

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ НА ОСНОВЕ MATLAB/SIMULINK**

**Ю.В. Митришкин  
А.Я. Коростелев, Е.О. Яичникова  
Н.М. Карцев, В.А. Иванов  
В.Н. Докука, Р.Р. Хайрутдинов  
А.В. Кадурин, А.Г. Вертинский  
А.А. Ефремов, С.М. Зенков  
И.С. Сушин**

**ИПУ РАН – МГТУ – МФТИ  
МГТУ**

**ТРИНИТИ  
ИПУ РАН**

**МФТИ**

**Технологическая конференции MATLAB и Simulink 2010**

**Организаторы: Softline, MathWorks**

**Центр Международной Торговли на Красной Пресне**

**Москва, 30 сентября 2010 г.**

# СОДЕРЖАНИЕ

- Токамаки и ИТЭР
- Системы и методы управления плазмой с применением MATLAB/Simulink
- Системы магнитного управления током и формой плазмы в ИТЭР
- Системы кинетического управления профилем тока плазмы в токамаке
- Заключение
- Конференции и публикации



# Токамаки и ИТЭР

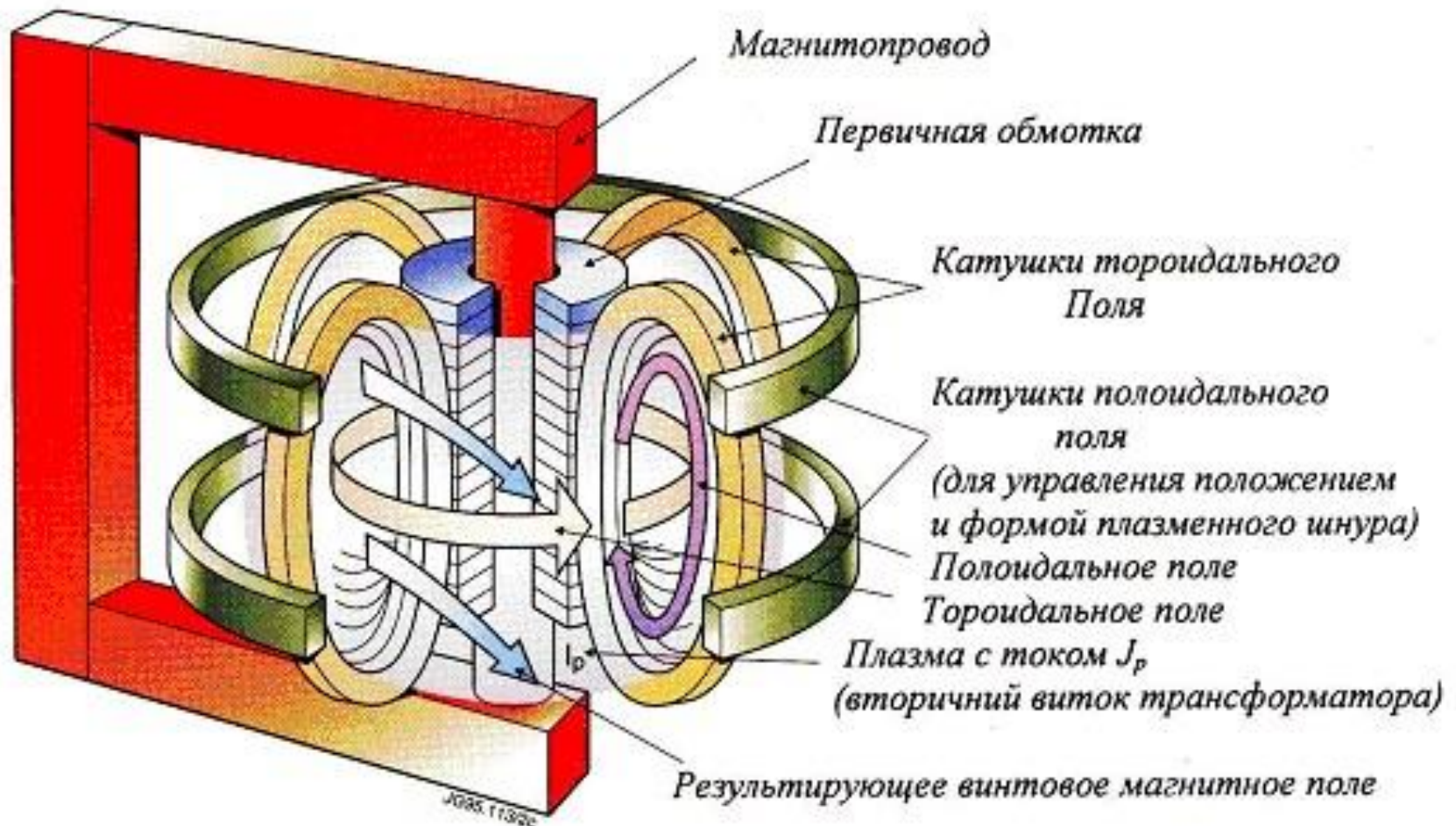
Токамаки являются лидерами в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза. Первый токамак был построен в СССР в ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1956 г. С этого времени было создано более 200 токамаков в мире, из которых сейчас действуют 35 установок.

Высокотемпературную плазму в магнитном поле токамака можно удерживать и поддерживать ее оптимальные характеристики только с помощью систем автоматического управления с обратной связью.

В 2009 г. международным сообществом в составе Европы, Японии, России, США, Южной Кореи, Китая и Индии начато строительство первого в мире токамака-реактора ИТЭР во Франции, пуск которого планируется в 2019 г.

# ТОКАМАК

## Тороидальная КАмера с МАгнитными КАтушками

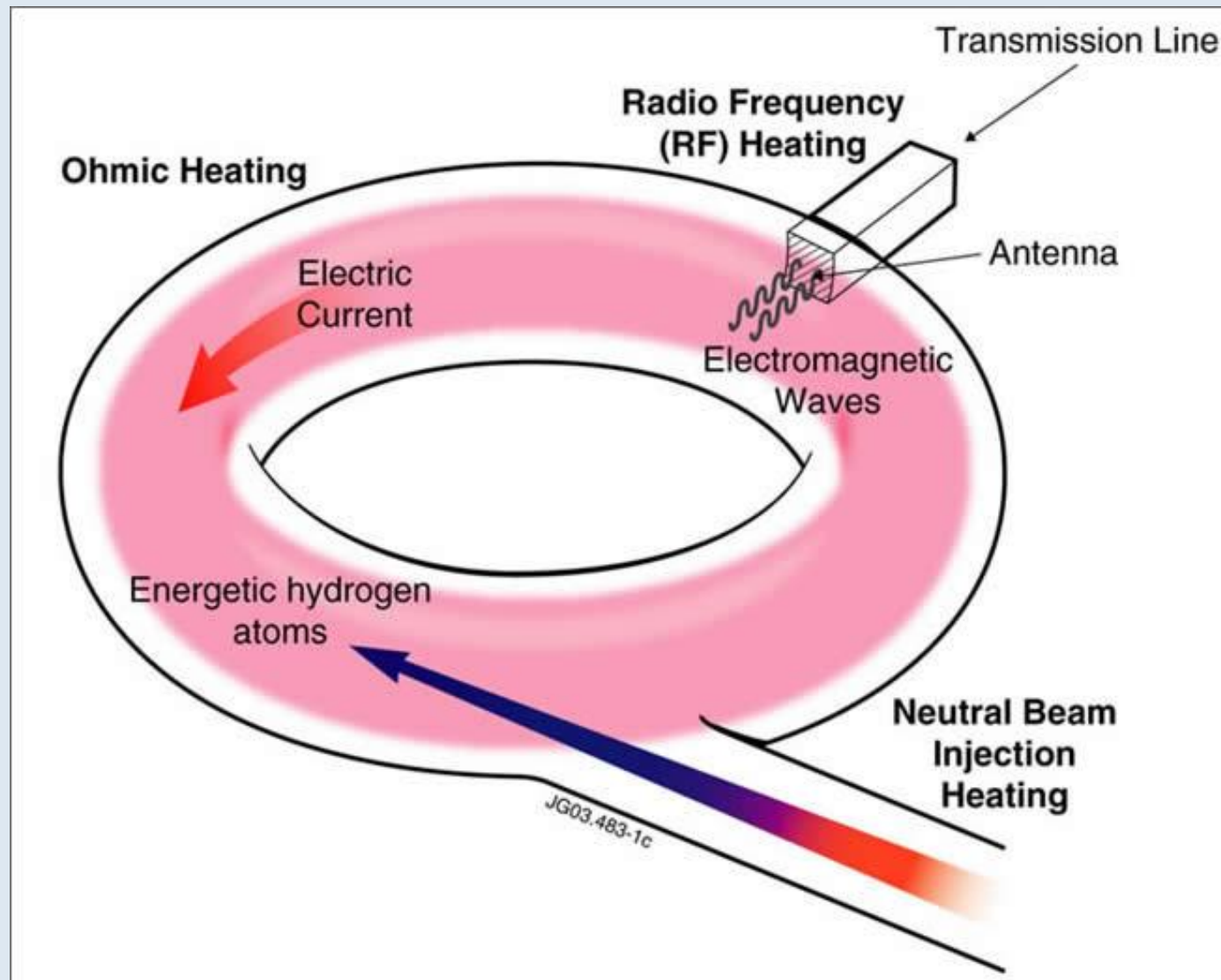


Критерий Лоусона:

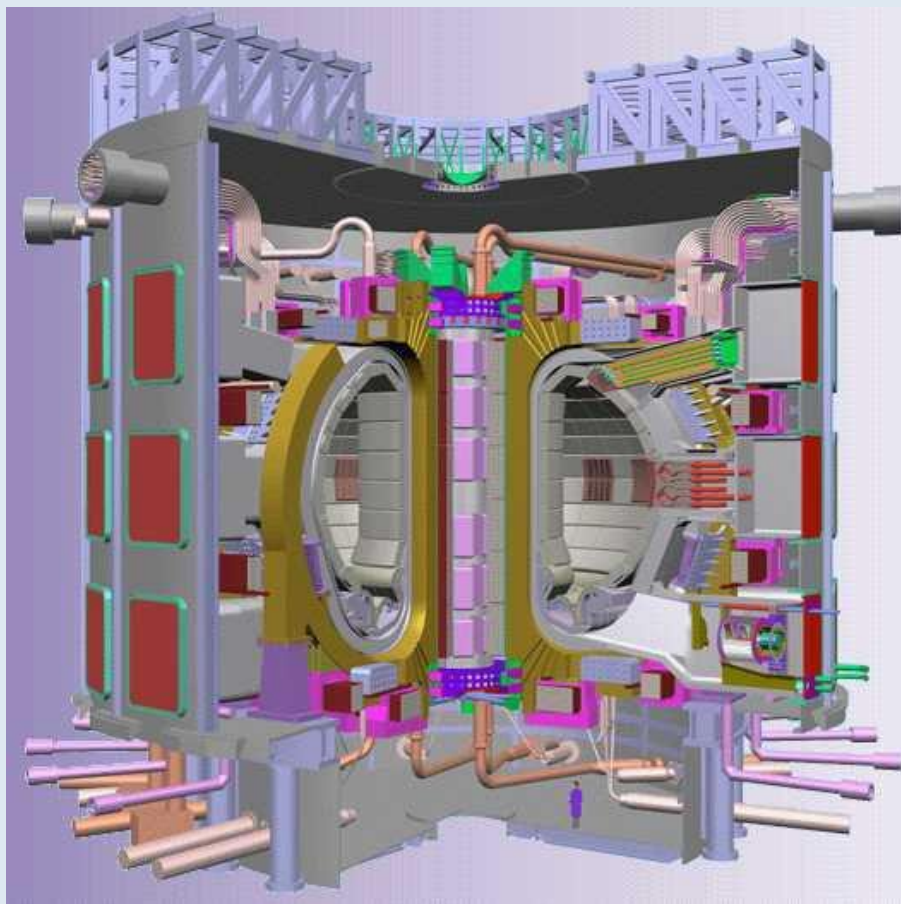
$$nT\tau_E > 5 \times 10^{21} m^{-3} keVs$$



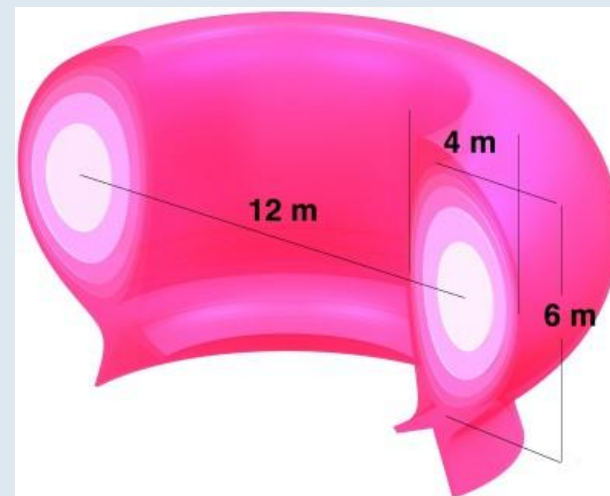
# СИСТЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ



# Первый Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор: ИТЭР



Вид ИТЭР в разрезе



## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Большой радиус плазмы	6,2 м
Малый радиус плазмы	2 м
Тороидальное магнитное поле	5,3 Т
Ток плазмы	15 МА
Мощность систем нагрева	73 МВт
Термоядерная мощность	500 МВт
Длительность горения	400 сек



# КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ

В современных токамаках необходимо разрабатывать как системы магнитного управления плазмой, так и системы кинетического управления с их дальнейшим интегрированием.

Системы магнитного управления подразделяются на:

- системы управления вертикальной скоростью, током и формой плазмы
- системы управления резистивными пристеночными модами (Resistive Wall Modes)

Системы кинетического управления подразделяются на:

- системы управления интегральными параметрами плазмы: мощность термоядерного синтеза, мощность на диверторных пластинах, напряжение на обходе плазменного шнура и т.п.
- системы управления плазменными профилями: тока, фактора запаса устойчивости  $q$ , температуры и плотности

# СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ В РАБОТЕ

В работе разрабатываются и исследуются:

- Системы магнитного управления вертикальной скоростью, током и формой плазмы ИТЭР
- Системы кинетического управления профилем плазменного тока в токамаке

Системы моделируются на плазмо-физическом коде ДИНА, реализованном в среде MATLAB/Simulink:

---

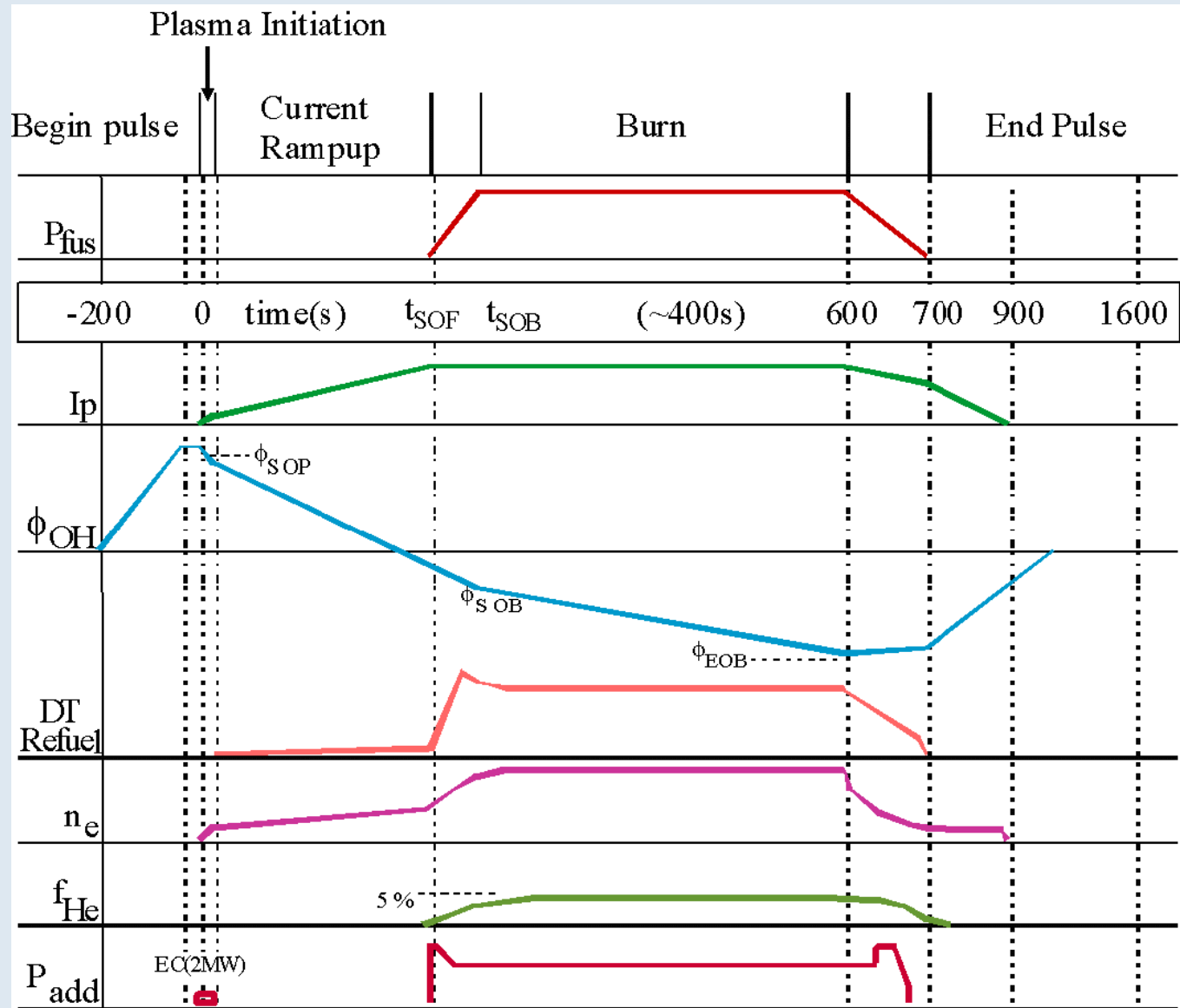
В работе применяется **системный подход** по использованию комплекса методов теории управления на основе MATLAB/Simulink:

- Линеаризация и идентификация нелинейных моделей объектов
- Редукция линейных моделей
- Развязка каналов управления
- Оптимизация с прогнозированием на модели объекта управления
- Каскадное и иерархическое управление
- Многомерное пропорциональное управление с двойным интегрированием
- $H_\infty$  и линейно-квадратичное управление



# **СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ И ТОКОМ ПЛАЗМЫ В ИТЭР**

# СТАНДАРТНЫЙ СЦЕНАРИЙ ИТЭР

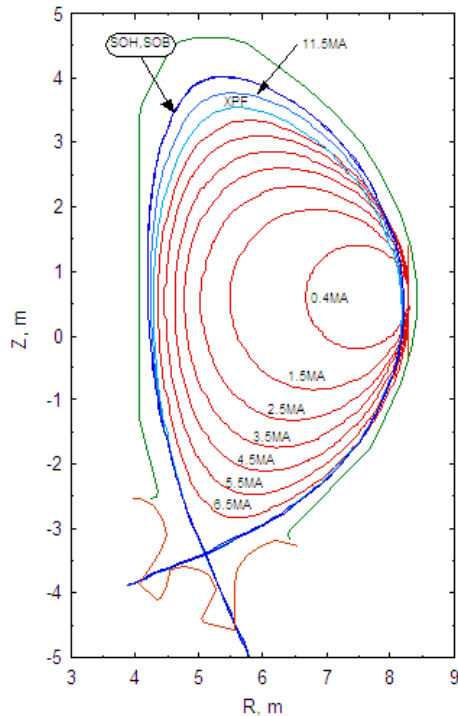




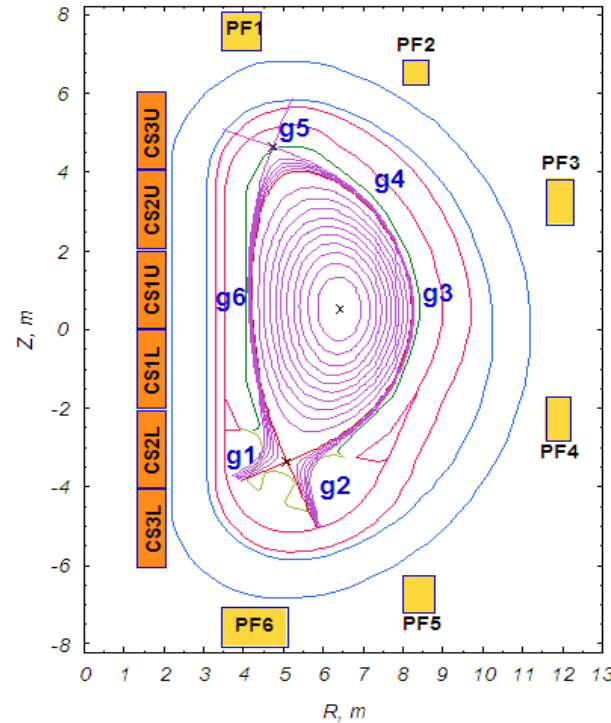
# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

## Вертикальное сечение ИТЭР

Лимитерная фаза

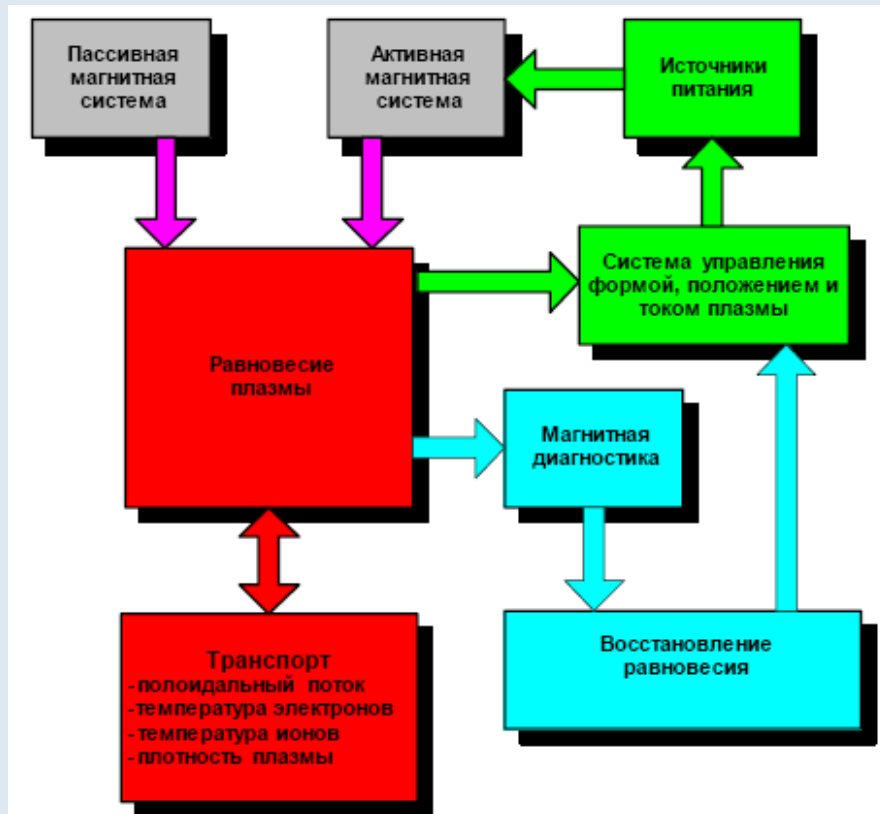


Диверторная фаза



- ✓ Стабилизировать вертикальную скорость плазмы относительно нуля
- ✓ Следить за заданными расстояниями между границей плазмы и 6-ю точками
- ✓ Следить за задающим воздействием по току плазмы
- ✓ Стабилизировать форму и ток плазмы на квазистационарной фазе плазменного разряда

# Плазмо-физический код «ДИНА» для моделирования эволюции плазмы в токамаке



Плазмо-физический код ДИНА создан в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований и предназначен для численного моделирования процессов равновесия и переноса в плазме токамаков.

Код выверен по экспериментальным данным токамаков JT-60 (Япония), MAST (Англия), DIII-D (США), TCV (Швейцария) и считается наиболее продвинутым для проекта ИТЭР.



# НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

$$\frac{\partial \Psi}{\partial I} \dot{I}(t) + RI(t) = Nu(t), \quad N = \begin{bmatrix} \Xi_{m \times m} \\ 0_{(n-m) \times m} \end{bmatrix}, \quad \Psi, I \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m$$

$$\Psi = \Psi(I, I_p, \Phi, \xi), \quad \xi = [\beta_p \quad l_i]^T, \quad n > m$$

**Уравнение  
Кирхгофа**

**$I$  – вектор токов:  
вектор состояния**

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \begin{cases} -\frac{8\pi^2}{c} j_t, & (r, z) \in S_p \\ -\frac{8\pi^2}{c} \sum_{k=1}^n r I_k \delta(r - r_k) \delta(z - z_k), & (r, z) \notin S_p \end{cases}$$

$$j_t = r 2\pi c \frac{dp(\Psi)}{d\Psi} + \frac{1}{cr} \frac{d[F(\Psi)^2]}{d\Psi}$$

**Уравнение  
Града-Шафранова  
– источник  
нелинейности  
модели объекта**

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{I_p} \int_S j \Psi dS = const$$

**Условие «вмороженности»  
полоидального потока в плазму**

$$h = h(I, I_p, \xi)$$

**Уравнение формы плазмы**

# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ НА КОДЕ «ДИНА»

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial I} \right|_{I=I_0} \delta I + \left. \frac{\partial \Psi}{\partial I_p} \right|_{I_p=I_{p0}} \delta I_p + \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_0} \delta \xi + R \delta I = N \delta u$$

Линеаризация  
уравнения Кирхгоффа

$$\left. \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial I} \right|_{I=I_0} \delta I + \left. \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial I_p} \right|_{I_p=I_{p0}} \delta I_p + \left. \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_0} \delta \xi = 0$$

Линеаризация  
условия «вмороженности»

$$y = \delta h(I, I_p, \xi) = \left. \frac{\partial h}{\partial I} \right|_{I=I_0} \delta I + \left. \frac{\partial h}{\partial I_p} \right|_{I_p=I_{p0}} \delta I_p + \left. \frac{\partial h}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_0} \delta \xi$$

Линеаризация  
уравнения  
наблюдения

## Линеаризованная модель

$$\frac{d x}{d t} = A x + B v + E \frac{d w}{d t}$$

$$y = C x + F w$$

**A, B, C, D, E, F**

**x**

**w =  $\delta \xi$**

матрицы модели  
вектор состояния  
возмущение

**g**

**I<sub>pf</sub>**

**I<sub>p</sub>**

**Z<sub>p</sub>, R<sub>p</sub>**

вектор зазоров

вектор полоидальных токов

ток плазмы

координаты магнитной оси плазмы

## Вектор наблюдения

$$y = \left[ \delta g \quad \delta I_{PF} \quad \delta I_p \quad \delta Z_p \quad \delta R_p \right]^T$$



# ДВУХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ, ТОКОМ И ФОРМОЙ ПЛАЗМЫ В ИТЭР

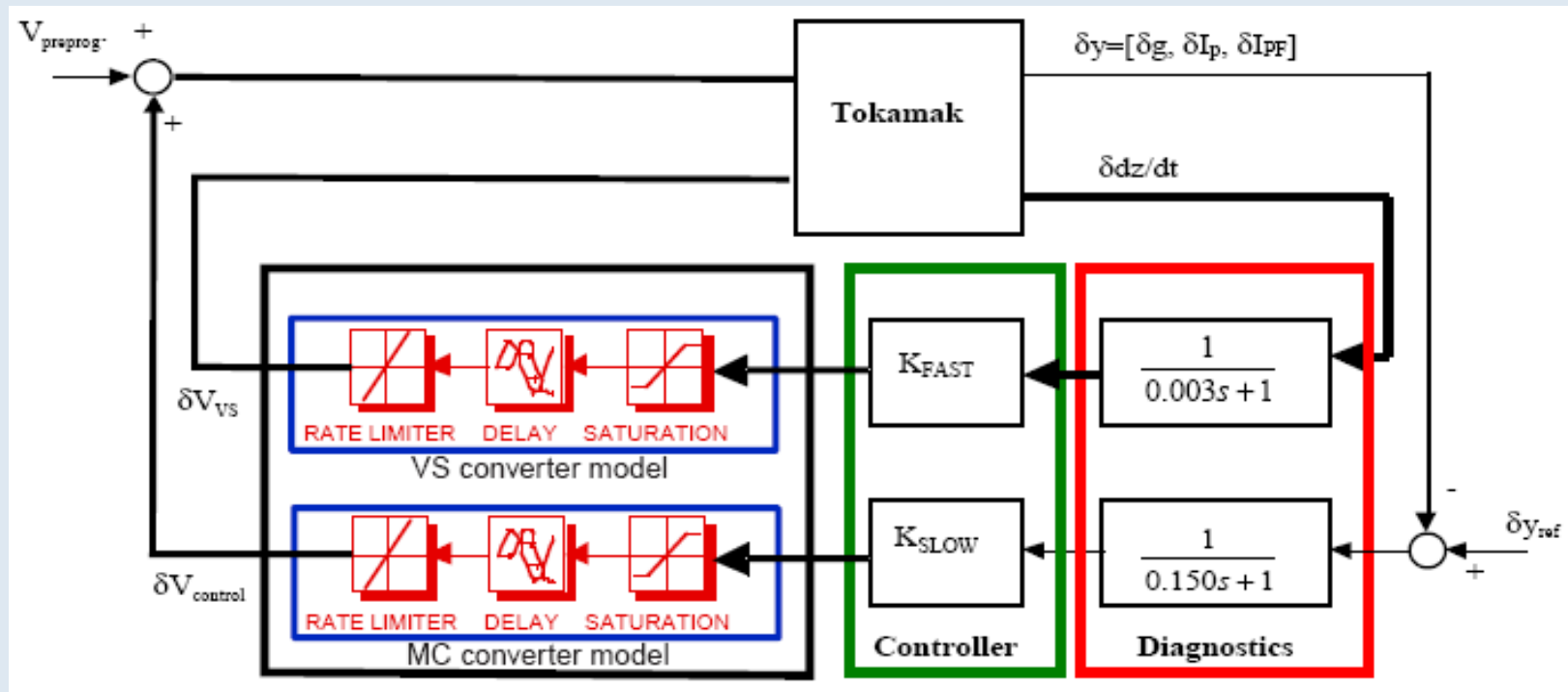
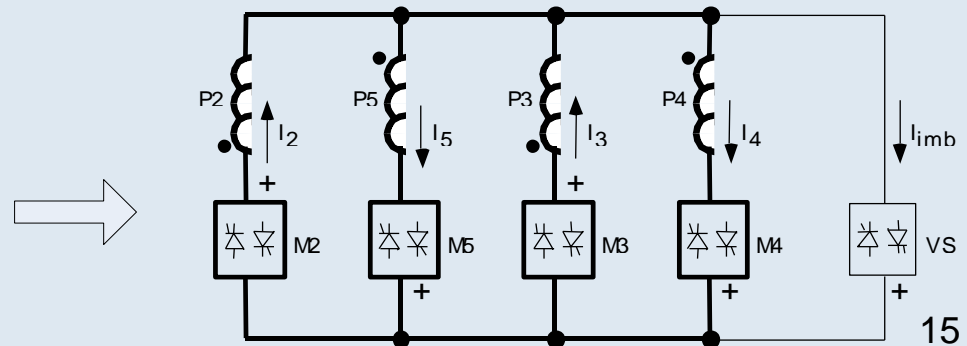


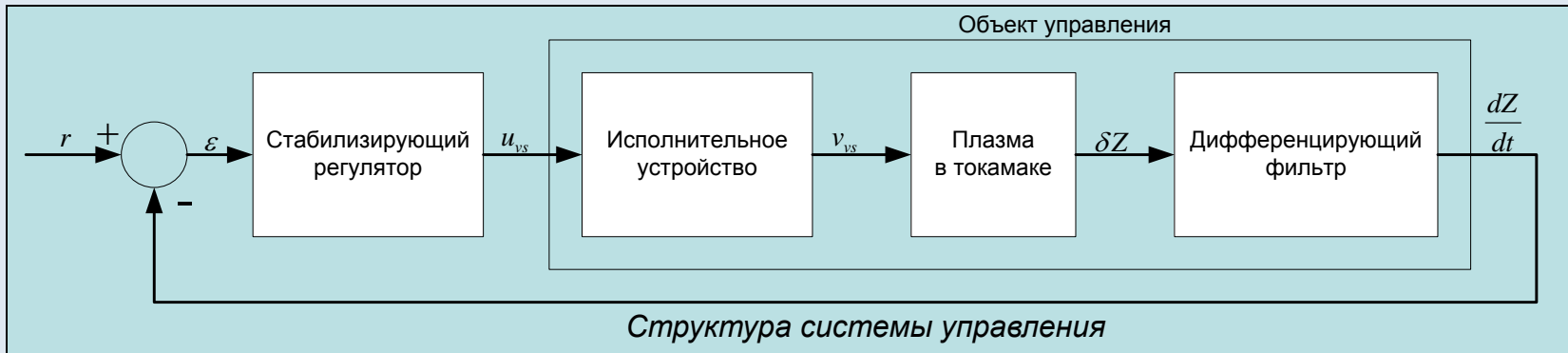
Схема подключения быстрого преобразователя напряжения для стабилизации вертикальной скорости плазмы



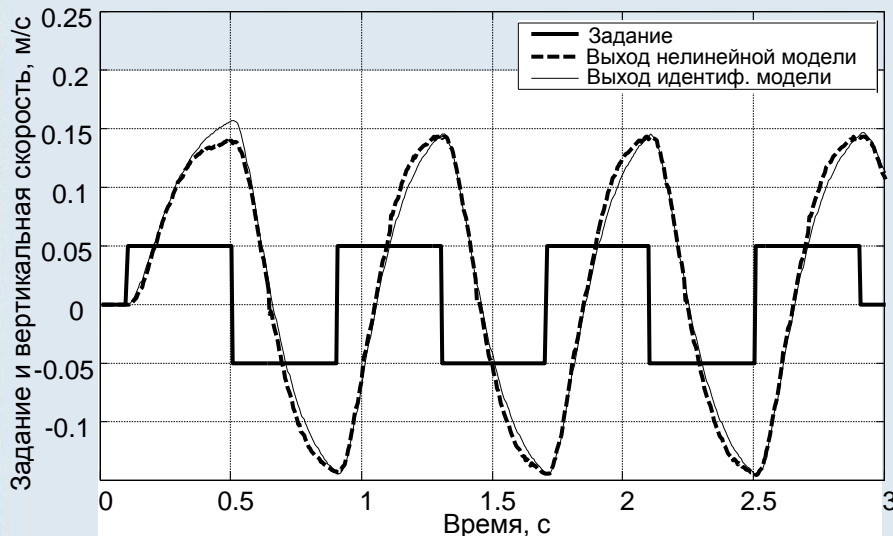
$$I_{imb} = I_2 - I_5 + I_3 - I_4$$

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА КОДЕ «ДИНА»

Объект управления неустойчив, поэтому для формирования тестовых сигналов объект был стабилизирован пропорциональным регулятором.



Сравнение моделей



Результат идентификации

$$W(s) = K / [(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)] \quad K_p = -22$$

Время, с	Ток плазмы, МА	$K$ , м/с/В	$T_1$ , с	$T_2$ , с	Запас по ампл., дБ	Запас по фазе, °
56.2	11.5	0.086	0.032	-0.12	-5.56	34.9
63.2	12.5	0.082	0.039	-0.12	-5.13	29.6
72.6	13.5	0.077	0.041	-0.12	-4.55	16.0
100.0	15.0	0.070	0.038	-0.12	-3.69	28.8

# ДВУХКАСКАДНАЯ СИСТЕМА МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ С РАЗВЯЗКОЙ КАНАЛОВ

Управление токами в обмотках полоидального магнитного поля

Подзадача: **развязать каналы** управления и превратить замкнутую систему в совокупность независимых апериодических звеньев

Объект управления:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx$$

Закон управления:

$$u = K_{sp}r - K_{fb}y$$

$$K_{fb} = B_a^{-1} (A_a - I_{11}) C_a^{-1} \quad \delta I_{coils\ ref}$$

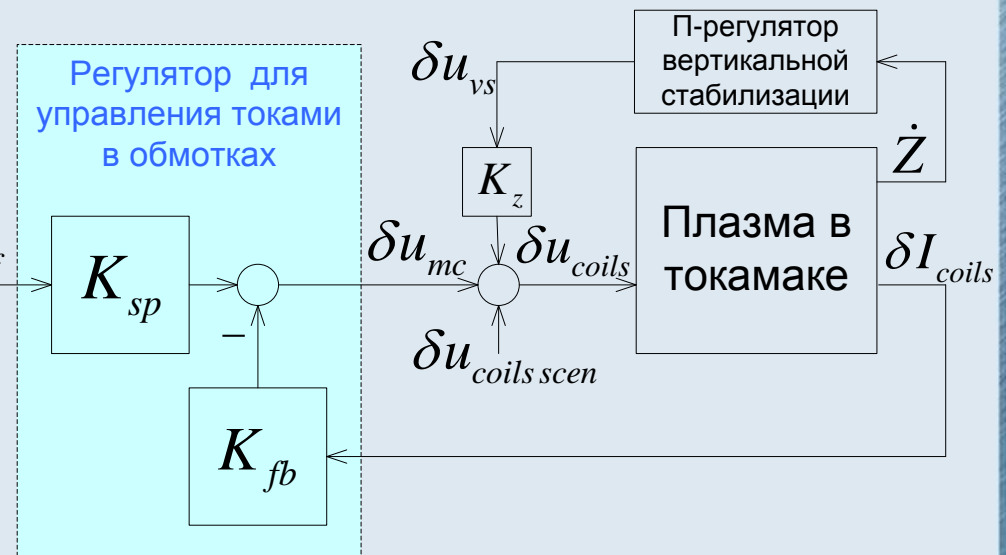
$$K_{sp} = -B_a^{-1} C_a^{-1}$$

Результирующая замкнутая система:

$$\dot{x} = \Lambda x + BK_{sp}r, \quad y = Cx$$

$$\Lambda = A - BK_{fb}C$$

Внутренний каскад управления





# СИНТЕЗ ВНЕШНЕГО КАСКАДА УПРАВЛЕНИЯ

Линеаризованная модель объекта:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bv + E \frac{dw}{dt}, \quad y = Cx + Fw, \quad w = \delta[\beta_p, l_i]^T$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{I_{coils}}^Z & C_{I_{ps}}^Z \\ C_{I_{coils}}^{g, I_{pl}} & C_{I_{ps}}^{g, I_{pl}} \\ C_{I_{coils}}^{I_{coils}} & C_{I_{ps}}^{I_{coils}} \\ 11 & 116 \end{bmatrix} \begin{matrix} \} 1 \\ \} 7 \\ \} 11 \end{matrix}$$

$$C_0 = \left[ C_{I_{coils}}^{g, I_{pl}} \right]_{i,j} \square \left[ C_{I_{ps}}^{g, I_{pl}} \right]_{k,l}, \quad i = \overline{1:7}, j = \overline{1:11},$$

$$k = \overline{1:7}, l = \overline{1:116}$$

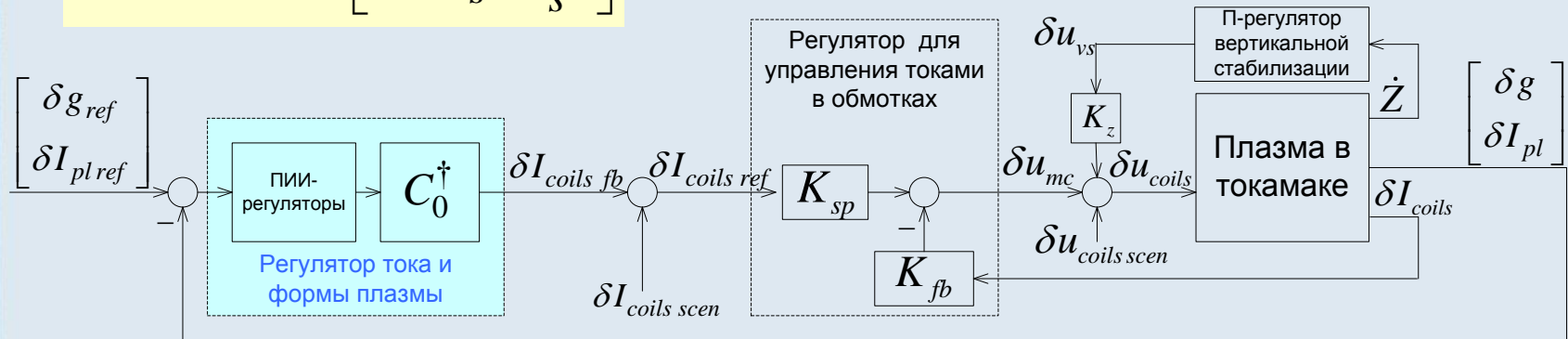
$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \delta g \\ \delta I_{pl} \end{bmatrix} \approx C_0 \delta I_{coils}$$

$$\delta I_{coils ref} = C_0^\dagger \begin{bmatrix} \delta g_{ref} \\ \delta I_{pl ref} \end{bmatrix}$$

ПИИ-регулятор:

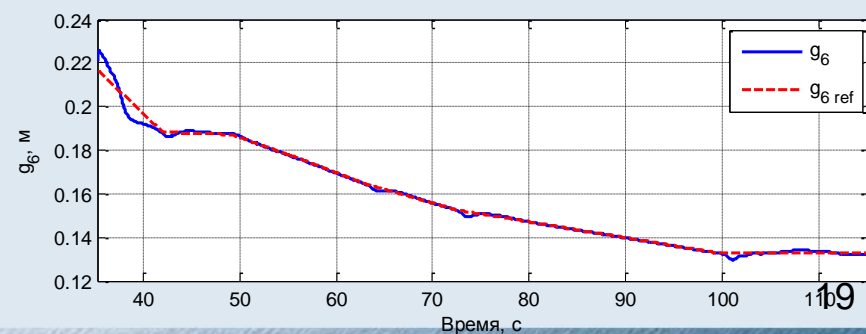
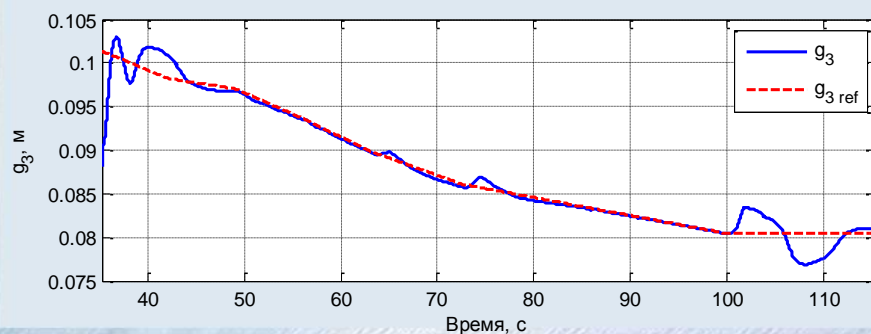
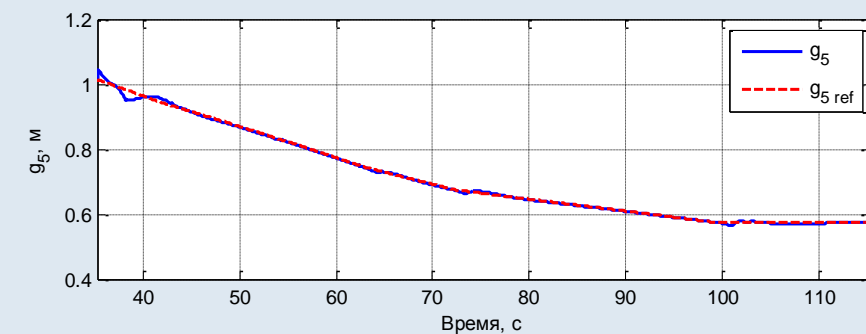
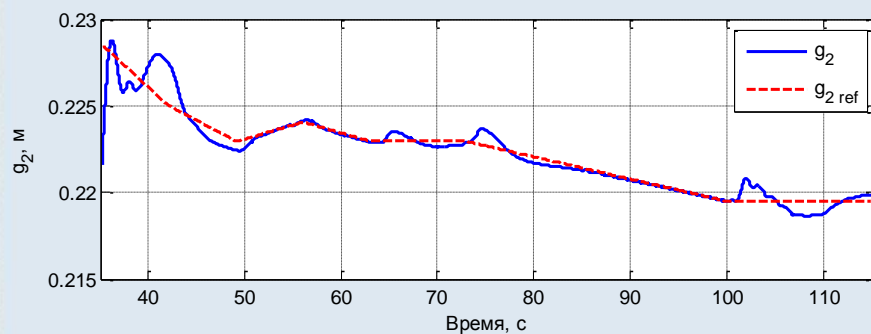
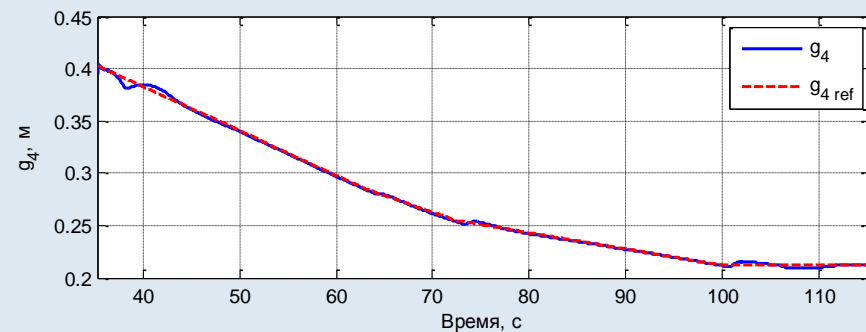
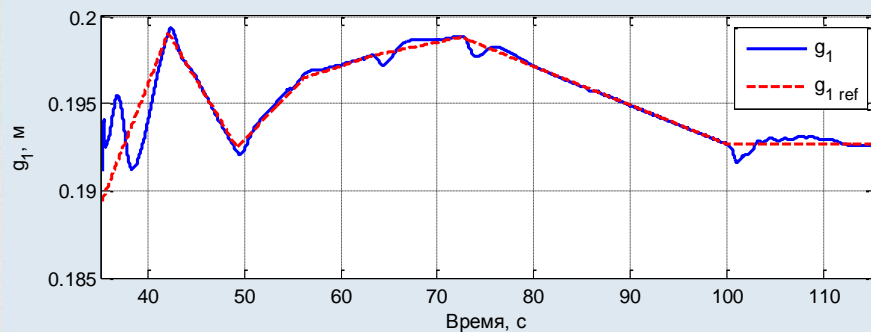
$$W_{PII}(s) = \text{diag} \left[ k_1 + \frac{k_2}{s} + \frac{k_3}{s^2} \right]$$

$$C_0^\dagger = C_0^T (C_0 C_0^T)^{-1}, \quad C_0 C_0^\dagger = \Xi$$



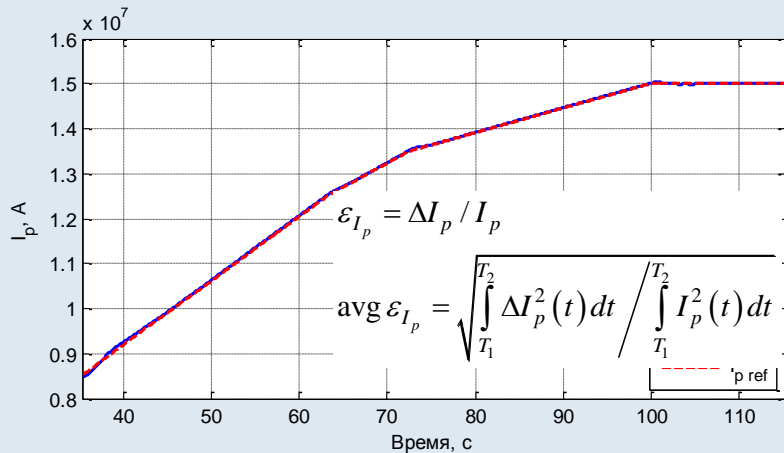
# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА КОДЕ «ДИНА»: СЛЕЖЕНИЕ ЗА ЗАЗОРАМИ В ДИАПАЗОНЕ $I_p = 8.5 \div 15$ МА НА ДИВЕРТОРНОЙ ФАЗЕ РАЗРЯДА

## Слежение за зазорами

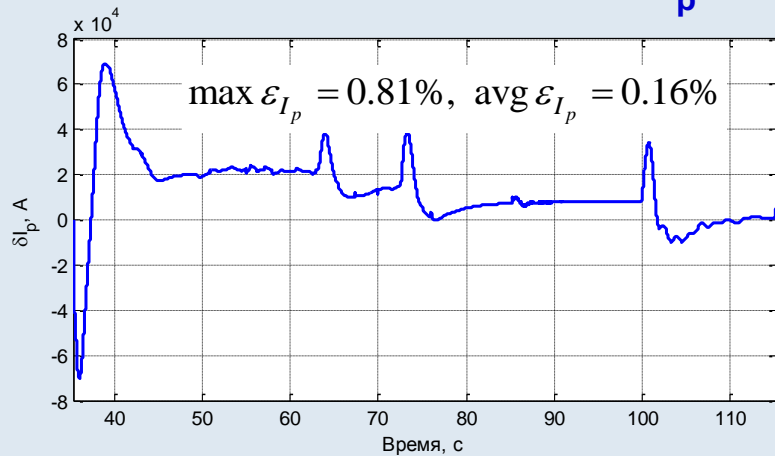


# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА КОДЕ «ДИНА»

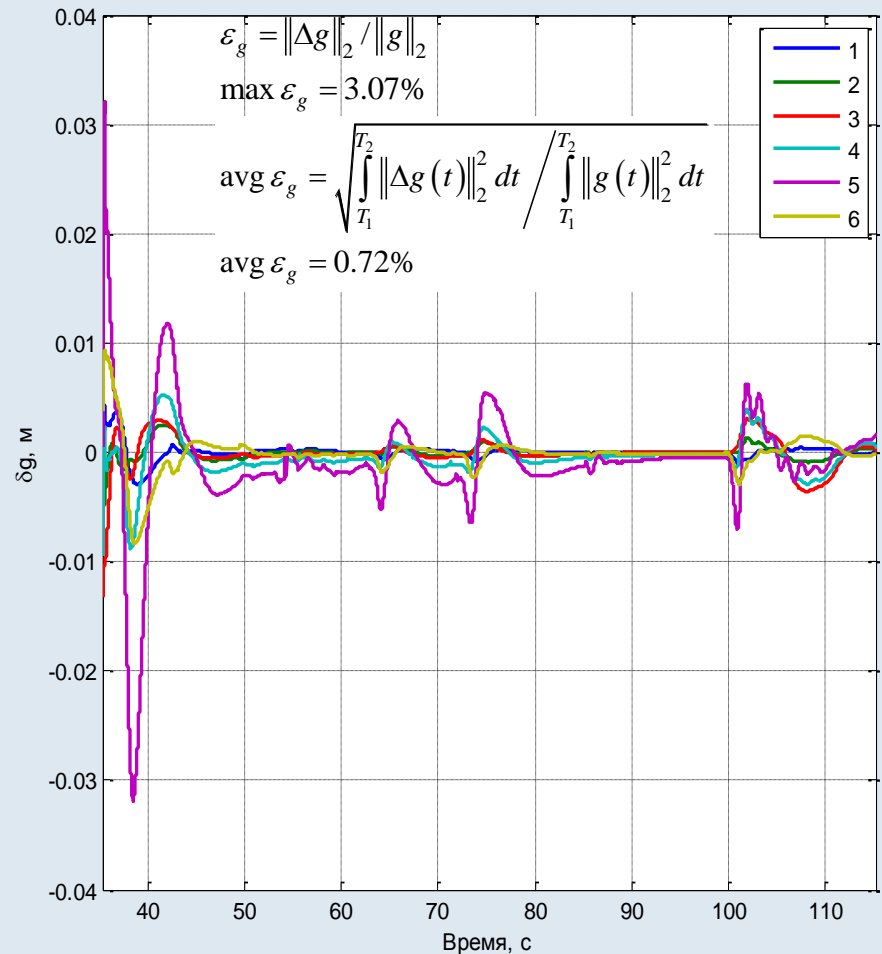
## Ток плазмы и сценарий



## Ошибка слежения за $I_p$



## Ошибки слежения за зазорами

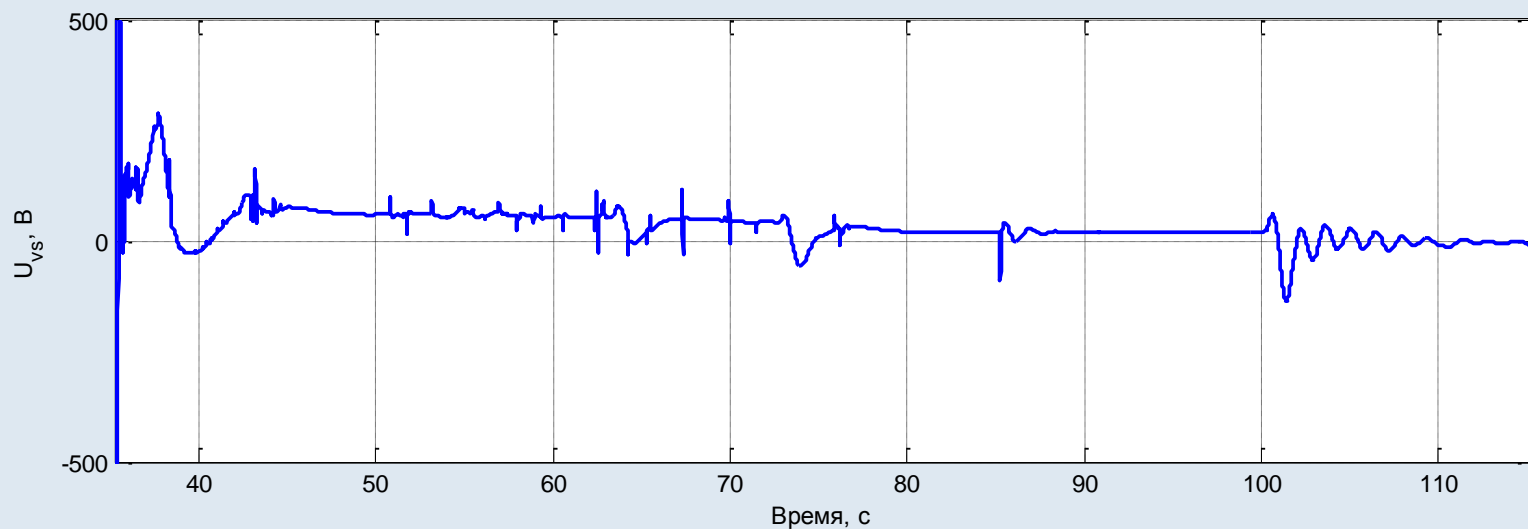


При моделировании код ДИНА был настроен на базу данных ИТЭР номинального сценария 2 для тока плазмы на плато 15 МА

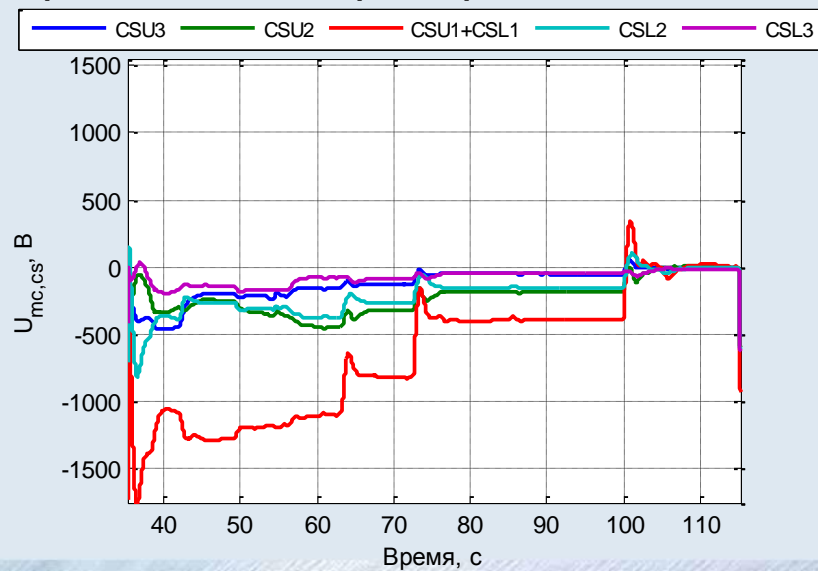


# НАПРЯЖЕНИЯ НА УПРАВЛЯЮЩИХ ОБМОТКАХ

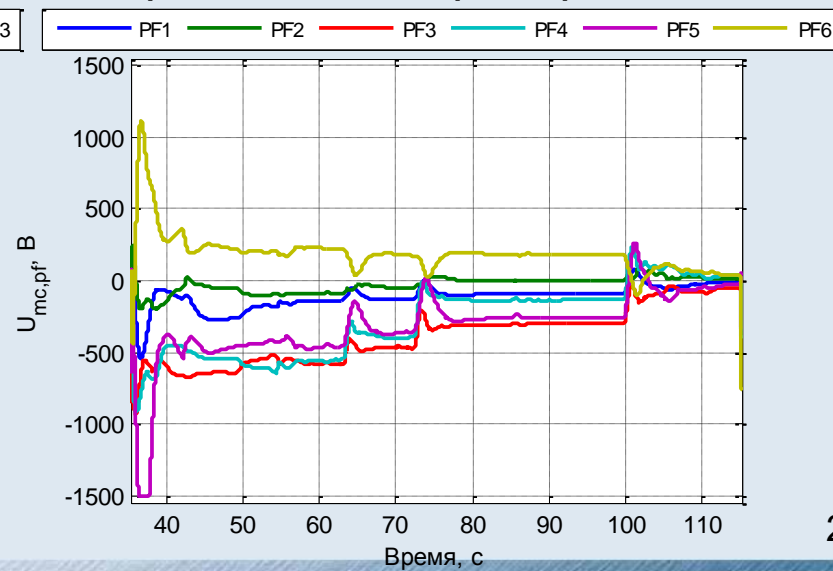
## Напряжение VS – преобразователя



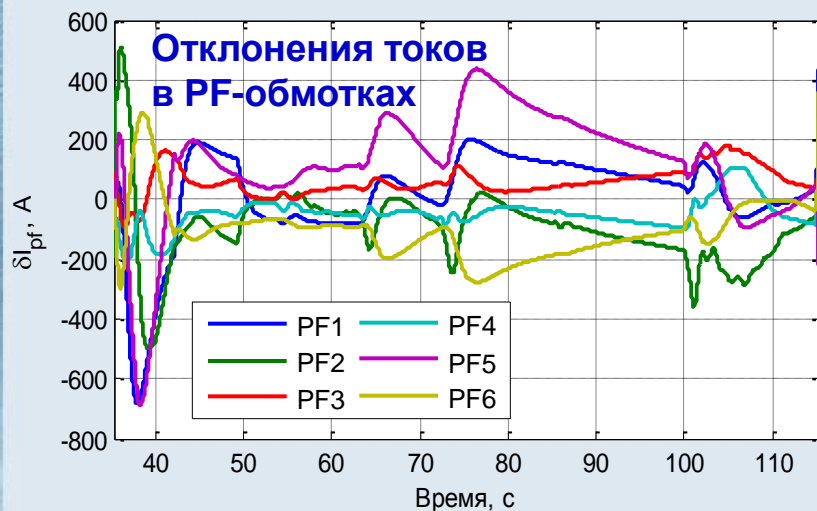
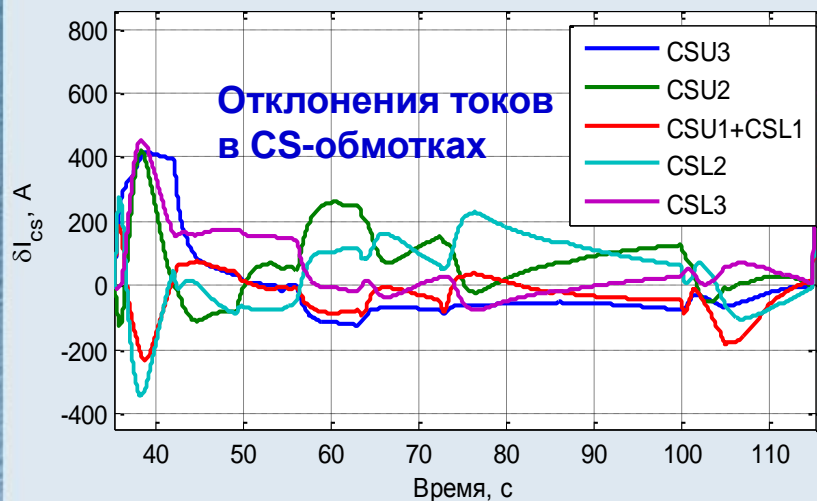
## Напряжения CS-преобразователей



## Напряжения PF-преобразователей



## ТОКИ В УПРАВЛЯЮЩИХ ОБМОТКАХ



При использовании новых сценарных токов управления, полученных при первичном моделировании номинального режима 2 ИТЭР, относительные ошибки слежения за токами были **существенно снижены**:

$$\varepsilon_g = \|\Delta g\|_2 / \|g\|_2$$

$$\max \varepsilon_g = 3.07 \%$$

$$\text{avg } \varepsilon_g = 0.72 \%$$

$$\varepsilon_I = \|\Delta I\|_2 / \|I\|_2$$

$$\max \varepsilon_I = 1.8 \%$$

$$\max \varepsilon_{I_{CS}} = 3.18 \%$$

$$\max \varepsilon_{I_{pf}} = 0.75 \%$$

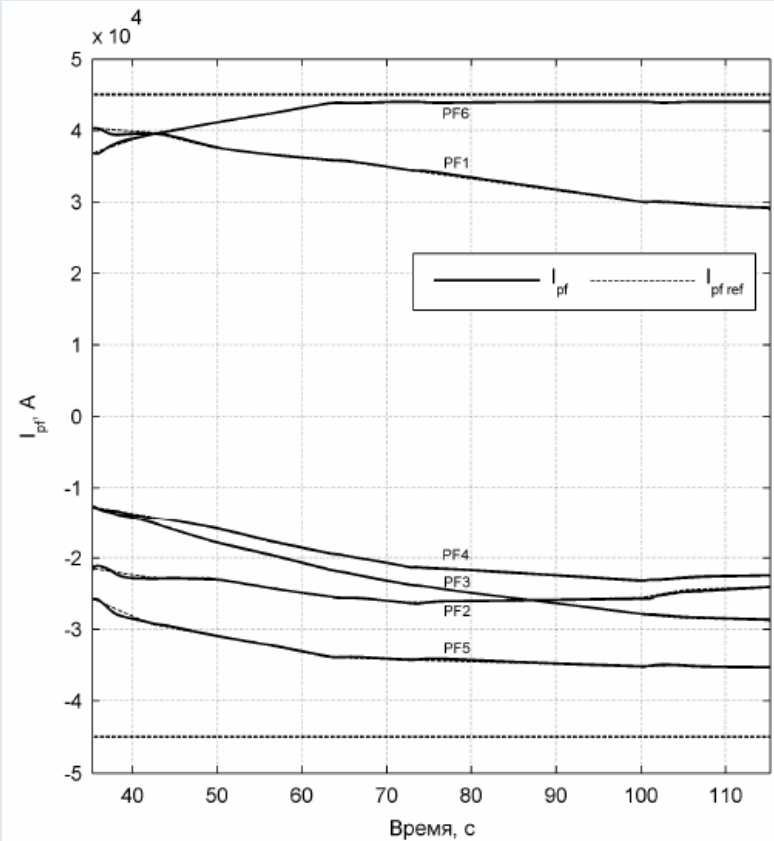
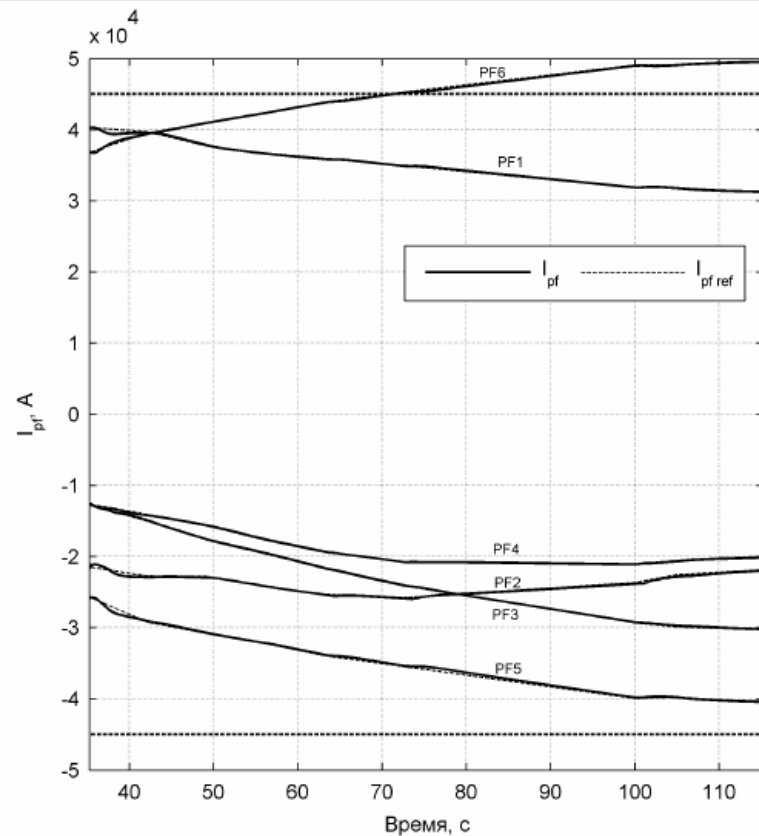
$$\max \varepsilon_{I_p} = 0.81 \%$$

$$\text{avg } \varepsilon_{I_p} = 0.16 \%$$

$$\text{avg } \varepsilon_{I_{CS}} = 1.56 \%$$

$$\text{avg } \varepsilon_{I_{pf}} = 0.46 \%$$

# НАСЫЩЕНИЕ ТОКОВ В КАТУШКАХ УПРАВЛЕНИЯ



$$f(x) = x^T x \rightarrow \min$$

$$C_0 x = y_0, \quad x_0 = C_0^\dagger y_0$$

$$f(x) = x^T x \rightarrow \min$$

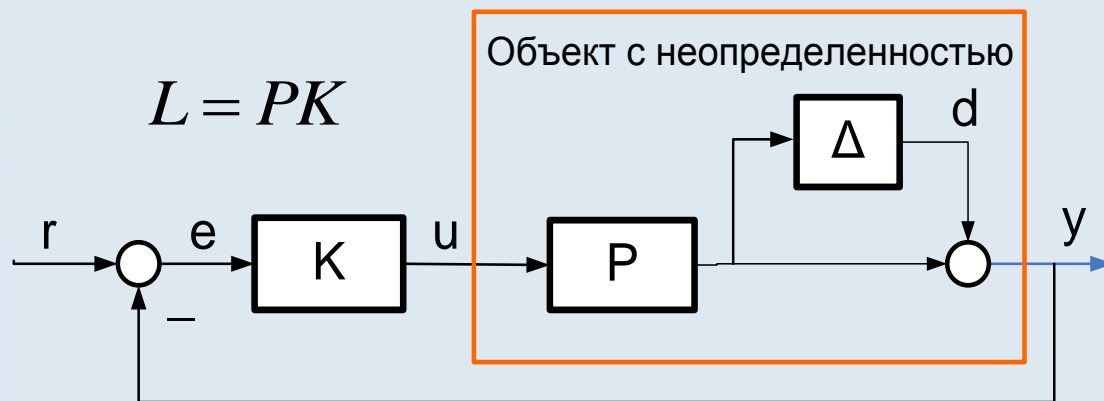
$$C_0 x = y_0, \quad -c < x + x_{ref} < +c$$

$$x = \delta I_{coils fb}, \quad y_0 = \left[ \left( \delta g_{ref} \right)^T \quad \delta I_{pl ref} \right]^T$$



# СИНТЕЗ $H_\infty$ -РЕГУЛЯТОРА МИНИМИЗАЦИЕЙ НОРМЫ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СМЕШАННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Замкнутая система



СВЯЗИ: вход-выход

$$y = Tr + Sd$$

Ограничение

$$S + T = I$$

$$\|y\|_2 \leq \|S\|_\infty \|d\|_2$$

Чувствительность Доп. чувствительность

$$S = (I + L)^{-1} \quad T = L(I + L)^{-1}$$

Запас  
устойчивости

$$\|\Delta\|_\infty \leq 1 / \|T\|_\infty$$

Противоречие

$$\bar{\sigma}(S) = 1 / \underline{\sigma}(I + L) \approx [1 / \underline{\sigma}(L)] \ll 1 \Leftrightarrow \underline{\sigma}(L) \ll 1$$

$$\bar{\sigma}(T) \approx [\bar{\sigma}(L)] \ll 1 \Leftrightarrow \bar{\sigma}(L) \ll 1$$

$$\|S\|_\infty = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[S(j\omega)]$$

$$\bar{\sigma}(S) = +\sqrt{\lambda_{\max}(S^H S)}, S^H = \bar{S}^T$$

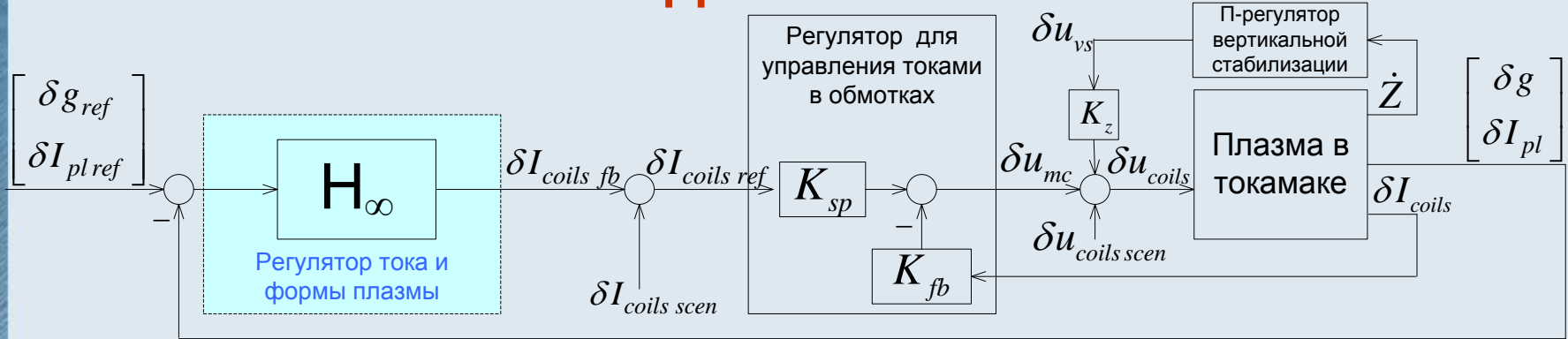
Компромисс в частотной области

Низкие частоты:  $\bar{\sigma}(W_1) \ll 1, \omega \in (0, \omega_1], \underline{\sigma}(L) \ll 1$

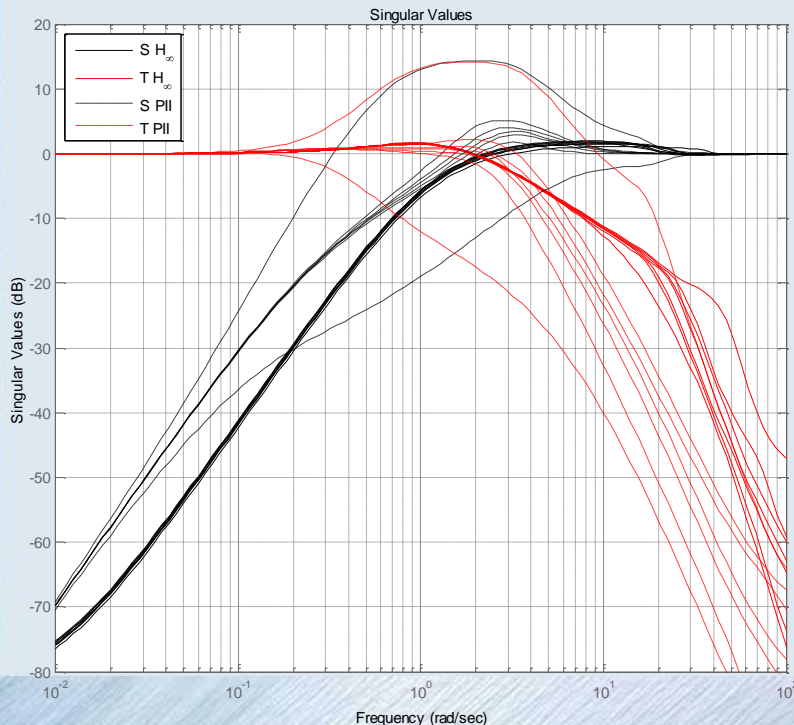
Высокие частоты:  $\bar{\sigma}(W_2) \ll 1, \omega > \omega_2, \bar{\sigma}(L) \ll 1$

$$\left\| \frac{W_1(s)S(s)}{W_2(s)T(s)} \right\|_\infty \xrightarrow{K(s)} \min$$

# ВСТРОЕННЫЙ $H_\infty$ -РЕГУЛЯТОР ВО ВНЕШНИЙ КАСКАД УПРАВЛЕНИЯ



## Сингулярные числа $S$ и $T$



ПИИ :  $\|S\|_\infty = 14.3 \text{ dB}$ ,  $\|T\|_\infty = 14.1 \text{ dB}$

$H_\infty$  :  $\|S\|_\infty = 1.93 \text{ dB}$ ,  $\|T\|_\infty = 1.61 \text{ dB}$

$$\|S\|_\infty = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[S(j\omega)] \quad S + T = I$$

$$\|y\|_2 \leq \|S\|_\infty \|d\|_2$$

**Связь 2- норм сигналов**

$$\|\Delta\|_\infty \leq 1/\|T\|_\infty$$

**Запас робастной устойчивости**

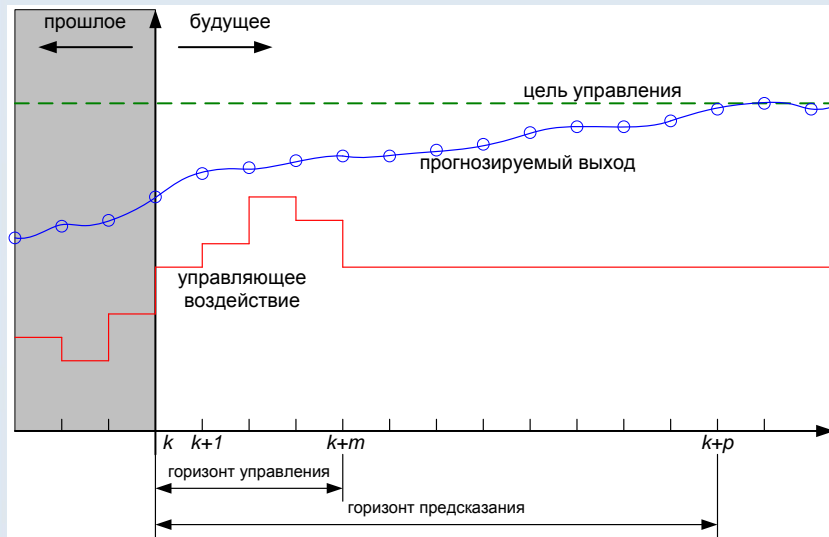
# УПРАВЛЕНИЕ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ НА ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

англ.: *Model Predictive Control (MPC)*

**Критерий  
качества:**

$$J = \delta u^T \cdot W_{\delta u} \cdot \delta u + (y - r)^T \cdot W_y \cdot (y - r) + (u - u_{target})^T \cdot W_u \cdot (u - u_{target})$$

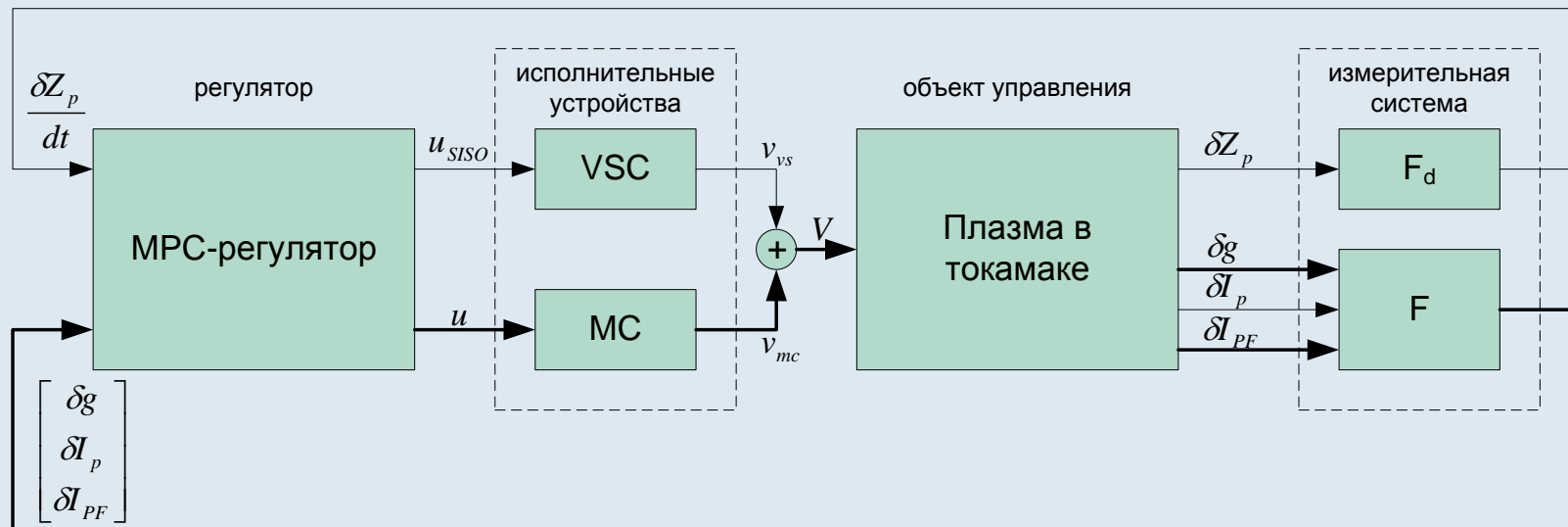
## Прогноз управления



- По известным значениям входов и выходов прогнозируется будущее поведение объекта
- Оптимизируется показатель качества  $J$  путём изменения будущих управляющих воздействий
- На объект подаётся только первый элемент из рассчитанной последовательности управлений – **метод удаляющегося горизонта**



# ОДНОКОНТУРНАЯ МНОГОМЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРОМ

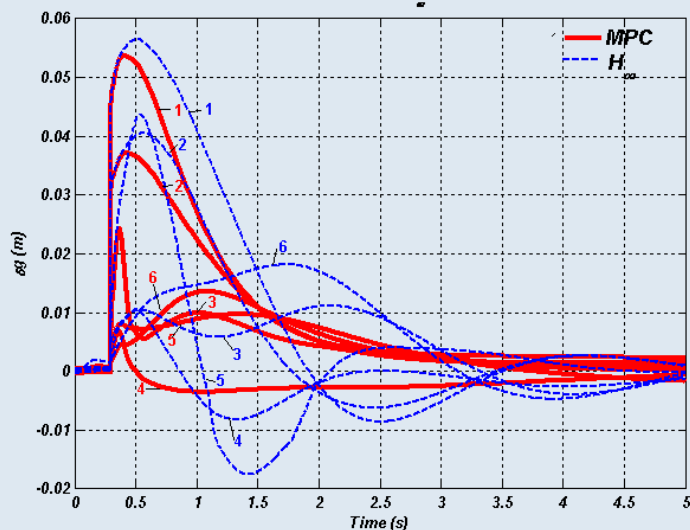


На каждом шаге управления многомерный регулятор с прогнозирующей моделью преобразует полный вектор выходных сигналов объекта в управляющие сигналы преобразователей напряжения

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ И ТОКОМ ПЛАЗМЫ С $H_\infty$ & MPC-РЕГУЛЯТОРАМИ НА КОДЕ «ДИНА»

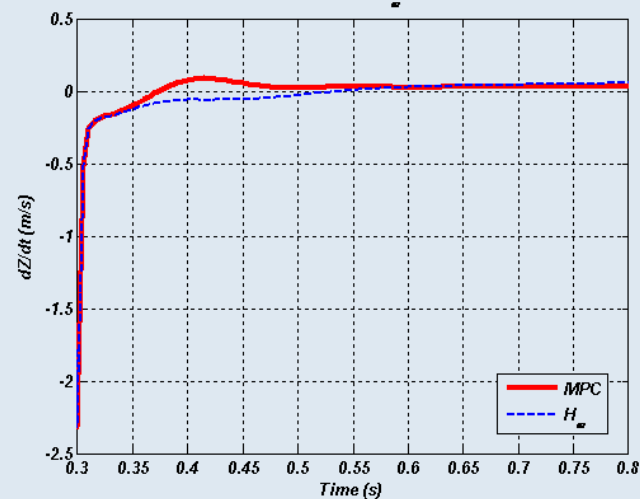
## Смещения зазоров

MPC and  $H_\infty$



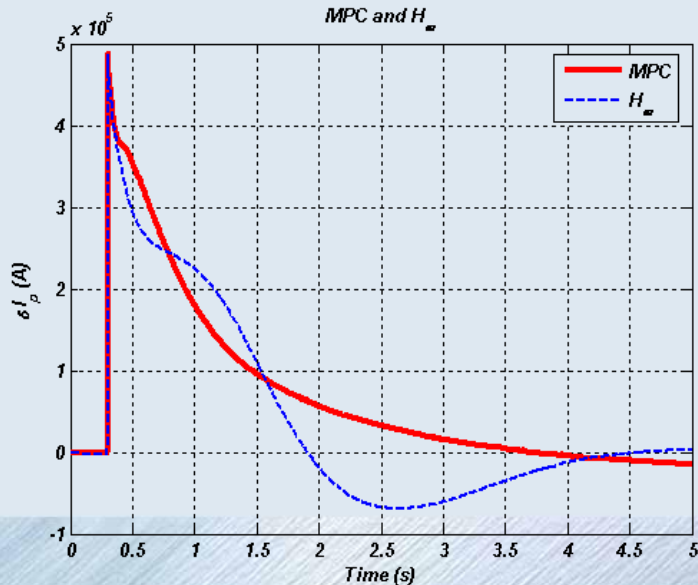
## Вертикальная скорость плазмы

MPC and  $H_\infty$



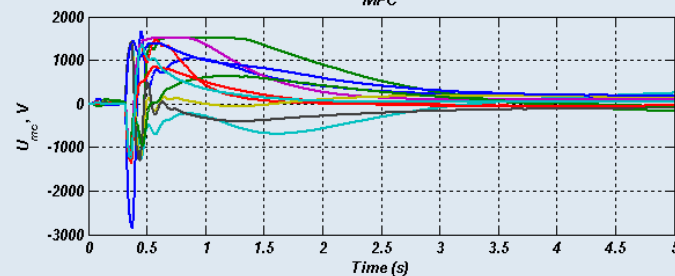
## Вариации тока плазмы

MPC and  $H_\infty$

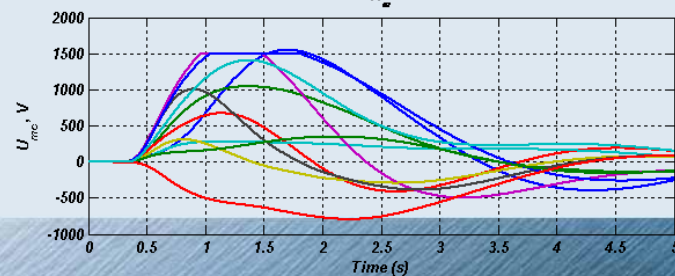


## Напряжения управления

MPC



$H_\infty$



# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕМ ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

- с развязкой каналов управления на нулевой частоте
- с прогнозирующей моделью в контуре обратной связи
- с  $H_\infty$  регулятором и логикой ограничения входных воздействий



# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

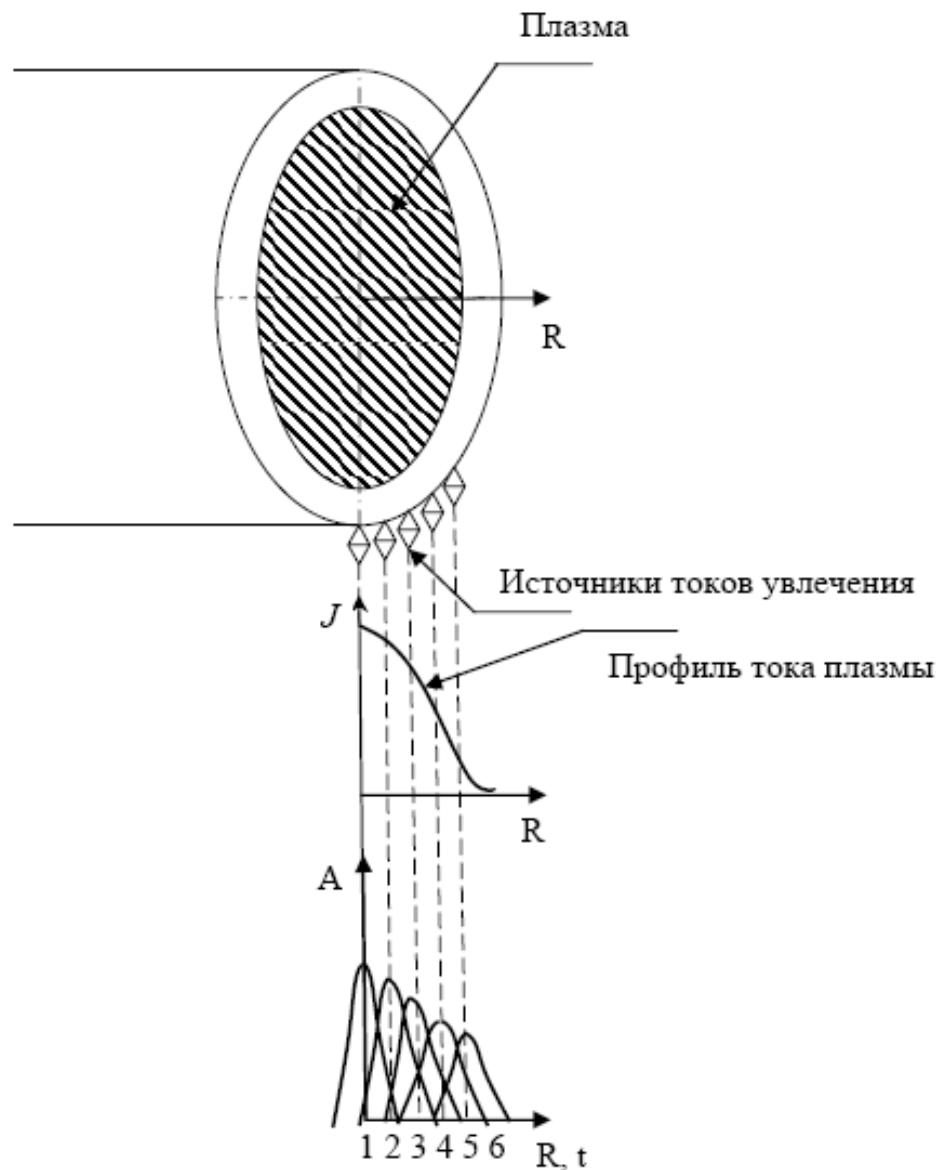
Разработать систему управления для перевода профиля тока плазмы в заданное положение в диапазоне температуры плазмы на магнитной оси от 0,1 кэВ до 18 кэВ.

## КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ

- Модель объекта управления – уравнение диффузии магнитного поля в плазму
- Для управления профилем плотности тока плазмы используются пять независимых источников токов увлечения – исполнительных устройств

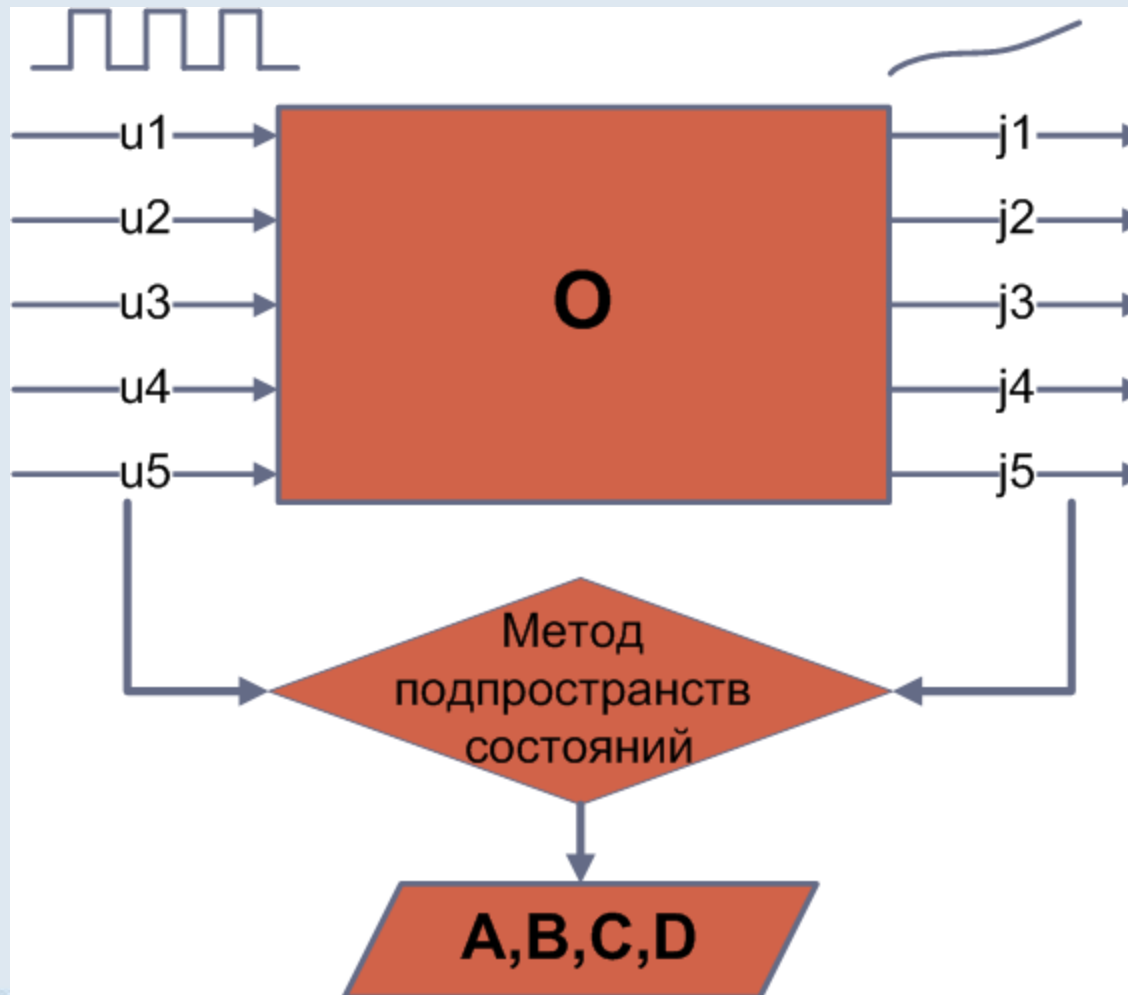
$$\dot{\Psi} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} - \dot{\Phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} = \frac{4\pi}{\sigma} \left( J \frac{\partial F}{\partial \rho} - F \frac{\partial J}{\partial \rho} \right) + \langle \vec{j}_{CD} \vec{B} \rangle \frac{V'c}{\sigma}$$

# СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ



# ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ

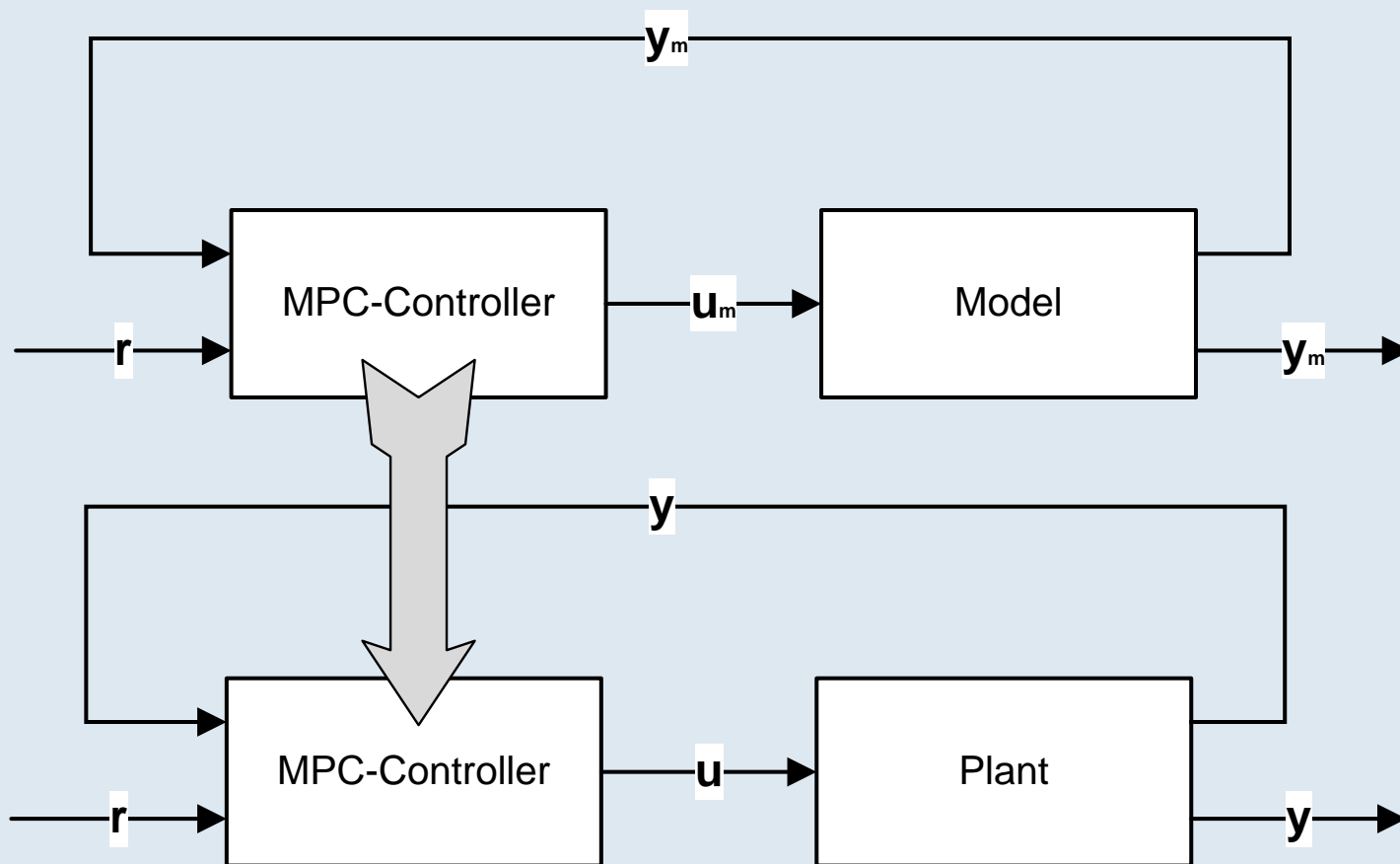
Задача идентификации решается в ряде точек с фиксированным значением температуры на магнитной оси: **0.1, 1,5,10,15,18 кэВ.**



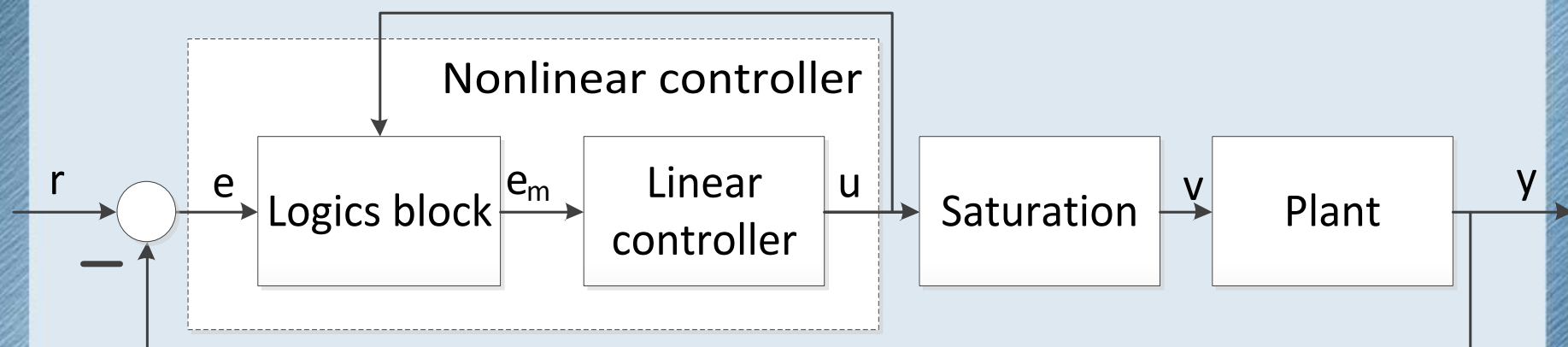


# НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРА И СИСТЕМЫ

Настройка регулятора проводится на **идентифицированной модели** объекта с последующим переносом на исходную модель плазмы



# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕМ ТОКА С $H_\infty$ -РЕГУЛЯТОРОМ И НАСЫЩЕНИЕМ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ



Идентифицированные модели имеют 5 порядок при всех температурах.

Регуляторы различаются:

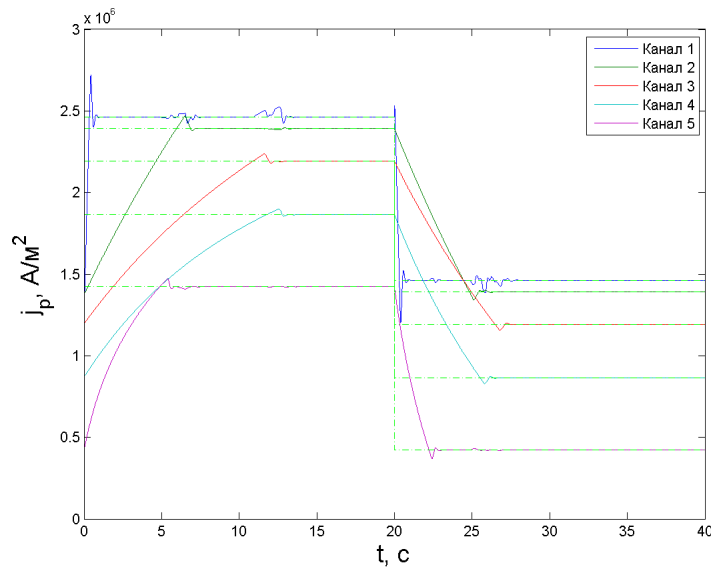
14 порядок при 100 эВ

12 порядок при 3 кэВ

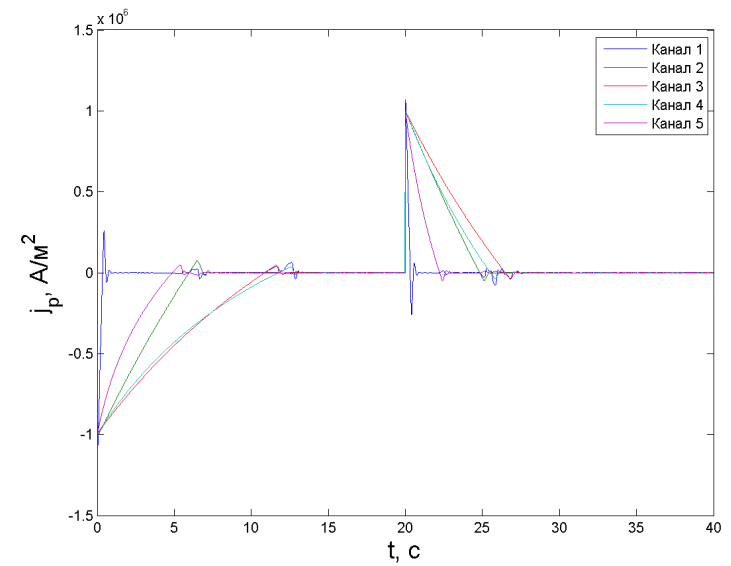
10 порядок при 10 кэВ

# $H_{\infty}$ -СИСТЕМА ПРИ СМЕНЕ УСТАВОК, $T=18$ кэВ

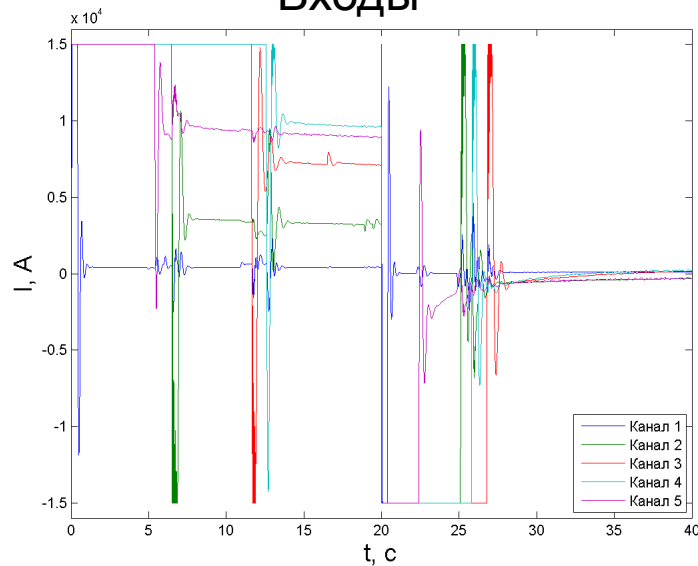
## Выходы



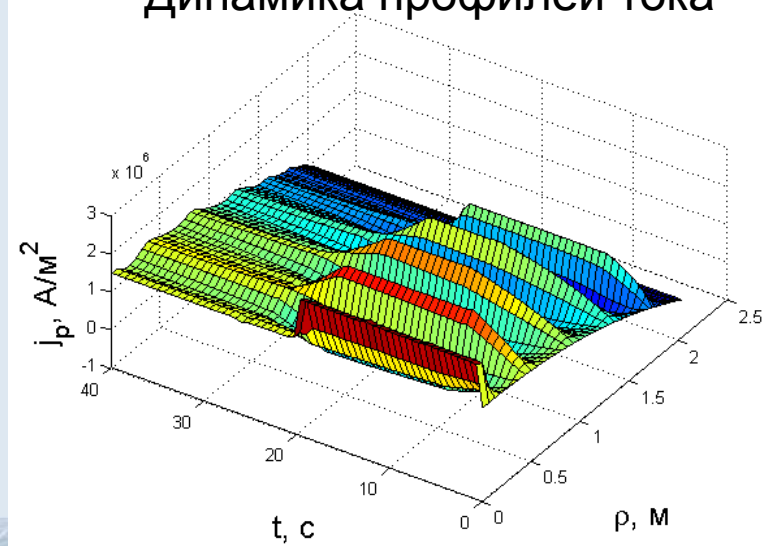
## Ошибки управления



## Входы



## Динамика профилей тока





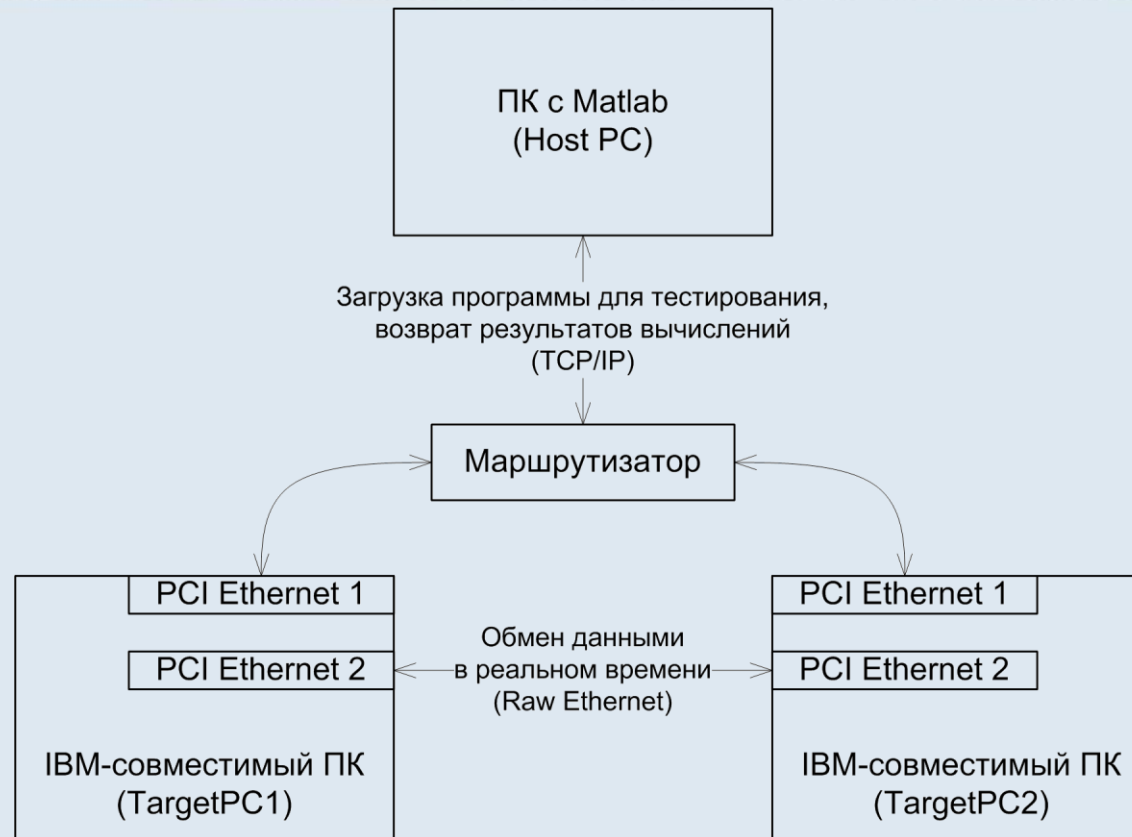
# ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ

**Платформа внедрена в учебный процесс МГТУ и МФТИ.**

Интегрирует нелинейный плазмо-физический код ДИНА, численную процедуру его линеаризации, линеаризованные модели, базу данных сценариев ИТЭР, системы магнитного и кинетического управления плазмой, ключи переключения моделей плазмы в токамаке, пакетное моделирование.



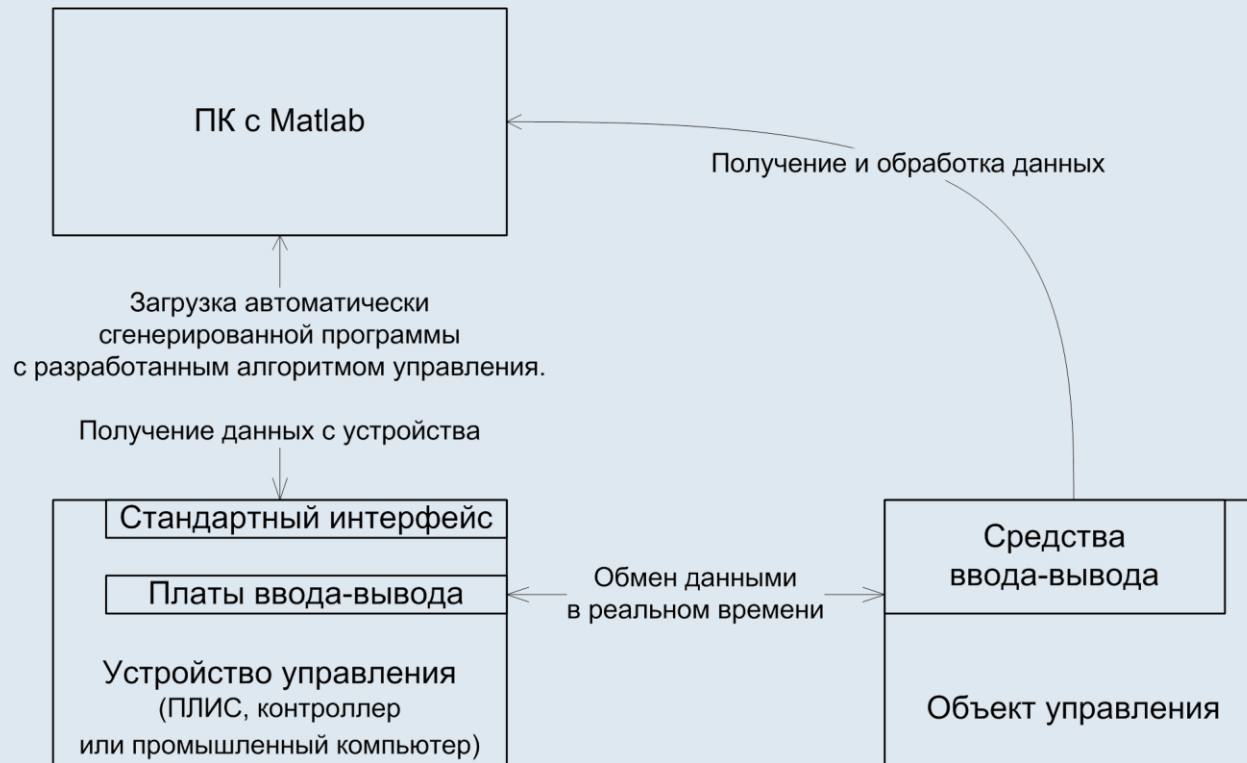
# Экспериментальный стенд реального времени



Структурная схема стенда

Стенд реализован при помощи средств  
Real-Time Workshop и xPC Target непосредственно из Simulink-схемы

# Экспериментальный стенд реального времени



Структурная схема подключения вычислительного устройства к установке

Реализация этого этапа, в зависимости от типа вычислительного устройства, возможна при помощи средств:

Real-Time Workshop, Real-Time Workshop Embedded Coder, Target Support Package, Simulink HDL Coder



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлен системный подход по использованию комплекса **методов теории управления** для решения задач **магнитного и кинетического управления плазмой** в ИТЭР
- Разработана и внедрена в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана и МФТИ **программно-вычислительная платформа** в среде **MATLAB/SIMULINK** для моделирования систем управления плазмой на плазмо-физическом коде ДИНА

# МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И СЕМИНАРЫ

- The 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, Dec 4-7, **2001**
- The 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 2004, Orlando, Florida, USA, **2004**
- 32nd EPS Plasma Physics Conference, Tarragona, Spain, June, **2005**
- The 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, Dec 13-15, **2006**
- Workshop on “Active Control of Fusion Plasmas in Tokamaks”, General Atomics, San Diego, CA, USA, December 12, **2006**  
<http://www.lehigh.edu/~eus204/workshop/acfptw.html>
- International Workshop “Control for Nuclear Fusion”, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, May 7-8, **2008**  
[www.wtb.tue.nl/cnf/program.php](http://www.wtb.tue.nl/cnf/program.php)
- 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, December 16-18, **2009**

# Публикации в ведущих журналах и трудах конференций

- Ю.В. Митришкин, В.Э. Лукаш, Р.Р. Хайрутдинов. Система робастного управления током, положением и формой плазмы в ИТЭР. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, Вып. 1, стр. 61-81, 2005.
- Y.V. Mitrishkin, V.N. Dokuka, R.R. Khayrutdinov. Linearization of ITER plasma equilibrium model on DINA code. 32nd EPS Plasma Physics Conference, Tarragona, Spain, ID P5.080, June 2005.
- V.M. Leonov, Y.V. Mitrishkin, V.E. Zhogolev. Simulation of burning ITER plasma in multi-variable kinetic control system. Proc. of the 32 EPS Plasma Physics Conference, Tarragona, Spain, 2005, ID P5.078.
- Y.V. Mitrishkin, V.N. Dokuka, R.R. Khayrutdinov, A.V. Kadurin. Plasma magnetic robust control in tokamak-reactor. Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, USA, 2006, 2207-2212.
- В.Н. Докука, А.В. Кадурын, Ю.В. Митришкин, Р.Р. Хайрутдинов. Синтез и моделирование  $H_\infty$  системы магнитного управления плазмой в токамак-реакторе. Автоматика и телемеханика, № 8, 2007, 126-145.
- Ю.В. Митришкин, А.Я. Коростелев. Система с прогнозирующей моделью для управления формой и током плазмы в токамаке. Проблемы управления, №5, 2008, 19-25.
- Ю.В. Митришкин, Н.М. Карцев. Стабилизация замкнутой системы управления с неопределенностью в нестационарных параметрах объекта. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение, №4, 2009, 69-83.
- Y.V. Mitrishkin, A.Y. Korostelev, V.N. Dokuka, R.R. Khayrutdinov. Design and Modeling of ITER Plasma Magnetic Control System in Plasma Current Ramp-Up Phase on DINA Code. Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, 2009, 1354-1359.