рулевые устройства при обеспечении условий безопасности осуществления маневров - выполнение ограничений на потенциально опасные координаты объекта - крен, дифферент, глубину.

9. Выявлен ряд важных, быть может ранее не полностью вскрытых, свойств ПА как многомерного объекта оптимального управления, определены структуры оптимальных траекторий, роль и взаимодействие рассматриваемой совокупности управляющих органов при оптимизации различных режимов пространственного движения объекта, а также его экстремальные (предельные) маневренные свойства (характеристики).
10. Предложены новые способы и разработаны оригинальные алгоритмы координированного управления автоматизированными рулевыми машинами и силовой установкой (ДДК), обеспечивающие близкие к оптимальным по быстродействию:
- маневры ПА по курсу с одновременной минимизацией радиуса циркуляции;
  - пространственные маневры корабля по курсу и глубине с одновременным изменением курса и глубины.

