Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Школа – ИЯТШ

Отделение – Ядерно-топливного цикла

Специальность – Электроника и автоматика физических установок

ОТЧЕТ

О ВЫПОЛНЕНИИ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

«РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ»

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент гр. 0702 |  | подпись | дата |  | Р.Р. Мухсинов |
| Руководитель, доцент ОЯТЦ, канд. техн. наук. |  | подпись | дата |  | В.М. Павлов |
| Проверил доцент ОЯТЦ, канд. техн. наук. |  | подпись | дата |  | А.В. Обходский |

Томск – 2023

**Оглавление**

[Введение 3](#_Toc156582495)

[1. Литературный обзор 4](#_Toc156582496)

[2. Практическая часть 8](#_Toc156582497)

[2.1. Моделирование плазмы 8](#_Toc156582498)

[2.2. Моделирования клапана PEV-1 9](#_Toc156582499)

[2.3. Расчет начальных условий и временных характеристик 11](#_Toc156582500)

[2.3.1. Графический интерфейс пользователя 11](#_Toc156582501)

[2.3.2. Расчет временной характеристики откачки 12](#_Toc156582502)

[2.3.3. Расчет количества частиц в камере в начальный момент времени 13](#_Toc156582503)

[2.4. Проверка модели 13](#_Toc156582504)

[Заключение 15](#_Toc156582505)

[Список источников 16](#_Toc156582506)

[Приложение А 17](#_Toc156582507)

[Приложение Б 20](#_Toc156582508)

# Введение

Современные технологии исследования и использования плазмы имеют огромное значение для развития энергетической науки и техники. Одним из перспективных устройств, использующих плазму в качестве рабочего вещества, является токамак.

Целью данной учебно-исследовательской работы является разработка системы управления плотностью плазмы в токамаке КТМ. Токамак КТМ (Казахстанский токамак материаловедческий) — это установка, созданная для исследования плазменных процессов и разработки технологий, необходимых для строительства будущей термоядерной установки.

Основным назначением термоядерной материаловедческой установки КТМ является исследование взаимодействий плазма-стенка вакуумной камеры, плазма-пластины дивертора, плазма-лимитер при воздействии потоков энергий и проведения испытуемых материалов в условиях воздействия на них мощных корпускулярных и тепловых потоков и т.п. [1].

Разработка системы управления плотностью плазмы является одной из ключевых задач для обеспечения стабильной работы токамака КТМ. Плотность плазмы оказывает существенное влияние на процессы термоядерного синтеза, а также на поведение плазмы внутри токамака. Поддержание оптимальной плотности плазмы позволяет достичь высокой эффективности термоядерного синтеза и минимизировать нежелательные явления, такие как тепловые потери и разрушение материалов конструкции.

В данной работе будет рассмотрен и реализован способ управления плотностью плазмы на основе управления газонапуском. Система газонапуска является одной из систем, эффективное функционирование которой определяет основные показатели плазменного разряда.

# Литературный обзор

Рассмотрим систему газонапуска токамака КТМ, представленную на рисунке 1.

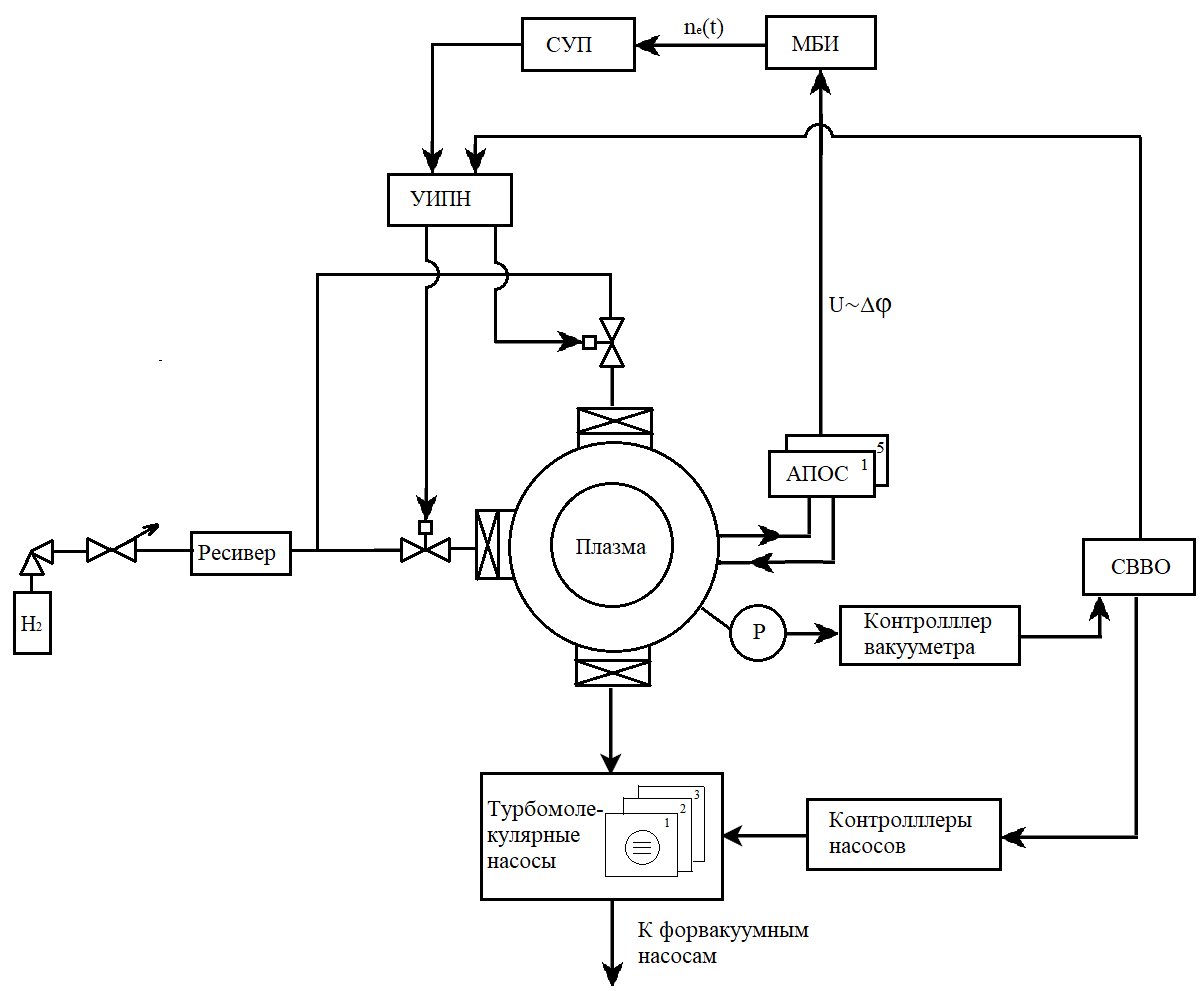


Рисунок — Функциональная схема системы газонапуска

Измерение интегральной плотности электронов в плазме выполняется с использованием многоканального бессбойного интерферометра (МБИ). Принцип действия интерферометра основан на выделении фазового сдвига, который претерпевает зондирующее излучение при его распространении через плазму. Фазовый сдвиг пропорционален интегральной плотности электронов, которая используется в контуре управления формой плазмы с помощью системы управления плазмой (СУП) и газонапуском. Сигнал на интерферометр приходит через аппаратуру приема и обработки сигналов (АПОС).

Управление газонапуском осуществляется с помощью управляемого источника питания натекателей газонапуска (УИПН). УИПН формирует импульсы напряжения заданной амплитуды, частоты и скважности для управления пьезоэлектрическим клапаном – натекателем PEV-1.

Два пьезоэлектрических клапана подключены через ресивер, который обеспечивает давление в 1 кгс/см2.

Давление в вакуумной камере токамака поддерживается с помощью системы высоковакуумной откачки (СВВО), которая включает в себя контур управления тремя турбомолекулярными насосами.

Для создания системы управления плотностью плазмы в токамаке необходимо создать модель технического объекта управления (ТОУ).

Плотность плазмы равна количеству электронов и ионов в единице объема и определяется балансом между скоростью поступления атомов рабочих газов в плазму и временем жизни частиц . За счет наличия газоотдачи со стенок камеры, в течении разряда должно выполняться измерение плотности плазмы с помощью специальной диагностики —интерферометра, чтобы уже по величине отклонения количества частиц формировать управляющие воздействия на регулируемые клапаны газонапуска [1].

Баланс частиц газа в плазме описывается системой уравнений (1) [2].

где — количество частиц водорода в плазме;

— количество частиц водорода на стенках вакуумной камеры;

— количество частиц водорода в вакуумной камере;

— количество частиц, поступаемое от системы газонапуска.

Система имеет пять временных характеристик — , , , , Так, — постоянная времени релаксации плазмы, — постоянная времени удержания частиц, — постоянная времени ионизации, — постоянная времени рекомбинации, — постоянная времени откачки, определяющая скорость откачки из системы объемного газа [3, 4].

Постоянную времени откачки можно получить, аппроксимируя график изменения количества частиц во времени по уравнению .

Остальные временные характеристики можно получить путем аппроксимации данных к графику вида ( — усредненная по линейке электронная плотность, измеренная методом FIR, дальней инфракрасной спектроскопии, — восстановленный объем плазмы) [2].

Количество частиц водорода в вакуумной камере в начальный момент времени можно рассчитать на основе уравнения Клапейрона-Менделеева. Количество вещества рассчитывается по формуле (3).

Зная количество вещества, можно получить количество частиц в начальный момент, пользуясь законом Авогадро.

Как описывалось выше, управление газонапуском на КТМ осуществляется с помощью управляемого источника питания пьезокерамического клапана — натекателя PEV-1 [5]. Под действием подаваемого на пьезоэлемент напряжения происходит линейное сокращение его размера; сокращаясь, пьезоэлемент перемещает запирающий элемент и тем самым открывает доступ потоку газа. Изменяя величину напряжения, подаваемого на пьезоэлемент, можно регулировать величину зазора и тем самым величину напуска газа. Зависимость подаваемого на клапан напряжения и выходного количества газа представлена на рисунке 2, где по оси абсцисс расположен объемный расход в см3/мин, а по оси ординат — напряжение, подаваемое на клапан [6].

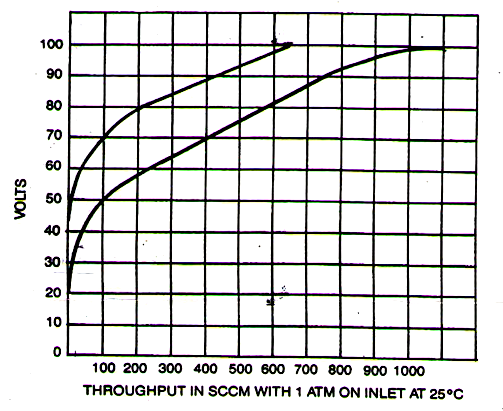


Рисунок — Характеристика клапана PEV-1

# Практическая часть

## Моделирование плазмы

На КТМ с помощью плотности электронов в плазме диагностической подсистемой организовано измерение Np, а Nv можно оценить по показаниям датчиков давления в камере, Nw не измеряется.

Для моделирования технического объекта управления (ТОУ) был использован блок State-Spaсe в среде Matlab Simulink. Данный блок реализует систему, поведение которой описывается уравнениями типа:

Для системы (1) число состояний n=3 X= [Np, Nw, Nv]. Число управляющих воздействий m=1 u= [Г(t)]. Число выходов r=2 [Np, Nv]. Исходя из этого матрица B должна иметь размерность 3x1, матрица C должна иметь размерность 2x3, а матрица D размерность 2x1. Входная координата u генерируется в виде массива [0, 0, Г(t)].

Таким образом матрицы A, B, C, D примут вид:

Матрицы генерируются в скрипте MatLab и передаются в модель установки в среде Simulink.

Для того, чтобы проверить модель плазмы, были выставлены постоянные времени токамака TCV. В качестве реального графика, с которым проводилось сравнение, использовался график из статьи «Non-linear digital real-time density control in the TCV tokamak» [2]. Результаты моделирования и график для сравнения при одинаковом напуске газа представлены на рисунке 3.

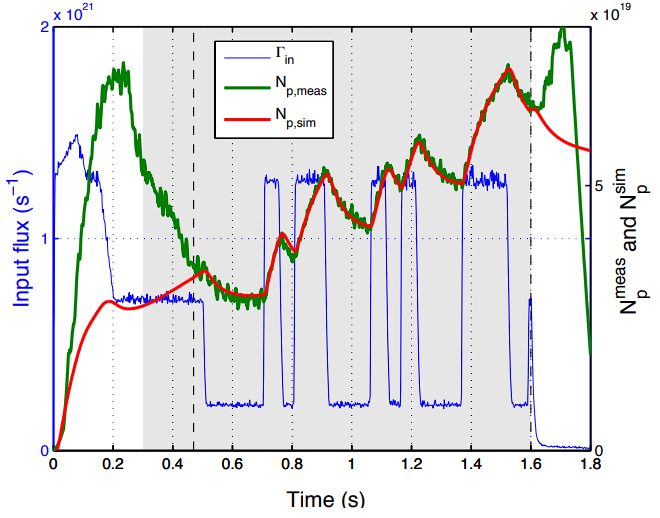
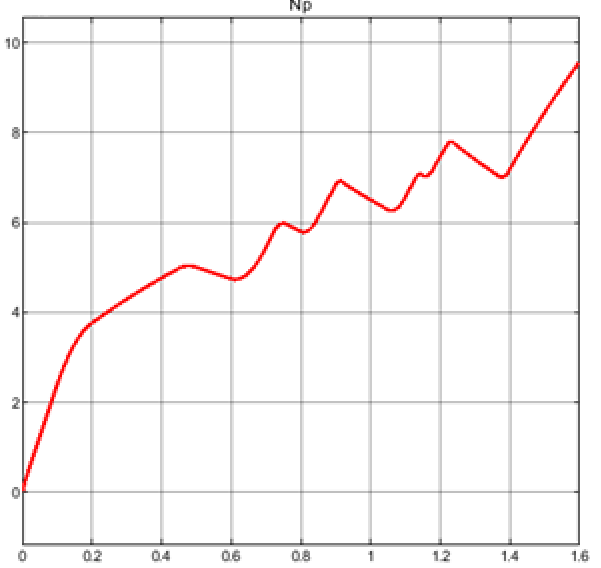


Рисунок — Результат моделирования и график количества частиц в плазме на токамаке TCV

Сравнивая графики, можно установить, что в рабочем диапазоне (≈0,43 — 1,6) значения идентичны, значит разработанная модель работает верно.

## Моделирования клапана PEV-1

Также для управления газонапуском был смоделирован клапан PEV-1 с помощью блока Look-up Table. Данный блок содержит два массива, соответствующие усредненной характеристике клапана, полученных на основе графика, представленного на рисунке 1. Блок характеризует зависимость подаваемого напряжения к см3/мин напускаемого газа. Результат моделирования представлен на рисунке 4.

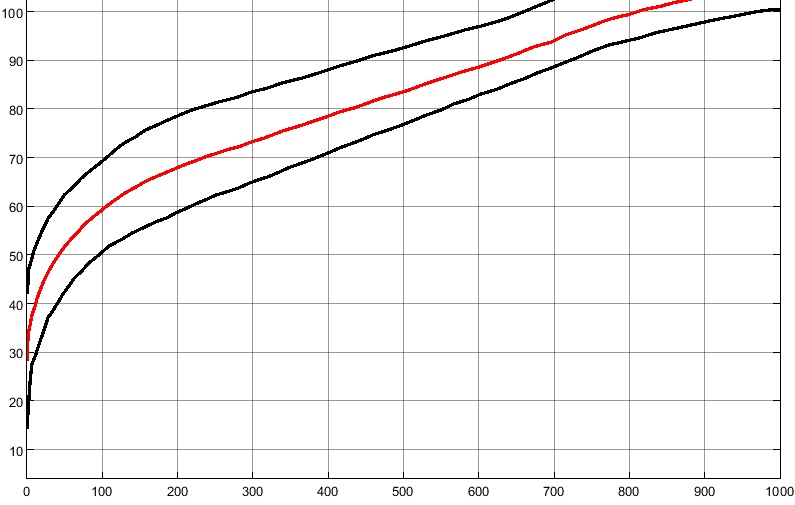


Рисунок — Результаты моделирования блока, имитирующего PEV-1

Как видно из осциллограммы, полученная модель достаточно точно повторяет график работы PEV-1.

Для дальнейшего перевода объема в количество частиц, подаваемое в блок state-space, добавлен блок Gain, работающий по формуле:

где u — объем поступающего газа в см3/мин;

— коэффициент перевода из кгс/см2 в Па;

— коэффициент перевода из см3 в м3.

Na — число Авогадро;

R — универсальная газовая постоянная;

T — температура в камере.

Получившаяся модель газонапуска представлена на рисунке 5.

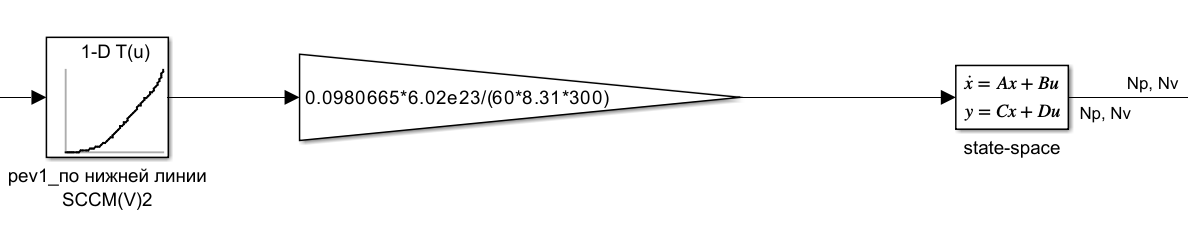


Рисунок — Схема модели газонапуска

## Расчет начальных условий и временных характеристик

### Графический интерфейс пользователя

Для удобства изменения начальных условий и временных характеристик была создан graphical user interface (GUI) с помощью функции uicontrol, интерфейс которого представлен на рисунке 6.

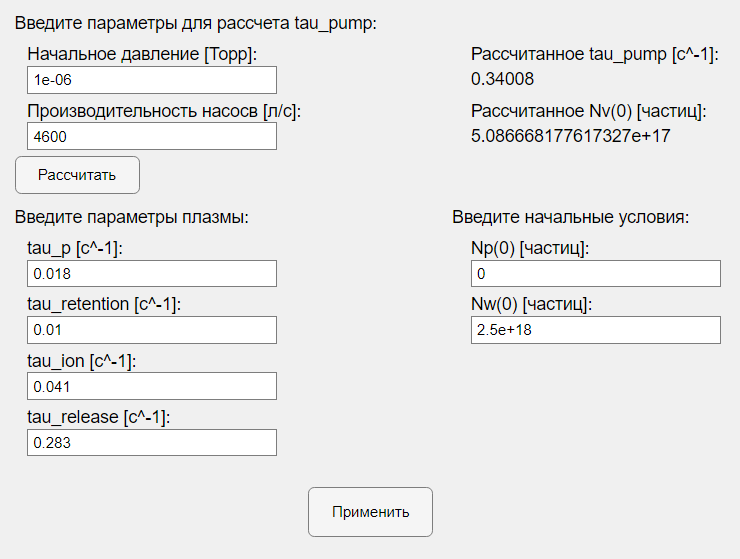


Рисунок — Интерфейс разработанного GUI

Данный интерфейс позволяет изменять постоянные времени, начальные условия, рассчитать . Метод расчета описан в следующем разделе. Листинг кода GUI представлен в приложении А.

Также в GUI при нажатии кнопки «Применить», все введенные числа переносятся в workspace и рассчитываются матрицы для блока state-space.

При попытке закрыть интерфейс, будет выведено окно, предлагающее сохранить введенные значения для использования их при следующем входе.

Общая схема взаимодействия файлов модели представлена на рисунке 7.

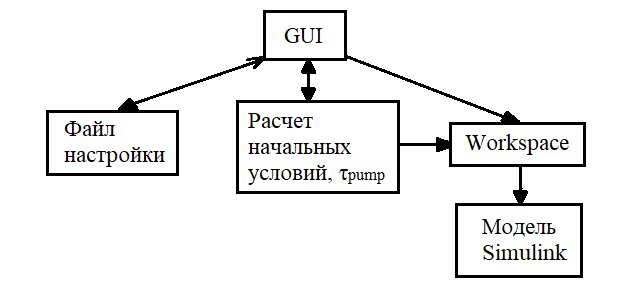


Рисунок 7 — Схема взаимодействия файлов модели

### Расчет временной характеристики откачки

Для вычисления аппроксимируется кривая изменения количества частиц в камере по уравнению:

Кривая получается итерационным методом:

for i = 2:n

Nv\_otcachannoe = P\*F/8.31/T\* 6.022e23\*dt;

Nv(i) = Nv(i-1)-Nv\_otcachannoe;

end

где Nv\_otcachannoe — откачанное количество частиц за малое время dt,

Nv — массив, в который сохраняются вычисленные значения.

Считая, что в малом временном промежутке dt = 0.01 с давление остается постоянным. Рассчитываем откачанное количество частиц:

где n — количество насосов;

F — производительность насосов;

P — давление в камере;

Na — число Авогадро;

R — универсальная газовая постоянная;

T — температура в камере.

Затем соответственно считаем оставшееся число частиц:

Далее пересчитываем давление для следующего момента времени

Полученная кривая аппроксимируется методом lsqcurvefit(). Листинг кода функции tau\_pump(txt\_P0, txt\_F, lbl\_pump, lbl\_Nv) представлен в приложении Б.

Данная функция вызывается при нажатии кнопки «Рассчитать» в GUI, результаты которой выводятся на экран и workspace.

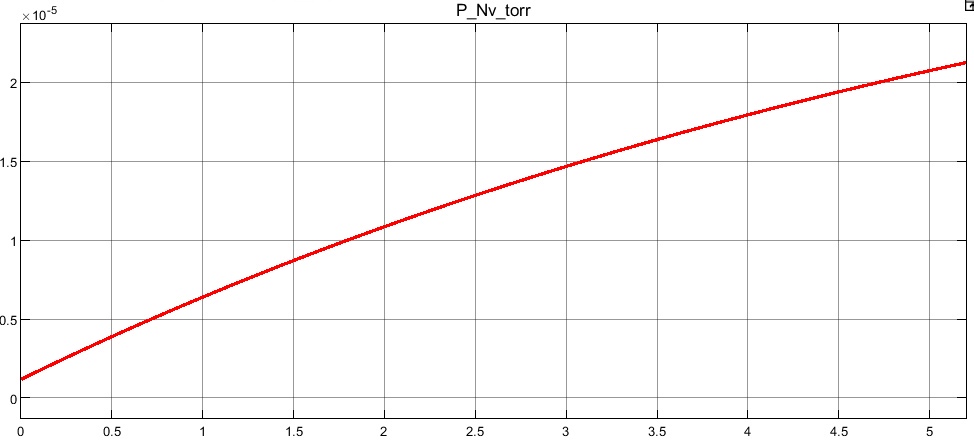
### Расчет количества частиц в камере в начальный момент времени

Количество частиц водорода в вакуумной камере в начальный момент времени было рассчитано в соответствии с уравнением Клапейрона-Менделеева. Пробой в токамаке КТМ происходит при давлении торр, что соответствует Па, объем вакуумной камеры токамака КТМ составляет 13,5 м3. Для расчёта использовалась комнатная температура 300 К.

## Проверка модели

Для проверки модели, был смоделирован напуск газа в камеру, полученные данные сопоставлены с реальными значениями с КТМ. Смоделировано уравнение, отвечающее за напуск газа:

DataSet на КТМ был получен при постоянном напуске газа при подаваемом напряжении на пьезоэлектрический клапан PEV-1 40 В. Полученные результаты при подаваемом на PEV-1 напряжении 37.5 В, мощности насосов 2100 л/с по водороду представлены на рисунке 8.



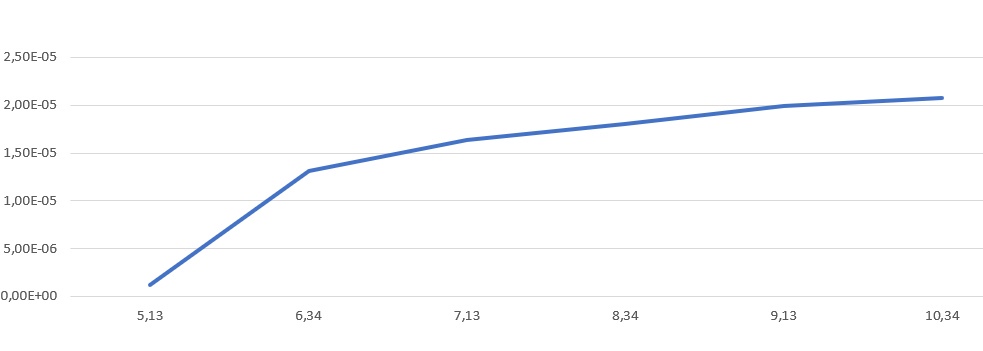


Рисунок — Результаты моделирования напуска газа

При данном напряжении, конечное давление практически совпадает с тем, что получается на КТМ при напуске газа за 5,2 секунд при напряжении 40 В.

# Заключение

В рамках выполнения учебно-исследовательской работы была подготовлена модель технического объекта управления, организован расчет начальных условий и временных характеристик, реализована модель клапана PEV-1 для дальнейшего синтеза и расчета параметров системы автоматического регулирования. Полученная модель проверена на основе данных, полученных с КТМ.

# Список источников

1. Система управления плазмой : учебное пособие / В. М. Павлов [и др.]; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск : Изд-во ТПУ, 2008. — 152 с.: ил. — Библиогр.: с. 127-129. — ISBN 5-98298-337-3.
2. W.A.J. Vijvers, F. Felici, H.B. Le, B.P. Duval, S. Coda Non-linear digital real-time density control in the TCV tokamak //39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics.
3. Шатохин В.Л., Шестак В.П. Вакуумная техника. Лабораторный практикум: Учебно-методическое пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 84 с.
4. Brelén H. E. O. An adaptive plasma density controller at Joint European Torus //Fusion technology. – 1995. – Т. 27. – №. 2. – С. 162-170.
5. Управляемый источник питания натекателей (УИПН-4.01). Руководство по эксплуатации. 36296714. 262040-01 01-401.РЭ;
6. Пьезоэлектрический клапан PEV-1. Руководство по эксплуатации.

# Приложение А

% function gui\_tau\_pump()

clear;

clc;

data = importdata('start\_params.txt');

% Добавление текста, полей для ввода.

fig = uifigure('Name', 'Графический интерфейс');

fig.Position = [100 300 600 450];

fig.CloseRequestFcn = @(src,event)closereq(src, txt\_P0,txt\_F, txt\_tau\_p, txt\_tau\_retention, txt\_tau\_ion, txt\_tau\_release, txt\_Np0, txt\_Nw0, lbl\_Nv0, lbl\_pump);

uilabel(fig, 'Position', [15 420 400 22], 'Text', 'Введите параметры для рассчета tau\_pump:', 'FontSize', 14);

uilabel(fig, 'Position', [25 395 200 22], 'Text', 'Начальное давление [Торр]:', 'FontSize', 14);

txt\_P0 = uieditfield(fig,'Position',[25 375 200 22],'Value', num2str(data(1)));

uilabel(fig, 'Position', [25 350 250 22], 'Text', 'Производительность насосв [л/c]:', 'FontSize', 14);

txt\_F = uieditfield(fig, 'Position',[25 330 200 22], 'Value', num2str(data(2)));

uilabel(fig, 'Position', [380 395 400 22], 'Text', 'Рассчитанное tau\_pump [c^-1]:', 'FontSize', 14);

lbl\_pump = uilabel(fig, 'Position', [380 375 200 22], 'Text', num2str(data(10)), 'FontSize', 14);

uilabel(fig, 'Position', [380 350 400 22], 'Text', 'Рассчитанное Nv(0) [частиц]:', 'FontSize', 14);

lbl\_Nv0 = uilabel(fig, 'Position', [380 330 200 22], 'Text', num2str(data(9)), 'FontSize', 14);

% Кнопка "Рассчитать"

button1 = uibutton(fig, 'Position', [15 295 100 30], 'Text', 'Рассчитать', 'ButtonPushedFcn', @(btn,event)tau\_pump(txt\_P0, txt\_F,lbl\_pump, lbl\_Nv0));

uilabel(fig, 'Position', [365 265 400 22], 'Text', 'Введите начальные условия:', 'FontSize', 14);

uilabel(fig, 'Position', [380 240 400 22], 'Text', 'Np(0) [частиц]:', 'FontSize', 14);

txt\_Np0 = uieditfield(fig, 'Position', [380 220 200 22], 'Value', num2str(data(7)));

uilabel(fig, 'Position', [380 195 400 22], 'Text', 'Nw(0) [частиц]:', 'FontSize', 14);

txt\_Nw0 = uieditfield(fig, 'Position', [380 175 200 22], 'Value', num2str(data(8)));

uilabel(fig, 'Position', [15 265 400 22], 'Text', 'Введите параметры плазмы:', 'FontSize', 14);

uilabel(fig, 'Position', [25 240 200 22], 'Text', 'tau\_p [c^-1]:', 'FontSize', 14);

txt\_tau\_p = uieditfield(fig, 'Position',[25 220 200 22], 'Value', num2str(data(3)));

uilabel(fig, 'Position', [25 195 200 22], 'Text', 'tau\_retention [c^-1]:', 'FontSize', 14);

txt\_tau\_retention = uieditfield(fig, 'Position',[25 175 200 22], 'Value', num2str(data(4)));

uilabel(fig, 'Position', [25 150 200 22], 'Text', 'tau\_ion [c^-1]:', 'FontSize', 14);

txt\_tau\_ion = uieditfield(fig, 'Position',[25 130 200 22], 'Value', num2str(data(5)));

uilabel(fig, 'Position', [25 105 200 22], 'Text', 'tau\_release [c^-1]:', 'FontSize', 14);

txt\_tau\_release = uieditfield(fig, 'Position',[25 85 200 22], 'Value', num2str(data(6)));

% Кнопка "Применить"

fig.CloseRequestFcn = @(src,event)closereq(src, txt\_P0,txt\_F, txt\_tau\_p, txt\_tau\_retention, txt\_tau\_ion, txt\_tau\_release, txt\_Np0, txt\_Nw0, lbl\_Nv0, lbl\_pump);

button2 = uibutton(fig, 'Position', [250 20 100 40], 'Text', 'Применить', 'ButtonPushedFcn',...

@(btn,event)update\_params(txt\_P0, lbl\_Nv0, lbl\_pump, txt\_tau\_p, txt\_tau\_retention, txt\_tau\_ion, txt\_tau\_release, txt\_Nw0, txt\_Np0));

% функция, обрабатывающая кнопку "Применить" (помещение в workspace

% tau, расчет и размещ. матриц A,B,C,D

function update\_params(txt\_P0, lbl\_Nv, lbl\_pump, txt\_tau\_p, txt\_tau\_retention, txt\_tau\_ion, txt\_tau\_release, txt\_Nw0, txt\_Np0)

%помещение в workspace tau, N0...

to\_workspace = str2double(txt\_P0.Value);

assignin("base","P0", to\_workspace)

to\_workspace = str2double(lbl\_Nv.Text);

assignin("base","Nv0", to\_workspace);

to\_workspace = str2double(txt\_Np0.Value);

assignin("base","Np0", to\_workspace);

to\_workspace = str2double(txt\_Nw0.Value);

assignin("base","Nw0", to\_workspace);

t\_pump = str2double(lbl\_pump.Text);

assignin("base","tau\_pump", t\_pump);

t\_p = str2double(txt\_tau\_p.Value);

assignin("base","tau\_p", t\_p);

t\_retention = str2double(txt\_tau\_retention.Value);

assignin("base","tau\_retention", t\_retention);

t\_ion = str2double(txt\_tau\_ion.Value);

assignin("base","tau\_ion", t\_ion);

t\_release = str2double(txt\_tau\_release.Value);

assignin("base","tau\_release", t\_release);

% Расчет матриц

B = [0;0;1];

C = [1,0,0; 0, 0, 1];

D = [0; 0];assignin("base","B", B);

A = [-1\*(1/t\_p+1/t\_retention), 1/t\_release,2/t\_ion; 1/t\_retention, -1/t\_release, 0; 1/(2\*t\_p), 0, -1\*(1/t\_pump+1/t\_ion)];

% размещение в workspace

assignin("base","A", A);assignin("base","B", B);assignin("base","C", C);assignin("base","D", D);

end

% Функция обработки закрытия окна (сохранение значений)

function closereq(fig, txt\_P0,txt\_F, txt\_tau\_p, txt\_tau\_retention, txt\_tau\_ion, txt\_tau\_release, txt\_Np0, txt\_Nw0, lbl\_Nv0, lbl\_pump)

selection = uiconfirm(fig,'Save values?','Confirmation');

switch selection

case 'OK'

to\_file = [str2double(txt\_P0.Value), str2double(txt\_F.Value), str2double(txt\_tau\_p.Value), str2double(txt\_tau\_retention.Value), str2double(txt\_tau\_ion.Value), str2double(txt\_tau\_release.Value), str2double(txt\_Np0.Value), str2double(txt\_Nw0.Value), str2double(lbl\_Nv0.Text), str2double(lbl\_pump.Text)];

fid = fopen('start\_params.txt', 'w');

fprintf(fid, '%f\n', to\_file);

fclose(fid);

delete(fig);

case 'Cancel'

delete(fig);

end

end

% end

# Приложение Б

function tau\_pump(txt\_P0, txt\_F, lbl\_pump, lbl\_Nv)

% Чтение введенного числа из текстового объекта

P0 = str2double(txt\_P0.Value);

% обьем выкачки 3ех насосов F л/c, перевод в м^3/c

F = str2double(txt\_F.Value)/1000;

% создание массивов для построения экспоненты. t2 - конечное время,

% n -кол-во разбиений

t2 = 40; n = 4000;

t = linspace(0,t2,n);

Nv = zeros(1,n);

P\_torr = zeros(1,n);

dt = t2/n;

% рассчет начального значения Nv

V = 13.5; T=300; P = 133.32\*P0; %p торр, переводится в Па

Nv0save = P\*V\*6.022e23/8.31/T;

Nv(1) = Nv0save;

lbl\_Nv.Text = num2str(Nv0save);

assignin("base","Nv0", Nv0save);

P(1) = P/133.32;

% рассчет точек экспоненты

for i = 2:n

Nv\_otcachannoe = P\*F/8.31/T\* 6.022e23\*dt;

Nv(i) = Nv(i-1)-Nv\_otcachannoe;

P = (Nv(i)\*8.31\*T)/(6.022e23\*V);

P\_torr(i) = P/133.32;

end

%----------рассчет tau\_pump--------------------------------------------

initialGuess = [Nv(1) 0];

% Определение функции, которую нужно получить (y=a\*exp(bx)

fitFunc = @(params, xdata) params(1) \* exp(params(2) \* xdata);

% fitting the function

paramsFit = lsqcurvefit(fitFunc, initialGuess, t, Nv);

aFit = paramsFit(1);

bFit = paramsFit(2);

lbl\_pump.Text = num2str(abs(bFit));

assignin("base","tau\_pump", abs(bFit));

end