

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(Научно-исследовательский университет)»  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Автоматика и управление»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_/Л.С. Казаринов  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

Программно-технический комплекс для обработки алгоритмического и  
программного обеспечения системы управления микрогазотурбинной  
установки

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ - 270304.2017.183 ПЗ ВКР

Руководитель работы  
ст.препод.кафедры АиУ  
\_\_\_\_\_/Канашев Е.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор проекта  
студент группы ПЗ-598:  
\_\_\_\_\_/Исламов А.Ф.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер  
\_\_\_\_\_/Абдуллин В.В.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск  
2017

## АННОТАЦИЯ

Исламов А.Ф. Программно-технический комплекс для обработки алгоритмического и программного обеспечения системы управления микрогазотурбинной установки. – Челябинск: ЮУрГУ, ПЗ, 2017, 17 ил., 2 табл., библиогр. список – 52 наим., 3 чертежа формата А3, 1 чертеж формата А4.

В данной работе предоставлено описание установки, находящейся на базе комплекса специальных стендов ОАО СКБ «Турбина»

Изучена модель малогабаритной газотурбинной установки с реализованной системой управления. На базе контроллера S7 – 300 и входящие в комплектацию модули аналогового ввода-вывода, дискретного ввода-вывода разработано программное обеспечение имитационного стенда, проведено исследование газотурбинной установки как объекта управления произведена имитация выходных сигналов микрогазотурбинной установки.

					<b>270304.2017.183 ПЗ ВКР</b>		
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дат</i>			
Разраб.		Исламов			Лит.	Лист	Листов
Пров		Канашев.				3	72
Н.кон		Абдуллин			ЮУрГУ(НИУ) Кафедра АиУ		
Утв.		Казаринов					
Программно-технический комплекс для обработки обеспечения системы							

270304.2017.183 ПЗ ВКР

Изм	Лист	№ докум.	Подпис	Дат			
Разраб.		Исламов			Лит.	Лист	Листов
Пров		Канашев.				3	72
Н.кон		Абдуллин			ЮУрГУ(НИУ) Кафедра АиУ		
Утв.		Казаринов					

Программно-  
технический комплекс  
для обработки  
обеспечения системы

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ЗАДАЧ.....	12
1.1 Описание предмета исследования.....	12
1.2 Описание малогабаритной газотурбинной установки.....	14
1.2.1 Область применения, описание работы.....	14
1.2.2 Технические характеристики.....	17
1.2.3. Имитатор сигналов МГТУ.....	17
1.3 Постановка цели и задач исследования.....	20
2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ.....	22
2.1 Модель компрессора.....	24
2.2 Дополнения к базовой модели компрессора.....	26
2.3 Полная модель газовой турбины.....	27
2.4 Конфигурация модели Гаррета.....	33
2.5 Математическое описание имитационной модели микрогазотурбинной установки.....	37
3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА В СРЕДЕ SIMATIC S7.....	41
3.1 Конфигурирование аппаратуры.....	41
3.2 Язык функциональных блок-схем (FBD).....	45
3.3 Формальные правила языка FBD .....	46
3.4 Реализация конечно-разностных уравнений в среде STEP 7.....	48
3.4.1 Блок компрессора .....	48
3.4.2 Блок пленума.....	50
3.4.3 Блок турбины .....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	55

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

ПРИЛОЖЕНИЕ А листинг программы.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Б схемы и чертежи.....	72

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

## ВВЕДЕНИЕ

АСУТП — это автоматизированная (человеко-машинная) система для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием управления. При этом под технологическим объектом управления понимается совокупность технологического оборудования и реализованного на нём в соответствии с инструкциями и регламентами технологического процесса производства, рассматриваемые как объекты управления. Процесс автоматизации производства зародился вместе с самим производством и в процессе своего развития прошел целый ряд этапов: от управления при помощи простейших технических устройств, до современных АСУ, построенных на базе вычислительной техники (ВТ). Комплексное использование ВТ при автоматизации производства позволяет создавать гибкие автоматизированные производства (ГАП). Создание ГАП — генеральное направление развития и автоматизации производственных процессов. В настоящее время широкое применение при создании АСУТП широко применяются программируемые логические контроллеры фирмы SIMENS, при создании управляющих программ для которых применяется язык программирования STEP7. Базовый пакет STEP 7 предназначен для создания проектов, решающих задачи автоматизации отдельных станков, участков, технологических процессов. Рассматриваемый пакет позволяет проводить разработку как программных, так и аппаратных средств в пределах одного проекта, в результате чего на основе требований к программной и аппаратной частям происходит создание и конфигурирование необходимых средств и сетей, рабочих программ и блоков данных для решения задач автоматизации.

Структура программы В полную программу процесса входят Операционная система: содержит общую часть всех инструкций и соглашений для реализации внутренних функций (например, сохранение данных при сбросе напряжения

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

питания, управление реакцией пользователя при прерывании и т. д.). Она расположена на так называемом EPROMe (Erasable Programmable Read Only Memory) и является фиксированной составной частью процессора. Как пользователь, вы не имеете возможности обращаться к операционной системе. Программа пользователя: содержит набор всех написанных пользователем инструкций и соглашений для обработки сигналов, с помощью которых производится управление установкой (процессом). Программа пользователя распределяется на блоки. Деление программы на блоки значительно проясняет структуру программы и подчеркивает программно-технические связи отдельных частей установки. Блоком называется часть программы пользователя, ограниченная функционально и структурно или по целям использования. Различают блоки, которые содержат:

- инструкции для обработки сигналов;
- блоки, содержащие данные (блоки данных). Блоки идентифицируются:
- типом блока (OB, PB, SB, FB, FX, DB, DX);
- номером блока (число от 0 до 255).

### **Структура системы**

Симатик S-7 — это модульный программируемый контроллер, предназначенный для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности.

Контроллеры симатик имеют модульную конструкцию и включают в себя:

- модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от сложности решаемой задачи, могут быть использованы любые процессоры из 20 типов;
- модули блоков питания (PS), обеспечивающие возможность питания контроллера 120/230 В сети переменного тока или постоянного тока 24/48/60/110 В;
- мигральные модули (SM). Предназначенные для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, с различными электрическими и временными параметрами;

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- коммуникационные процессоры (CP), предназначенные для подключения к сетям профибас, интернет, АС-интерфейс или организации связи по РТР-интерфейсу;

- функциональные модули (FM). Способные самостоятельно решать задачи автоматического регулирования, позиционирования и обработки сигналов;

- итерфейсные модули (IM). Обеспечивающие возможность подключения к стойке с CPU стоек расширения ввода-вывода. Контроллеры симатик с7-300 позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а так же коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам, все модули работают с естественным охлаждением.

В полную программу процесса входят Операционная система: содержит общую часть всех инструкций и соглашений для реализации внутренних функций (например, сохранение данных при сбросе напряжения питания, управление реакцией пользователя при прерывании и т. д.). Она расположена на, так называемом, EPROMe (Erasable Programmable Read Only Memory) и является фиксированной составной частью процессора. Как пользователь, вы не имеете возможности обращаться к операционной системе. Программа пользователя: содержит набор всех написанных пользователем инструкций и соглашений для обработки сигналов, с помощью которых производится управление установкой (процессом). Программа пользователя распределяется на блоки. Деление программы на блоки значительно проясняет структуру программы и подчеркивает программно-технические связи отдельных частей установки. Блоком называется часть программы пользователя, ограниченная функционально и структурно или по целям использования.

### **Инструкции языка STEP**

Инструкция языка STEP является наименьшей самостоятельной единицей программы пользователя. Она является предписанием для работы процессора. Инструкция может быть представлена в виде:

1. список команд (инструкций) — STL. Представляет собой список команд подобно обычному языку Ассемблера;

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8



2. контактный план — LAD. Управляющая программа записывается при помощи изображений элементов релейных контактных схем;
3. функциональный план — FUP. Для отображения программы используются схемы логических элементов.

STL – программа состоит из ряда отдельных выражений (statement). Выражение — это наименьшая самостоятельная единица пользовательской программы. Выражение содержит описание работы для CPU. На рисунке 3.6 показана общая структура STL-выражения. Инструкция языка STEP состоит из операции и операнда. Операнд может быть представлен абсолютно или символически (через список соответствия). С помощью этой программы выполняется комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров [Simatic S7-300](#) и [Simatic S7-400](#) фирмы [Siemens](#). В первую очередь это работы по программированию контроллеров. Программируемый логический контроллер, ПЛК — это микропроцессорное устройство, предназначенное для управления [технологическими процессами](#) в [промышленности](#). Принцип работы ПЛК заключается в обработке по прикладной программе пользователя данных с модулей входов (например, сигналов от подключенных [датчиков](#)) и последующей выдачей управляющих сигналов, посредством модулей выходов и модулей связи, обеспечивающих подключение [исполнительных устройств](#). В основе работы лежит концепция проекта, под которым понимается комплексное решение задачи автоматизации, включая несколько взаимосвязанных контроллеров на базе физических [микроконтроллеров](#), соединяющие их [сети](#) и системы [человеко-машинного интерфейса](#). Работу с проектом в целом обеспечивает главная утилита Step 7 — Simatic Manager. Step 7 позволяет производить конфигурирование программируемых логических контроллеров и сетей (утилиты HWConfig и NetPro). В процессе конфигурирования определяется состав оборудования в целом, разбиение на модули, способы подключения, используемые сети, выбираются настройки для используемых модулей. Система проверяет правильность использования и

										Лист
										9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	270304.2017.183 ПЗ ВКР					

подключения отдельных компонент. Завершается конфигурирование загрузкой выбранной конфигурации в оборудование, что по сути является настройкой оборудования. Утилиты конфигурирования позволяют осуществлять диагностику оборудования, обнаруживать аппаратные ошибки или неправильный монтаж оборудования. Программирование [контроллеров](#) производится редактором программ, обеспечивающим написание программ на трех языках:

- [LAD](#) — язык релейно-контактной логики;
- [FBD](#) — язык функциональных блочных диаграмм;
- [STL](#) — язык списка инструкций.

В дополнение к трем основным языкам могут быть добавлены четыре дополнительных языка, поставляемых отдельно:

- [SCL](#) — структурированный язык управления, по синтаксису близкий к [Pascal](#);
- GRAPH 7 — язык управления последовательными технологическими процессами;
- HiGraph 7 — язык управления на основе графа состояний системы;
- [SFC](#) — язык диаграмм состояния.

Возможность наблюдения за текущим состоянием программы, доступная при использовании любого языка программирования, обеспечивает не только отладку программного обеспечения, но и поиск неисправностей в подключаемом оборудовании, даже если она не имеет средств диагностики.

#### **Функциональные возможности.**

1. удобная для обслуживания конструкция с естественным охлаждением;
2. свободное наращивание возможностей и наращивание системы;
3. встроенный переключатель режимов работы;
4. встроенный MPI- интерфейс со скоростью передачи данных 187,5 Кбит/с.

Может быть, использован для построения простейшей сети, с подключением до 16 центральных процессоров с передачей глобальных данных;

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

5. используется загружаемая память в виде микрокарты;
6. необслуживаемое сохранение резервной копии данных: при перебоих питания в микро карту памяти записываются все состояния флагов, таймеров, счетчиков, датчиков;
7. парольная защита: обеспечивает защиту программы от несанкционированного доступа, попыток копирования и модификации программы;
8. диагностический буфер: сохраняются последние 100 сообщений об отказах и прерывании;
9. часы реального времени;
10. встроенные коммуникационные функции : PG/OP функции связи;
11. дополнительный встроенный интерфейс ведущего/ведомого устройства профибас DP со скоростью обмена данных до 12 Мбит/с;
12. возможность использовать распределенных структур ввода-вывода.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

# 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ЗАДАЧ

## 1.1 Описание предмета исследования

Основные виды математических моделей, применяемых при моделировании МГТУ

В моделировании процессов, протекающих в газотурбинных силовых установках, можно выделить следующие этапы:

1. Моделирование на основе нелинейных рабочих характеристик отдельных элементов и узлов, входящих в состав газотурбинной силовой установки.

При этом применяются стационарные (статические) математические модели в виде систем нелинейных алгебраических уравнений, построенные на основе аналитических соотношений, полученных на основе физических законов (аэродинамика и термодинамика) и экспериментальных зависимостей (частично определенных в виде эмпирических формул, графиков и таблиц, а также с применением различного вида аппроксимаций).

Целью нелинейного статического моделирования является исследование характеристик двигателя при его создании. Модели могут включать в себя различные характеристики, например, высотно-скоростные, топливные и т.д. А так же могут состоять из более, чем сотни алгебраических и трансцендентных уравнений. С помощью таких моделей обычно рассчитываются стационарные рабочие режимы, где задействованы итерационные численные методы.

2. Моделирование динамических характеристик газотурбинных силовых установок.

Следует отметить, что при построении математические модели в этом случае представляют собой системы нелинейных обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений. Они описывают баланс между характеристиками элементов газотурбинной силовой установки в виде уравнений массового расхода, сохранения энергии, изменения вращательного момента. В алгебраической форме они определяют статическую часть модели, а в виде дифференциальных уравнений — динамическую модель. Число определяющих

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

параметров в таких моделях зависит от схемы силовой установки и степени ее детализации. Следует отметить, что при построении такого рода динамических моделей используются и модели (в большинстве случаев аппроксимационные) нелинейных статических рабочих характеристик элементов и узлов силовых установок. При построении детальных нелинейных динамических моделей газотурбинных силовых установок необходимо осуществить анализ нестационарных (переходных) процессов, в том числе в нештатных режимах функционирования. Хотя такие модели могут быть использованы для анализа работы систем управления, однако для этого требуется большое количество расчетов, что делает такой подход малопродуктивным. Обычно для этих целей применяются упрощенные математические модели (описанные ниже). Однако с ростом вычислительной мощности современных компьютеров непосредственное использование сложных нелинейных динамических моделей применительно к задачам управления становится все более реальным.

3. Моделирование динамических процессов в газотурбинных силовых установках на основе линейных (линеаризованных в окрестности рабочей точки) математических моделей.

Для управляемых систем в пространстве состояний линейные модели с постоянными коэффициентами имеют вид

$$\frac{d}{dt} \Delta x = A \Delta x + B \Delta u$$

$$y = C \Delta x + D \Delta u, \quad (1)$$

где  $\Delta x$  - вектор отклонений от стационарного состояния (возмущений) переменных состояния системы;

$\Delta u$  - вектор отклонений управления,  $y$  - вектор наблюдений, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  - матрицы соответствующей размерности.

4. Моделирование динамики газотурбинных силовых установок на основе кусочно-линейных моделей для разработки систем реального времени (в этом случае форма моделей такая же, как и в п. 3). В этом исследовании мы

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

ориентируемся, прежде всего, на построение и идентификацию нелинейных динамических моделей, которые представляются в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), хотя рассмотренные ниже вопросы, связанные с идентификацией параметров моделей, в равной степени относятся и к другим случаям.

## 1.2 Описание малогабаритной газотурбинной установки

### 1.2.1 Область применения, описание работы

Микротурбины являются новейшим типом газовых турбин, которые используются для прикладных задач генерации энергии в стационарной энергетике. Существуют определенные конструктивные особенности, которые отличают микротурбины от других типов газовых турбин, рассмотренных выше. Однако не существует границы в размере, которая отделяет микротурбины от промышленных турбин малого размера. В действительности, промышленные турбины малого размера неизбежно имеют некоторые общие свойства с микротурбинами. Поэтому, промышленные турбины малого размера будут иметь пользу от успехов, достигнутых в развитие конструктивных свойств микротурбин. Микротурбины, в основном, характеризуются следующими конструктивными особенностями:

- радиальные компрессоры;
- низкие степени повышения давления, обусловленные одной или, возможно, двумя ступенями компрессора;
- минимальное использование охлаждения направляющего аппарата или ротора;
- рекуперация сбросного тепла для предварительного подогрева воздуха;
- использование материалов, которые позволяют снизить стоимость производства;
- очень высокие скорости вращения основного вала (25 000 об./мин или более). С такими конструктивными элементами, КПД простого цикла (без использования рекуператора) будет существенно меньше, по сравнению с КПД конкурирующих установок, таких как поршневые двигатели, особенно для

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

высоконагруженных прикладных задач с требованиями наличия базовой и промежуточных нагрузок. Однако микротурбины без рекуператора могут быть использованы для таких задач, как обеспечение аварийной электроэнергии, для которых длительность эксплуатации относительно мала и стоимость топлива вторична, для которых существенны другие факторы, такие как легкость монтажа и технического обслуживания. Для многих прикладных задач очень высокие скорости вращения требуют наличия редуктора. Для случая генерации электрического тока, обычно, используется другое, альтернативное, решение: прямо приводной (без редуктора) синхронный генератор переменного тока, связанный с преобразователем переменного электрического тока в постоянный и сетевым преобразователем частоты. Микротурбины производились очень малыми размерами (всего несколько киловатт), а коммерчески жизнеспособные изделия находятся в ряду от десятков до сотен киловатт. Этот ряд имеет объем заказов от двух до трех (в год), а КПД, которые могут быть достигнуты на практике, будут у них существенно различаться. Малогабаритная газотурбинная установка предназначена для дополнения системы теплоснабжения здания и генерации электроэнергии с/без внешней жесткой сети. Общий вид установки приведен на рисунке 1.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15



Рисунок 1.1 – Общий вид малогабаритной газотурбинной установки

Воздух из атмосферы через систему фильтров входного устройства (6) поступает в центробежный компрессор (2), где сжимается до необходимого давления, затем подается в теплообменник (рекуператор) (7). В теплообменнике происходит подогрев воздуха, после чего он поступает в камеру сгорания (КС) (7), в которой происходит процесс горения углеводородного топлива, также подаваемого в КС. Продукты сгорания в смеси с воздухом, имеющие высокую температуру, уходят в радиально- осевую турбину (3), в которой вырабатывается полезная мощность. Выходящие газы после турбины отдают теплоту воздуху в теплообменнике и отводятся в выходное устройство. При необходимости выработки низкопотенциальной тепловой энергии за теплообменником может быть установлен теплофикационный котёл (8). Полезная механическая работа от турбины передаётся высокооборотному электрогенератору (1), в котором преобразуется в электрическую энергию. Преобразователь (4) позволяет передавать потребителю электроэнергию необходимого напряжения и частоты. Тепловая структурная схема микрогазотурбинной установки приведена в приложении Б.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



### 1.2.2 Технические характеристики

Разрабатываемая МГТУ должна обеспечивать следующие выходные электрические параметры при нормальных атмосферных условиях  $T = 288 \text{ K}$  ( $150 \text{ C}$ ),  $P=101,3 \text{ кПа}$  (760 мм. рт. ст.):

- номинальная выходная электрическая мощность для Т-100 – не менее 100 кВт;
- номинальное напряжение 220/380 В  $\pm 10\%$ ;
- номинальная частота 50 Гц  $\pm 5\%$ ;
- Допускается перегрузка установок по мощности 10% (не более) в течение 1 часа при нормальных атмосферных условиях;
- максимальная и номинальная мощность уточняются в процессе испытаний;
- тепловая мощность установок должна составлять для Т-100 — не менее 20 кВт;
- температура отходящих газов универсального газогенератора установок не менее 250 C;
- коэффициент полезного действия по электричеству не менее 20%;
- уровень выброса парниковых газов не более 10 ppm.

### 1.2.3 Имитатор сигналов МГТУ

Разрабатываемый продукт «Имитатор микрогазотурбинной установки МГТУ-100» («ИМГТУ-100») является составной частью проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения». Проект предусматривает создание системы, предназначенной для отладки контроллера системы управления ГТУ. Программируемый логический контроллер SIMATIC S7-300 — предназначен для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности. Модульная конструкция контроллера S7-300, работа с естественным охлаждением, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, высокое удобство эксплуатации и

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

обслуживания обеспечивают возможность получения оптимальных решений для построения систем автоматического управления технологическими процессами в различных областях промышленного производства.

Использование нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров повышает эффективность применения контроллеров SIMATIC S7-300.

Программируемые контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 имеют модульную конструкцию и состоят из таких элементов:

Центральные процессоры — Модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от сложности задачи в контроллерах могут быть использованы различные типы центральных процессоров, которые отличаются производительностью, размером памяти, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций, количеством и типом встроенных коммуникационных интерфейсов и т.д.

Блоки питания — Блоки питания (PS) обеспечивают питание контроллера от сети переменного тока напряжением 120/230 В или от источника постоянного тока напряжением 24/48/60/110 В.

Сигнальные модули SM — Сигнальные модули (SM) предназначены для ввода и вывода дискретных или аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами.

Коммуникационные модули — Коммуникационные процессоры (CP) обеспечивают возможность подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface или организации связи по PtP (point to point) интерфейсу.

Функциональные модули — Функциональные модули (FM), могут самостоятельно решать задачи автоматического регулирования, позиционирования, обработки сигналов. Функциональные модули снабжены встроенным микропроцессором и выполняют возложенные на них функции

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

даже в случае отказа центрального процессора программируемого логического контроллера.

Интерфейсные модули – Интерфейсные модули (ИМ), обеспечивают возможность подключения к базовому блоку (стойка с CPU) стоек расширения ввода-вывода. Программируемые контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а также коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам. Все модули работают с естественным охлаждением.

Области применения:

- системы управления машин специального назначения;
- системы управления текстильных машин;
- системы управления упаковочных машин;
- системы управления машиностроительного оборудования;
- системы управления оборудования для производства технических средств управления и электротехнической аппаратуры.

Построение систем автоматического регулирования и позиционирования.

Центральные процессоры Siemens S7-300 оснащены набором встроенных входов и выходов, а также набором встроенных функций, что позволяет применять эти процессоры в качестве готовых блоков управления. В комплектацию входит:

1. модуль питания PS 307 5A;
2. контроллер S7–300 CPU 317-2 DP;
3. модуль аналогового ввода A1 8\*13 Bit;
4. модуль аналогового вывода A0 2\*12 Bit;
5. модуль дискретного ввода D1 16\*DC24v;
6. модуль дискретного вывода D0 16\*DC24v/0.5A.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19



Рисунок 1.1 – Имитатор сигналов МГТУ

Имитационная установка предназначена для:

- демонстрации работы микротурбины и стартер-генератора на модели;
- демонстрации различных режимов работы стартер-генератора на модели;
- отработки алгоритмов управления стартер-генератора и микротурбины.

Цели и назначения:

Имитатор сигналов МГТУ предназначен для отладки аппаратного, программного и алгоритмического обеспечения контроллера, путём обеспечения взаимодействия контроллера и математической модели МГТУ следующим образом:

- имитатор МГТУ должен воспринимать управляющие воздействия, поступающие от испытуемого контроллера;
- имитатор МГТУ должен обеспечивать работу математической модели МГТУ, обработку и синтез сигналов в режиме реального времени;
- имитатор МГТУ должен синтезировать сигналы, соответствующие тем, что поступают от различных датчиков, установленных на МГТУ.

### 1.3 Постановка цели и задач исследования

Целью данной работы является отработка алгоритмов управления газотурбинным двигателем, и сравнение результатов исследования.

Для решения поставленной цели в работе ставятся следующие задачи:

- 1) разработка программного обеспечения имитационного стенда;
- 2) исследование газотурбинной установки как объекта управления;
- 3) имитация выходных сигналов микрогазотурбинной установки;

4) создание и реализация в среде моделирования математических моделей всех элементов системы.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

## 2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ

### 2.1 Модель компрессора

Компрессор применяется для того, чтобы заметно повысить максимальную мощность двигателя, так как с его использованием в камеру сгорания нагнетается больше воздуха. Рисунок 1 изображает структуру базовой модели компрессора, в ней использовались следующие определения:

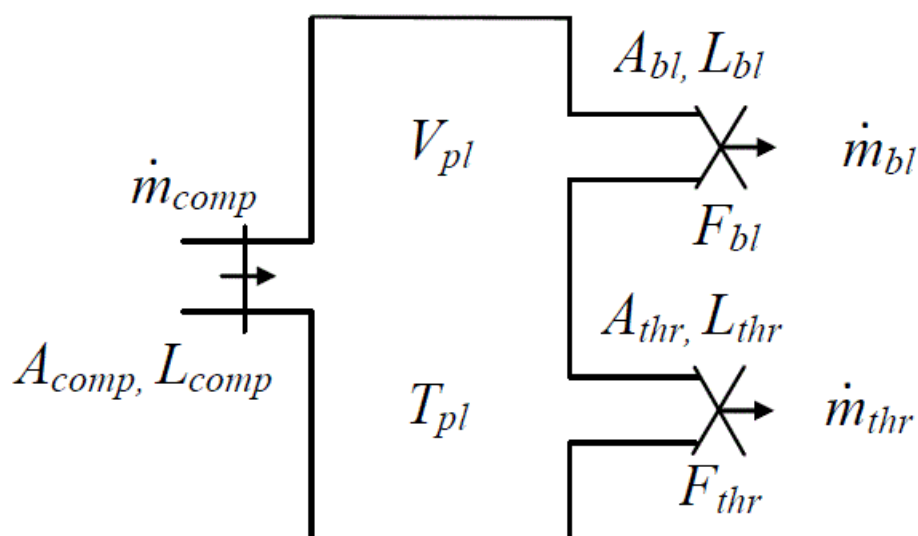


Рисунок 2.1 – Структура базовой модели компрессора

Эта система может быть описана следующими уравнениями:

$$C_{ss} = C_{ss}(m_{comp}) \quad (2.1)$$

$$\frac{dm_{comp}}{dt} = \frac{A_{comp}}{L_{comp}} * (C_{ss} - P_{pl} + P_{in}) \quad (2.2)$$

$$\frac{dm_{thr}}{dt} = \frac{A_{thr}}{L_{thr}} * (P_{pl} - P_{out} - F_{thr}) \quad (2.3)$$

$$F_{thr} = \frac{m_{thr}^2}{2\rho A_{thr}^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{dm_{bl}}{dt} = \frac{A_{bl}}{L_{bl}} (P_{pl} - P_{out} - F_{bl}) \quad (2.5)$$

$$F_{bl} = \frac{m_{bl}^2}{2\rho A_{bl}^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{dP_{pl}}{dt} = \frac{\gamma RT}{V_{pl}} * (m_{comp} - m_{thr} - m_{bl}) \quad (2.7)$$

$$\gamma RT_{pl} = a^2, \quad (2.8)$$

где  $a$  – скорость звука

$$\frac{T_{pl}}{T_{in}} = \left(\frac{P_{pl}}{P_{in}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma \eta_{comp}}} \quad (2.9)$$

$$P_{in} = P_{out}, \quad (2.10)$$

где

$$C_{ss} = C_0 + H \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{m_{comp}}{w} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{m_{comp}}{w} - 1 \right)^3 \right]. \quad (2.11)$$

Для многих случаев может быть избавиться от размерности в этих уравнениях. Реализуем путем умножения:

весовой расход

$$\times \frac{1}{\rho U A}$$

разница давлений

$$\times \frac{1}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

время

$$\times \omega_H,$$

где

$$\omega_H = \alpha \sqrt{\frac{A_{comp}}{V_{pl}L_{comp}}} \quad (2.12)$$

$\omega_H$  — это резонансная частота Гельмгольца и  $U$  верхушка частоты вращения.

Это выражение дает следующие уравнения:

$$\frac{dm_{comp}}{dt} = (C_{ss} - \Delta P_{pl}) * B \quad (2.13)$$

$$\frac{dm_{comp}}{dt} = \left( \Delta P - \left( \frac{m_{thr}}{g_{thr}} \right)^2 \right) \frac{B}{G_{thr}} * g_{thr} \quad (2.14)$$

$$G_{thr} = \frac{L_{thr}}{L_{comp}} \quad (2.15)$$

$$G_{thr} = \frac{A_{thr}}{A_{comp}} \quad (2.16)$$

$$\frac{dm_{bl}}{dt} = \left( \Delta P - \left( \frac{m_{bl}}{g_{bl}} \right)^2 \right) \frac{B}{G_b} l * g_{bl} \quad (2.17)$$

$$G_{bl} = \frac{L_{bl}}{L_{comp}} \quad (2.18)$$

$$g_{bl} = \frac{A_{bl}}{A_{comp}} \quad (2.19)$$

$$\frac{d\Delta P}{dt} = (m_{comp} - m_{thr} - m_{bl}) * \frac{1}{B} \quad (2.20)$$

$$\Delta P = \frac{P_{pl} - P_{out}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2.21)$$

$$B = \frac{U}{2\omega_H L_{comp}} = \frac{U}{2a} \sqrt{\frac{V_{pl}}{A_{comp} L_{comp}}} \quad (2.22)$$

Безразмерные параметры  $B$  и  $q/G$  влияют на динамические характеристики компрессора. Первый из них на сегодняшний день является наиболее важным

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



параметром, определяющим динамику системы. Чем больше  $V$ , тем больше вероятность, что компрессор введет всплеск, раз помпажная линия пройдена. Это соответствует запуску компрессора с относительно высокой скоростью или с большим объемом или некоторой комбинации того и другого. Второй параметр имеет только незначительное влияние на работу компрессора и поэтому, как правило, поддерживается на постоянном уровне в «параметрическом анализе» серии экспериментов.  $q_{thr}$  и  $q_{bl}$  эффективны в качестве масштаба для положения клапанов.

Рисунок 2.2 показывает реакцию этой простой безразмерной модели к изменениям в  $q_{thr}$ , которое является в основном таким же, как ответ на изменения в  $q_{bl}$ , за исключением того, что массовый расход из компрессора делится по-разному через обдуг и дросселирующий кран.

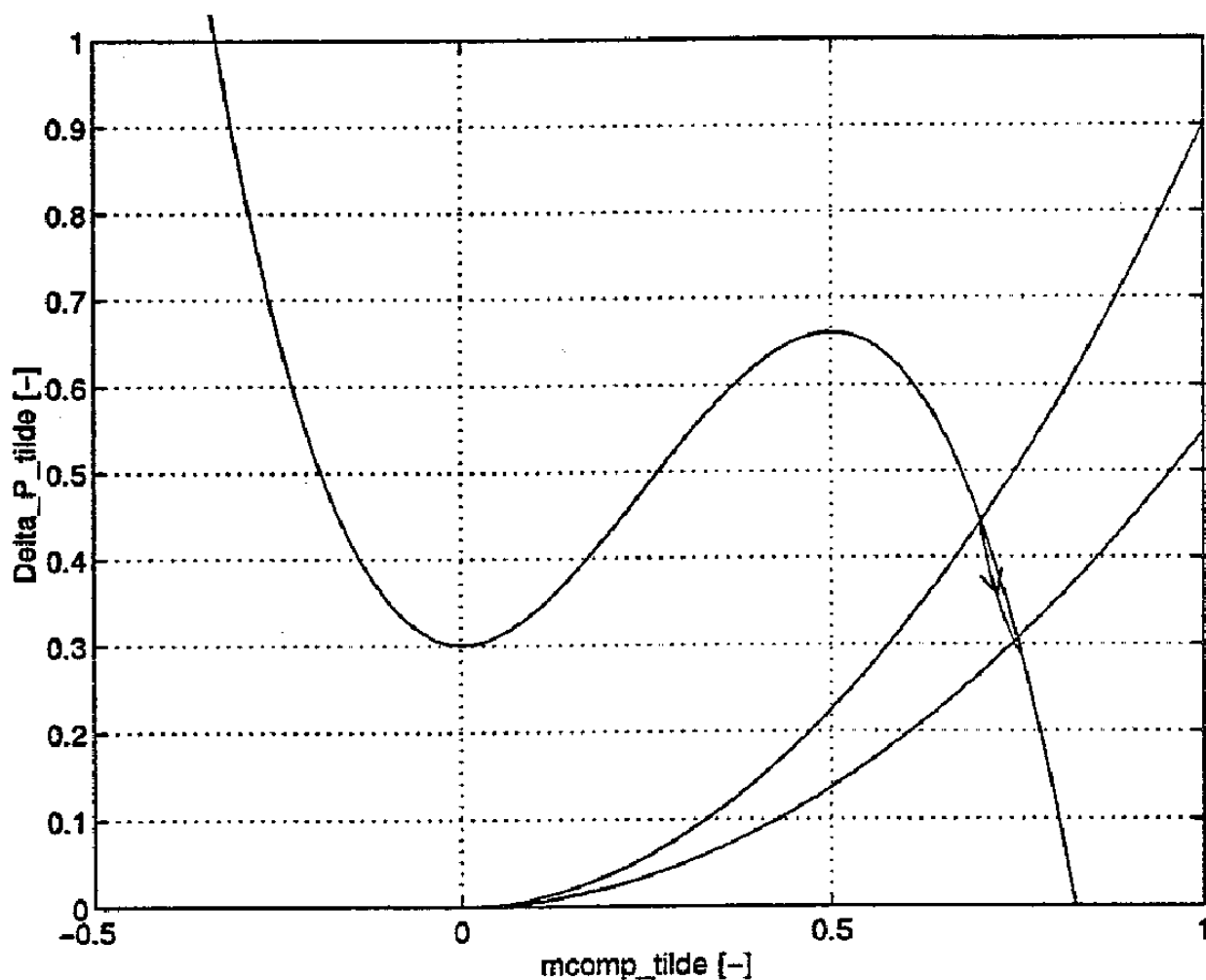


Рисунок 2.2 – Отклик безразмерной модели к увеличению  $M_{thr}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 2.2 Дополнения к базовой модели компрессора

Прежде чем перейти к моделированию полной установки газовой турбины, должны быть указаны некоторые расширения модели компрессора, к настоящему времени полученные в наиболее простой форме. В этом случае, первый порядок переходной характеристики принят для того чтобы смоделировать временную задержку на ответ компрессора.

В безразмерном виде это можно записать в виде:

$$\tau \frac{dC}{dt} = (C_{ss} - C), \quad (2.23)$$

где  $\tau = \frac{\pi RN}{L_{comp} V}$

Следует отметить, что для данного компрессора ( $R$ ,  $N$  и  $L_{comp}$  являются константами), пропорционально  $1/V$ .

Кроме того, модель может быть дополнена дифференциальными уравнениями для скорости вращения  $N$  и температуры в области повышенного давления  $T_{pl}$ . Особенно первое дополнение является очень полезным, поскольку наша цель заключается в моделировании газовой турбины, которая едва ли характеризуется постоянной скоростью вращения. Только работа с постоянной скоростью может привести к такому поведению. В том числе скорость вращения дает следующие уравнения

$$IN \frac{dN}{dt} = P_{in} - W_P \quad (2.24)$$

при

$$W_P = m_{comp} C_P (T_{pl} - T_{in}) = m_{comp} C_P T_{in} \left[ \left( \frac{P_{pl}}{P_{out}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma n_{comp}}} - 1 \right], \quad (2.25)$$

где  $I$  – это инерция;

$P_{in}$  мощность на входе;

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$W_p$  – мощность требуемая для компрессора.

Введение динамических температур улучшает реалистичность, но с этим можно поспорить, так как этот вид низкочастотной динамики также может быть проигнорирован, как и не учтенные медленно изменяющиеся внешние условия. В полной форме соответствующие дифференциальные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{dP_{pl}}{dt} = \frac{\gamma R}{P_{pl}} [m_{comp} T_{ss} - (m_{thr} + m_{bl}) T_{pl}] \quad (2.26)$$

$$\frac{dT_{pl}}{dt} = \frac{RT_{pl}}{P_{pl}V_{pl}} \left[ m_{comp} (T_{ss} - T_{pl}) + \frac{V_{pl}}{C_p} \frac{dP_{pl}}{dt} \right], \quad (2.27)$$

где  $T_{ss} = T_{in} \left( \frac{P_{ss}}{P_{in}} \right)^{\frac{1}{3.5\eta_{comp}}}$ ,

в котором  $P_{ss}$  – это установившееся (абсолютное) давление компрессора ( $P_{ss} = C_{ss} + p_{in}$ ).

Наконец, можно выбрать замену дифференциальных уравнений для массовых потоков статическими отношениями, просто потому, что динамика участвующая здесь, как правило, настолько быстра, что массовые потоки изменяются мгновенно с другими переменными системы. Поступая таким образом, можно сократить время вычисления для модели.

### 2.3 Полная модель газовой турбины

Для получения модели, которая сочетает в себе компрессор, пленум, камеру сгорания и турбину, в первую очередь необходимо сказать о двух последних компонентах некоторые вещи.

Камера сгорания может быть смоделирована по-разному. Мы представим три метода, основанные на следующей схеме:

1. нет области повышенного давления для камеры сгорания: в этом случае температура в камере сгорания  $T_{ss}$ , должна быть определена статически;
2. область повышенного давления представляет собой камеру сгорания;

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

(а)  $T_{cc}$  как и ранее, может быть определена статически;

(б)  $T_{cc}$  также может быть определена динамически.

Другие варианты можно себе представить, в зависимости от того, как много деталей требуется для описания.

Например, температура может быть получена физическим путем, но так же хорошо получается, через функцию «черного ящика» в SV положении топливного клапана.

Дополнение 1: самый простой способ состоит в представлении как камеры сгорания. При возрастании температуры, которая находится где-то между буферным баком и турбиной, давление на входе турбины ( $p_{tbin}$ ) связано с давлением в буферной емкости (или область повышенного давления:  $P_{pl}$ ) через статическое уравнение. Эта работа примет следующий вид:

$$T_{cc} = \frac{C_{pcomp}}{C_{pT}} T_{pl} + \frac{Power}{m_{thr} C_{pT}} \quad (2.28)$$

$$T_{tbin} = T_{cc} \quad (2.29)$$

$$p_{tbin} = p_{pl} - \Delta p, \quad (2.30)$$

где  $C_{pT}$  - обозначает удельную теплоемкость, соответствующую (подогретому) воздуху/топливной смеси ( $T$  показывает температуру) и

$\Delta p$  - падение давления, возникшего в основном по вине трубопроводов и дроссельной заслонки.

$T_{tbin}$  и  $T_{pl}$  являются температура на входе в турбину и буферной емкости. 'Power' служит в качестве входа, используемого для получения определенного желаемого значения  $T_{cc}$ . При желании мощность может быть функцией от положения топливного клапана SV.

Рост температуры можно получить более детально, путем определения расхода топлива в камеру сгорания от позиции топливного клапана и отношения давлений на этом клапане. Затем температура вычисляется с использованием удельных теплоемкостей и энергии сгорания. Данный метод

предполагает – что давление и температура природного газа, будут фиксированными, это дает следующие уравнения:

$$T_{cc} = \frac{3.85 \cdot 10^7 m_{fuel} + 313 m_{fuel} c_{pfuel} + m_{fuel} c_{pcomp} T_{pl}}{c_{pT}(m_{fuel} + m_{thr})}, \quad (2.31)$$

где

$$m_{fuel} = \begin{cases} \frac{K_{vfuel}}{14.0} 3.0 \sqrt{\frac{0.833}{313}}, & \text{if } p_{ccbar} < 1.59 \\ \frac{K_{vfuel}}{7.0} \sqrt{\frac{0.833 p_{ccbar} (3.0 - p_{ccbar})}{313}}, & \text{if } p_{ccbar} \geq 1.59 \end{cases}, \quad (2.32)$$

где  $p_{ccbar} = \frac{p_{tbin}}{10^5}$  - это  $p_{tbin}$  в [бар];

$m_{fuel}$  - расход топлива;

$c_{pfuel}$  - теплоемкость для «топлива» (как правило, природный газ);

$K_{vfuel}$  - (текущее, без фиксации) объем через топливный клапан [м<sup>3</sup>/час].

Коэффициент  $3.85 \cdot 10^7$  это теплота сгорания природного газа.

Дополнение 2а: Если целесообразно отделить  $p_{tbin}$  от  $p_{pl}$ , то требуется дополнительно область повышенного давления в камеру сгорания. С этой дополнительной областью, представляющей камеру сгорания, полученные уравнения (для камеры сгорания) будет выглядеть примерно так:

$$\frac{d_{tbin}}{dt} = \frac{\gamma^R}{V_{cc}} [m_{thr} T_{cc} - m_{tb} T_{tbin}] \quad (2.33)$$

$$\frac{dT_{tbin}}{dt} = \frac{RT_{tbin}}{p_{tbin} V_{cc}} \left[ m_{thr} (T_{cc} - T_{tbin}) + \frac{V_{cc}}{c_{pmix}} \frac{dp_{tbin}}{dt} \right], \quad (2.34)$$

где  $V_{cc}$  (камера сгорания) объем области повышенного давления,  $m_{thr}$  массовый расход через дроссельный клапан и  $m_{tb}$  массовый расход турбины.

Дополнение 2б: В нашей окончательной модели, камера сгорания представлена, не ее температурой, но силой для дифференциальных уравнений  $p_{tbin}$  и  $T_{tbin}$ , что соответствует мощности фактически подаваемой в область

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

повышенного давления камеры сгорания, где-то между буфером бака и камеры сгорания (в виде повышения температуры). Эта мощность может быть определена либо «физическим» способом, или, наоборот, просто как встроенный («черный ящик») в зависимости от положения топливного клапана SV. Последний вариант будет использоваться в нашей модели.

Для моделирования турбины, мы используем ее характеристику. Как уже говорилось ранее, мы можем определить массовый расход динамически или статически, т.е.

$$\frac{dm_{tb}}{dt} = \frac{A_{thr}}{L_{thr}} [p_{tbin} - p_{sstb}] \quad (2.35)$$

или

$$m_{tb} = f_{turbine}(p_{tbin}, p_{tbout}, T_{tbin}),$$

где  $P_{sstb}$  - установившимся режим давления на входе в турбину, необходимого для определенного массового расхода, и  $f_{turbine}$  обратную  $P_{sstb}$ .

Теперь мы сформулируем полную модель установки газовой турбины, где мы решили использовать статические уравнения для всех массовых потоков. Кроме того, добавляется еще одна область повышенного давления, на этот раз между компрессором и буфером бака, чтобы отразить тот факт, что в действительности выпуск расположен рядом с компрессором, а не в буферной емкости. Так же, это позволяет смоделировать общее падение давления отдельно от дроссельного перепада давления на клапане. Эта установка изображена на рисунке 2.4.

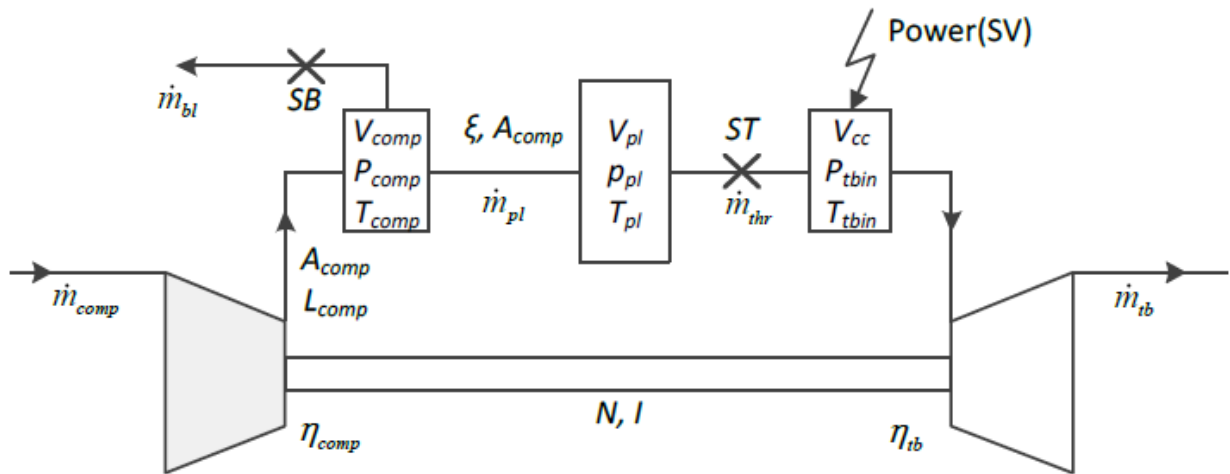


Рисунок 2.3 – Окончательный вариант модели газовой турбины

$$\frac{dp_{comp}}{dt} = \frac{\gamma R}{V_{comp}} \left[ \dot{m}_{comp} T_{cpout} (\dot{m}_{pl} - \dot{m}_{bl}) T_{comp} \right] \quad (2.36)$$

$$\frac{dT_{comp}}{dt} = \frac{RT_{comp}}{p_{comp} V_{com}} \left[ \gamma (\dot{m}_{comp} T_{cpout} (\dot{m}_{pl} - \dot{m}_{bl}) T_{comp}) - T_{comp} (\dot{m}_{comp} - (\dot{m}_{pl} - \dot{m}_{bl})) \right] \quad (2.37)$$

$$\frac{dp_{pl}}{dt} = \frac{\gamma R}{V_{pl}} \left[ \dot{m}_{pl} T_{plin} - \dot{m}_{thr} T_{pl} \right] \quad (2.38)$$

$$\frac{dT_{pl}}{dt} = \frac{RT_{pl}}{p_{pl} V_{pl}} \left[ \gamma (\dot{m}_{pl} T_{plin} - \dot{m}_{thr} T_{pl}) - T_{pl} (\dot{m}_{pl} - \dot{m}_{thr}) \right] \quad (2.39)$$

$$\frac{dp_{tbin}}{dt} = \frac{\gamma_T R_T}{V_{cc}} \left[ \dot{m}_{thr} T_{ccin} \frac{C_{pcomp}}{C_{pT}} - \dot{m}_{tb} T_{tbin} + \frac{Power(SV)}{C_{pT}} \right] \quad (2.40)$$

$$\frac{dT_{tbin}}{dt} = \frac{R_T T_{tbin}}{p_{tbin} V_{cc}} \left[ \gamma_T \left( \dot{m}_{thr} T_{ccin} \frac{C_{pcomp}}{C_{pT}} - \dot{m}_{tb} T_{tbin} + \frac{Power(SV)}{C_{pT}} \right) - T_{tbin} (\dot{m}_{thr} - \dot{m}_{tb}) \right] \quad (2.41)$$

$$\frac{dN}{dt} = \left[ \dot{m}_{tb} C_{pT} (T_{tbin} - T_{tbout}) - \dot{m}_{comp} C_{comp} (T_{cpout} - T_{in}) \right] \frac{1}{NI} \quad (2.42)$$

$$\dot{m}_{comp} = f_{compressor}(N, p_{comp}, p_{in}, T_{in}) \quad (2.43)$$

$$\dot{m}_{bl} = f_{blow-off}(SB, p_{comp}, T_{comp}, p_{in}) \quad (2.44)$$

$$\dot{m}_{pl} = \sqrt{\frac{2p_{comp}A_{comp}^2(p_{comp}-p_{pl})}{\xi RT_{comp}}} \quad (2.45)$$

$$\dot{m}_{thr} = f_{trottle}(ST, p_{pl}, T_{pl}, p_{tbin}) \quad (2.46)$$

$$\dot{m}_{tb} = f_{turbine}(p_{tbin}, T_{tbin}, p_{tbout}) \quad (2.47)$$

$$DEVSurge = \dot{m}_{comp} + \frac{B_{comp}(N)}{2A_{comp}(N)Scale} \quad (2.48)$$

$$T_{cpout} = T_{in} \left( \frac{p_{comp}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{comp}}} \quad (2.49)$$

$$T_{plin} = T_{comp} \left( \frac{p_{pl}}{p_{comp}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.50)$$

$$T_{ccin} = T_{pl} \left( \frac{p_{tbin}}{p_{pl}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.51)$$

$$T_{tbout} = T_{tbin} \left( \frac{p_{pl}}{p_{comp}} \right)^{\frac{(\gamma-1)\eta_{tb}}{\gamma}} \quad (2.52)$$

$$\underline{x} = [p_{comp}, T_{comp}, p_{pl}, T_{pl}, p_{tbin}, T_{tbin}, N] \quad (2.53)$$

$$\underline{y} = [\underline{x}, \dot{m}_{comp}, \dot{m}_{bl}, \dot{m}_{pl}, \dot{m}_{thr}, \dot{m}_{tb}, DEVSurge] \quad (2.54)$$

$$\underline{u} = [SB, ST, SV] \quad (2.55)$$

Статическое уравнение для  $m_{pl}$ , получается из падения давления на воздуховоде площади  $A$ , давления на входе  $p_1$  и температуры  $T_1$ , давления на выходе  $p_2$ , скорости потока  $V$  и коэффициента трения  $E$ , и определяется как:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \xi p v \left( \frac{m}{pA} \right)^2 = \frac{1}{2} \xi \frac{m^2 R T_1}{p_1 A^2} \quad (2.56)$$

$$\Leftrightarrow m = \sqrt{\frac{2p_1 A^2 (p_1 - p_2)}{\xi R T_1}}, \quad (2.57)$$



где  $\xi$  - определяет общее падение давления.

## 2.4 Конфигурация модели Гаррета

Начиная с характеристики компрессора, было использовано следующее звено второго порядка, пригодное для соотношения давления компрессора как функции от массового расхода  $m_{comp}$  (и скорости вращения  $N$ ):

$$\text{pressure ratio} = \frac{P_{comp}}{P_{in}} = A_{comp}(N)(m_{comp}Scale)^2 + \quad (2.58)$$

$$+ B_{comp}(N)m_{comp}Scale + C_{comp}(N),$$

где  $Scale = \frac{96174}{P_{in}} \sqrt{\frac{T_{in}}{302.778} \frac{60}{0.4536}}$  масштабирует массовый расход до соответствующих размеров и  $A_{comp}$ ,  $B_{comp}$ ,  $C_{comp}$ , выравнивают скорость вращения.

$$A_{comp} = \left( (-2.788188 \cdot 10^{-18} N_{rpm} + 3.64473 \cdot 10^{-14}) N_{rpm} + 1.879789 \cdot 10^{-8} \right) N_{rpm} - 9.490669 \cdot 10^{-4} \quad (2.59)$$

$$B_{comp} = \left( (6.263607 \cdot 10^{-16} N_{rpm} + 7.269489 \cdot 10^{-11}) N_{rpm} + 2.654884 \cdot 10^{-6} \right) N_{rpm} - 0.0229777141 \quad (2.60)$$

$$C_{comp} = \left( (-2.310107 \cdot 10^{-14} N_{rpm} + 3.6635545 \cdot 10^{-9}) N_{rpm} + 1.723704 \cdot 10^{-4} \right) N_{rpm} - 3.7372517755 \quad (2.61)$$

с  $N_{rpm}$  в [об/мин].  $N$  используемое в нашей модели определяется в [об/с], и именно поэтому мы потрудились обозначить его как,  $N_{rpm} = 60 \cdot N$ . В результате характеристика компрессора изображена на рисунке 2.5.

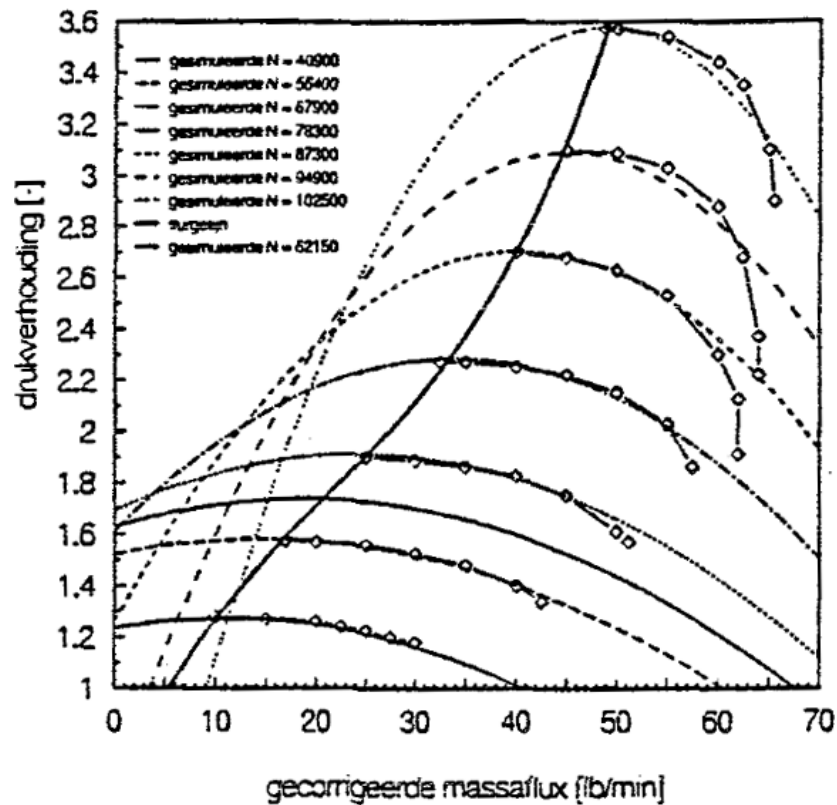


Рисунок 2.4 – Характеристика компрессора

Если  $m_{comp}$  получена из статического уравнения

$$m_{comp} = f_{compressor}(N, p_{comp}, p_{in}, T_{in}), \quad (2.62)$$

то  $f_{compressor}$  будет иметь следующий вид (где N опущено для ясности)

$$f_{compressor} = \frac{-B_{comp} - \sqrt{B_{comp}^2 - 4A_{comp} \left( C_{comp} - \frac{p_{comp}}{p_{in}} \right)}}{2A_{comp}Scale}, \quad (2.63)$$

что просто является одним из двух решений квадратного уравнения.

Далее, для определения массового расхода через клапан, используются следующие два эмпирически полученных соотношения для газообразных сред.

Они последовательно описывают суб- и сверхкритический потоки, последний случай описывает ситуацию, когда скорость жидкости достигла своего максимального значения (при наименьшей площади):

докритический поток:

$$\frac{p_2}{p_1} \geq 0,53$$

$$m = 0.143K_v \sqrt{\frac{p_n p_2 \Delta p}{T_1}} \quad (2.64)$$

сверхкритический поток:

$$\frac{p_2}{p_1} \leq 0,53$$

$$m = 0.713K_v p_1 \sqrt{\frac{p_n}{T_1}}, \quad (2.65)$$

где  $T_1$  и  $p_1$  являются температурой и давлением перед клапаном;

$p_2$  - давление после клапана;

$\Delta p$  разность давлений ( $p_1 - p_2$ );

$K_v$  пропускная способность клапана [ $m^3/час$ ] и  $p_n$  нормированная плотность (на 1.013 [бар] и 273 [К]). Давление должно быть введено в [бар] и температура в [К], чтобы получить в [кг/с].

Пропускная способность клапана  $K_v$ , это мгновенное значение, которое изменяется в зависимости от положения  $S$  клапана. Эта зависимость может, например, быть пропорциональна

$$K_v = S \cdot K_{vmax}.$$

При  $S \in [0,1]$  и  $K_{vmax}$  максимальная пропускная способность. Также довольно часто является экспоненциальной характеристикой

$$K_v = K_{vmax} \cdot base^{(S-1.0)}.$$

В нашей модели мы использовали только пропорциональные характеристики клапана, и для обдува и для дроссельной заслонки, для модели Гарретта мы имеем

$$K_{vbkmax}=160m^3/час \text{ и } K_{vthrmx}=400m^3/час.$$

Массовый расход и КПД турбины

$$m_{tb} =$$

$$\left( \left( \left( \left( \left( \left( -8.345 \frac{p_{tbin}}{p_{tbout}} + 110.542 \right) \frac{p_{tbin}}{p_{tbout}} - 604.202 \right) \frac{p_{tbin}}{p_{tbout}} + 174.819 \right) \frac{p_{tbin}}{p_{tbout}} - \right. \right. \right. \right. \right. \right. \left. \right. \left. \right. \left. \right. \left. \right. \left. \right.$$

$$\left( 2840.761 \frac{P_{tbin}}{P_{tbout}} + 2475.591 \right) \frac{P_{tbin}}{P_{tbout}} - 870.560 \left( \frac{P_{tbin}}{101321} \sqrt{\frac{288.3}{T_{tbin}}} 0.00756 \right) \quad (2.66)$$

$$\eta_{tb} = \left( \left( 0.0414 \frac{P_{in}}{P_{out}} - 0.3260 \right) \frac{P_{in}}{P_{out}} + 0.7500 \right) \frac{P_{in}}{P_{out}} + 0.1658. \quad (2.67)$$

Далее, мы установили положение топливного клапана SV. Мы сделали это путем определения мощности, необходимой для аппроксимации измерения стационарных точек (для каждой точки в отдельности) настолько хорошо, насколько это практически возможно, а затем, установили эти значения на соответствующие позиции топливного клапана SV. Конечно, результат во многом зависит от выбора, сделанного для общего коэффициента трения (= 1.0), мощности клапанов  $K_{vblmax}$  (=160) и  $K_{vthrmax}$  (= 400), а также  $\eta_{comp}$  эффективности (= 0.70) и  $\eta_{tb}$  (зазор). Во всяком случае, после нескольких итераций, мы пришли к следующему результату

$$Power = e^{13.421718 - \frac{0.756721}{\sqrt{SV}}}, \quad (2.68)$$

где  $SV \in [0,1]$  и Power измеряется в [Ватт].

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Таблица 2.1 – параметры ГТД

Глобальные параметры												
$\gamma=1.4; R=287; \rho=1.2; A_{comp}=0.018; T_{in}=291.5; p_{in}=1.0*10^5; p_{tout}=1.02*10^5$												
	$V_{comp}$	$V_{pl}$	$V_{cc}$	$I$	$\gamma_T$	$R_T$	$K_{vblmax}$	$K_{vthrmax}$	$\xi$	$\eta_{comp}$	$c_{pcomp}$	$c_{pT}$
Garret	0.5	5.5	2.0	0.001	1.4	287	160	400	1.0	0.70	1000	1040

## 2.5 Математическое описание имитационной модели микрогазотурбинной установки

Метод Эйлера — простейший численный метод решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Впервые описан Леонардом Эйлером в 1768 году в работе «Интегральное исчисление»[1]. Метод Эйлера является явным, одношаговым методом первого порядка точности, основанном на аппроксимации интегральной кривой кусочно-линейной функцией, так называемой ломаной Эйлера.

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$y' = f(x, y) \quad (2.69)$$

с начальным условием

$$y(x_0) = y_0$$

подставив  $x_0, y_0$  в уравнение (2.69), получим значение производной в точке  $x_0$ :

$$y'|_{x=x_0} = f(x_0, y_0).$$

при малом  $\Delta x$  имеет место:

$$y(x_0 + \Delta x) = y(x_1) = y_0 + \Delta y = y_0 + y'|_{x=x_0} * \Delta x = y_0 + f(x_0, y_0) * \Delta x.$$

обозначив  $f(x_0, y_0) = f_0$ , перепишем последнее равенство в виде:

$$y_1 = y_0 + f_0 * \Delta x \quad (2.70)$$

принимая теперь  $(x_1, y_1)$  за новую исходную точку, точно также получим:

$$y_2 = y_1 + f_1 * \Delta x.$$

В общем случае будем иметь:

					270304.2017.183 ПЗ ВКР				Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					37

$$y_{i+1} = y_i + f_i * \Delta x . \quad (2.71)$$

Это и есть *метод Эйлера*. Величина  $\Delta x$  называется *шагом интегрирования*. Пользуясь этим методом, мы получаем приближенные значения  $y$ , так как производная  $y'$  на самом деле не остается постоянной на промежутке длиной  $\Delta x$ . Поэтому мы получаем ошибку в определении значения функции  $y$ , тем большую, чем больше  $\Delta x$ . Метод Эйлера является простейшим методом численного интегрирования дифференциальных уравнений и систем. Его недостатки – малая точность и систематическое накопление ошибок.

Более точным является *модифицированный метод Эйлера с пересчетом*. Его суть в том, что сначала по формуле (2.70) находят так называемое «грубое приближение» (прогноз):

$$\tilde{y}_{i+1} = y_i + f_i * \Delta x,$$

а затем пересчетом  $\tilde{f}_{i+1} = f(x_{i+1}, \tilde{y}_{i+1})$  получают тоже приближенное, но более точное значение (коррекция):

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f_i + \tilde{f}_{i+1}}{2} * \Delta x . \quad (2.72)$$

Фактически пересчет позволяет учесть, хоть и приблизительно, изменение производной  $y'$  на шаге интегрирования  $\Delta x$ , так как учитываются ее значения  $f_i$  в начале и  $\tilde{f}_{i+1}$  в конце шага (рис. 2.8), а затем берется их среднее. Метод Эйлера с пересчетом (2.72) является по существу методом Рунге-Кутты 2-го порядка, что станет очевидным из дальнейшего.

										Лист
										38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	270304.2017.183 ПЗ ВКР					

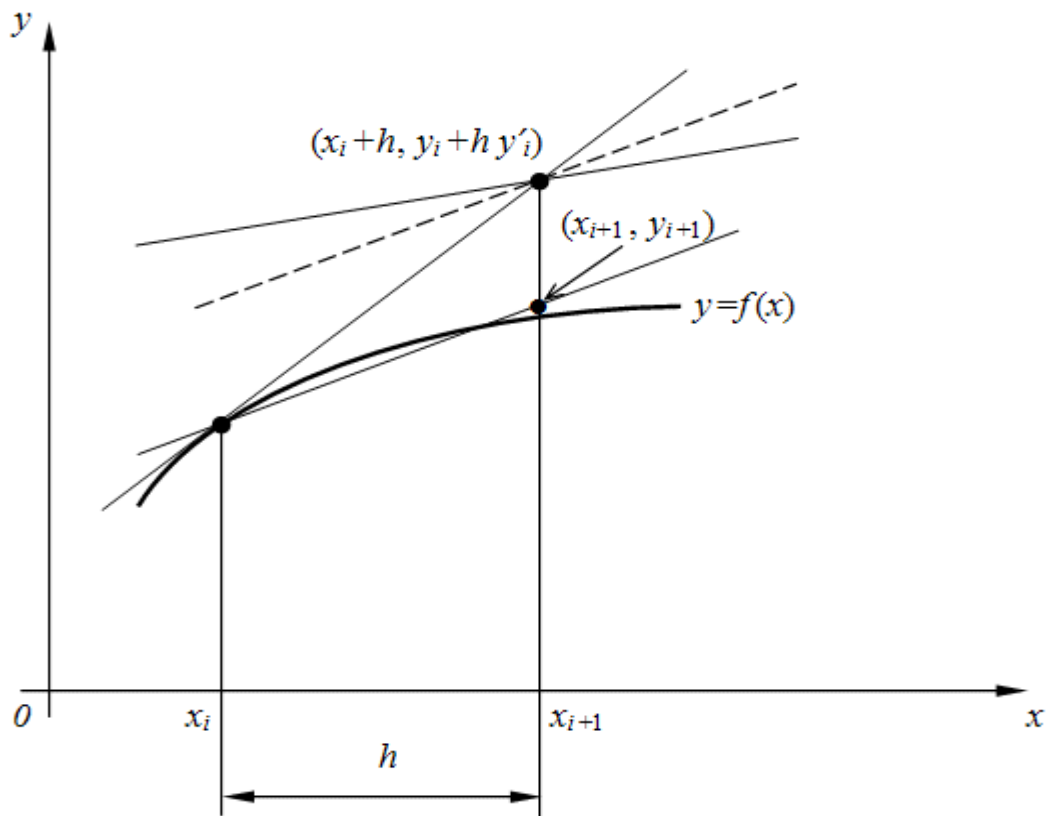


Рисунок 2.5 – Геометрическое представление метода Эйлера с пересчетом.

Применим этот метод к имеющимся математическим моделям МГТУ.

$$P_{\text{comp}}(k+1) = P(k) + \Delta k \left( \frac{\gamma R}{V_{\text{comp}}} [\dot{m}_{\text{comp}} T_{\text{cpout}} - (\dot{m}_{\text{pl}} - \dot{m}_{\text{bl}}) T_{\text{comp}}] \right) \quad (2.73)$$

$$T_{\text{comp}}(k+1) = T_{\text{comp}}(k) + \Delta k \left( \frac{RT_{\text{comp}}}{P_{\text{comp}} V_{\text{comp}}} [\gamma (\dot{m}_{\text{comp}} T_{\text{cpout}} - (\dot{m}_{\text{pl}} - \dot{m}_{\text{bl}}) T_{\text{comp}}) - T_{\text{com}} (\dot{m}_{\text{comp}} - (\dot{m}_{\text{pl}} - \dot{m}_{\text{bl}}))] \right) \quad (2.74)$$

$$P_{\text{pl}}(k+1) = P_{\text{pl}}(k) + \Delta k \left( \frac{\gamma R}{V_{\text{pl}}} [\dot{m}_{\text{pl}} T_{\text{plin}} - \dot{m}_{\text{thr}} T_{\text{pl}}] \right) \quad (2.75)$$

$$T_{\text{pl}}(k+1) = T_{\text{pl}}(k) + \Delta k \left( \frac{RT_{\text{pl}}}{P_{\text{pl}} V_{\text{pl}}} [\gamma (\dot{m}_{\text{pl}} T_{\text{plin}} - \dot{m}_{\text{thr}} T_{\text{pl}}) - T_{\text{pl}} (\dot{m}_{\text{pl}} - \dot{m}_{\text{thr}})] \right) \quad (2.76)$$

$$P_{\text{tbin}}(k+1) = P_{\text{tbin}}(k) + \Delta k \left( \frac{\gamma R T}{V_{\text{cc}}} \left[ \dot{m}_{\text{thr}} T_{\text{ccin}} \frac{C_{\text{pcomp}}}{C_{\text{pT}}} - \dot{m}_{\text{tb}} T_{\text{tbin}} + \frac{\text{Power(SV)}}{C_{\text{pT}}} \right] \right) \quad (2.77)$$

$$T_{\text{tbin}}(k + 1) = T_{\text{tbin}}(k) + \Delta k \left( \frac{R_t T_{\text{tbin}}}{P_{\text{tbin}} V_{\text{cc}}} \left[ \gamma T \left( \dot{m}_{\text{thr}} T_{\text{ccin}} \frac{C_{\text{pcomp}}}{C_{\text{pT}}} - \dot{m}_{\text{tb}} T_{\text{tbin}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{\text{Power(SV)}}{C_{\text{pT}}} \right) - T_{\text{tbin}} (\dot{m}_{\text{thr}} - \dot{m}_{\text{tb}}) \right] \right) \quad (2.78)$$

$$N(k + 1) = N(k) + \Delta k^*$$

$$* \left( \left[ \dot{m}_{\text{tb}} C_{\text{pT}} (T_{\text{tbin}} - T_{\text{tbout}}) - \dot{m}_{\text{comp}} C_{\text{comp}} (T_{\text{cpout}} - T_{\text{in}}) \right] \frac{1}{NI} \right). \quad (2.79)$$

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40



## 3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА В СРЕДЕ SIMATIC S7

### 3.1 Конфигурирование аппаратуры

Для реализации математической модели газотурбинного двигателя был выбран программный пакет SIMATIC S7.

С помощью этой программы выполняется комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров Simatic S7-300 и Simatic S7-400 фирмы Siemens. В первую очередь это работы по программированию контроллеров. Программируемый логический контроллер, ПЛК — это микропроцессорное устройство, предназначенное для управления технологическими процессами в промышленности. Принцип работы ПЛК заключается в обработке по прикладной программе пользователя данных с модулей входов (например, сигналов от подключенных датчиков) и последующей выдачей управляющих сигналов, посредством модулей выходов и модулей связи, обеспечивающих подключение исполнительных устройств. В основе работы лежит концепция проекта, под которым понимается комплексное решение задачи автоматизации, включая несколько взаимосвязанных контроллеров на базе физических микроконтроллеров, соединяющие их сети и системы человеко-машинного интерфейса. Работу с проектом в целом обеспечивает главная утилита Step 7 — Simatic Manager. Step 7 позволяет производить конфигурирование программируемых логических контроллеров и сетей (утилиты HWConfig и NetPro). В процессе конфигурирования определяется состав оборудования в целом, разбиение на модули, способы подключения, используемые сети, выбираются настройки для используемых модулей. Система проверяет правильность использования и подключения отдельных компонентов. Завершается конфигурирование загрузкой выбранной конфигурации в оборудование, что по сути является настройкой оборудования. Утилиты конфигурирования позволяют осуществлять диагностику оборудования,

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

обнаруживать аппаратные ошибки или неправильный монтаж оборудования. Программирование контроллеров производится редактором программ, обеспечивающим написание программ на трех языках (LAD, SCL, FBD).

Конфигурирование аппаратуры – это инструментальное средство используется для конфигурирования и назначения параметров аппаратуре, используемой в проекте автоматизации. Имеются в распоряжении следующие функции:

1. для конфигурирования программируемого контроллера вы выбираете стойки из электронного каталога и размещаете выбранные модули в необходимых слотах на этих стойках;
2. конфигурирование децентрализованной периферии идентично конфигурированию центрального устройства. Поддерживаются также входы/выходы на уровне каналов;
3. в процессе назначения параметров CPU вы можете установить такие свойства как поведение при запуске и контроль времени цикла под управлением меню. Поддерживается многопроцессорный режим. Введенные данные хранятся в системных блоках данных;
4. в процессе назначения параметров модулям все устанавливаемые параметры назначаются вами через диалоговые окна. Настройки, устанавливаемые с помощью двухпозиционных переключателей, отсутствуют. Присвоение параметров модулям производится автоматически при запуске CPU. Это значит, например, что модуль может быть заменен без назначения новых параметров;
5. назначение параметров функциональным модулям (FM) и коммуникационным процессорам (CP) производится с помощью инструментального средства Hardware Configuration точно таким же образом, как и для других модулей. Для каждого FM и CP (включенного в сферу действия функционального пакета FM/CP) существуют специфические для модулей диалоговые окна и правила. Система

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

препятствует неправильным вводам, предлагая только допустимые варианты в диалоговых окнах.

Сборка аппаратного обеспечения приведена на рисунке 3.1.

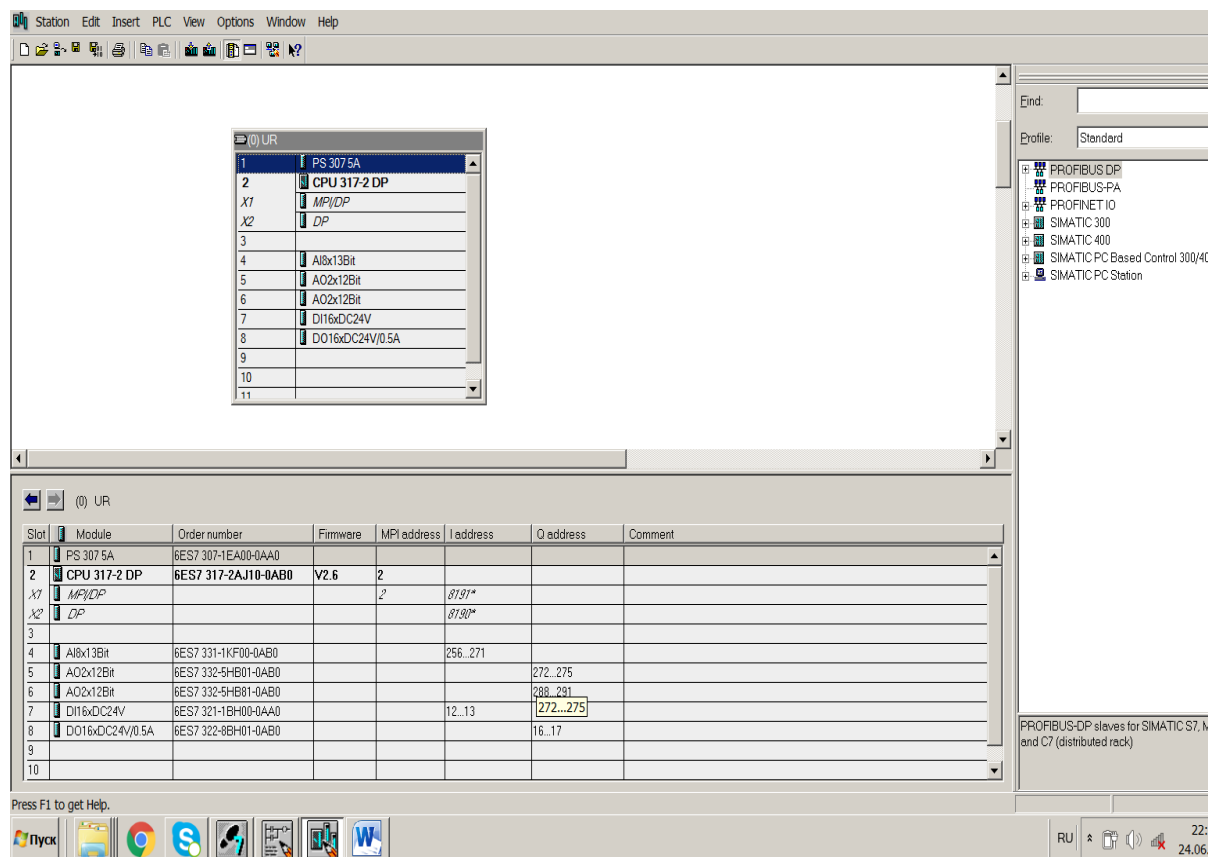


Рисунок 3.1 – Сборка аппаратного обеспечения в среде SIMATIC S7

Логические блоки (OB, FB, FC) состоят из раздела описания переменных и раздела операторов. Они также обладают определенными свойствами. При программировании нужно редактировать следующие три раздела:

- таблица описания переменных: в таблице описания переменных описываются параметры, системные атрибуты для параметров и локальные переменные блока;
- раздел операторов: в разделе операторов программируется код блока, который должен исполняться контроллером. Код состоит из одного или нескольких сегментов, содержащих элементы FUP;
- свойства блока: свойства блока содержат дополнительную информацию, например метку времени и путь, которые вносятся самой системой;

Организационные блоки (ОВ) образуют интерфейс между операционной системой и программой пользователя. Они вызываются операционной системой и управляют циклическим и по прерываниям исполнением программы, а также запуском программируемого логического контроллера. Они также обрабатывают реакцию на ошибки. Программируя организационные блоки, вы определяете реакцию CPU. Организационные блоки определяют порядок, в котором исполняются отдельные программные секции. Исполнение ОВ может быть прервано вызовом другого ОВ. Какому ОВ разрешается прервать другой ОВ зависит от его приоритета. ОВ с более высоким приоритетом могут прерывать ОВ с более низким приоритетом. Фоновый ОВ имеет самый низкий приоритет.

Линейное и структурное программирование. Вы можете записать всю свою программу в ОВ1 (линейное программирование). Это целесообразно только в случае простых программ, написанных для CPU S7-300 и требующих мало памяти. Сложными задачами автоматизации проще управлять, если они разделены на более мелкие задачи, которые отражают технологические функции процесса и могут быть использованы неоднократно. Эти задачи представляются соответствующими программными секциями, известными как блоки (структурное программирование).

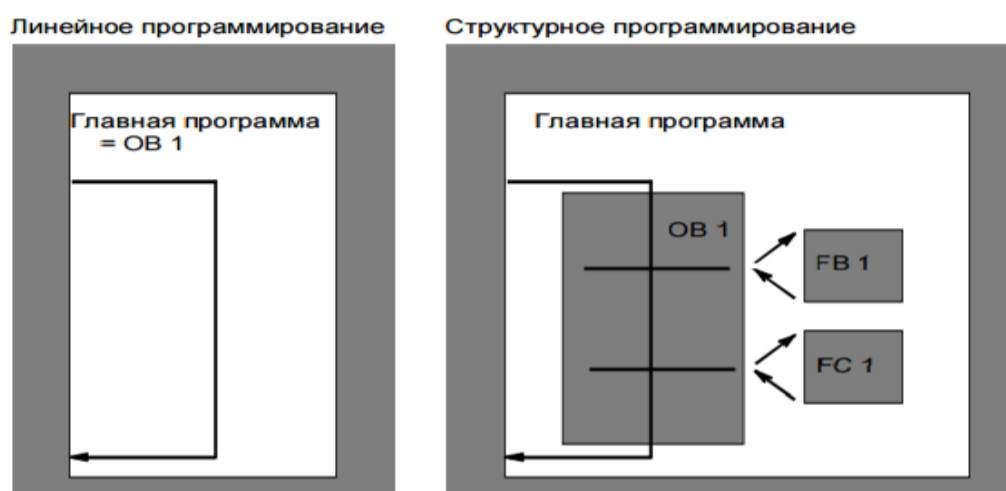


Рисунок 3.2 – Виды программирования

После открытия нового логического блока на экране появляется таблица описания переменных по умолчанию. Она перечисляет все допустимые типы описаний для конкретного блока (in, out, in\_out, stat, temp) в правильном порядке. При создании нового ОВ отображается стандартное описание переменных, в котором можно изменять значения. Таблица описания переменных содержит поля для адреса, описания, символического имени, типа данных, начального значения и комментария к переменным приведена на рисунке 3.3. Каждая строка представляет описание переменной. Переменные типа массив или структура требуют более одной строки.

	Stat	Symbol	Address	Data type	Comment
1		I	MD 138	REAL	момент инерции на валу
2		SV	MD 142	REAL	топливный клапан
3		Vcomp	MD 108	REAL	объем компрессора
4		Mcomp	MD 100	REAL	массовый расход воздуха компрессора
5		Mpl	MD 112	REAL	массовый расход воздуха на мленуме
6		Mthr	MD 116	REAL	массовый расход воздуха на
7		N	QW 276	WORD	частота вращения вала
8		Pcomp	QW 272	WORD	давление на выходе компрессора
9		Vcc	MD 134	REAL	объем камеры сгорания
10		Pplin	IW 260	WORD	давление на входе в пленум
11		Ptbin	IW 256	WORD	давление на входе в турбину
12		Ptbout	MD 136	REAL	давление на выходе из турбины
13		Tccin	MD 128	REAL	температура воздуха в камере сгорания
14		Tcomp	QW 274	WORD	температура воздуха на входе в компрессор
15		Tcpout	MD 120	REAL	температура воздуха на выходе из компресс...
16		Tpl	IW 262	WORD	температура воздуха на выходе из пленума
17		Tplin	MD 124	REAL	температура воздуха на входе в пленум
18		Ttbin	IW 258	WORD	температура воздуха на входе в турбину
19		Ttbout	MD 132	REAL	температура продуктов сгорания на выходе ...
20		R	MD 144	REAL	газовая постоянная

Рисунок 3.3 – Структура таблицы описания переменных

### 3.2 Язык функциональных блок-схем (FBD)

Язык функциональных блок-схем (FBD) описывает функции преобразования входных переменных контроллера в выходные в виде сочетания элементарных функциональных блоков.

Язык функциональных блоков (*Function Block Diagrams*) позволяет создать программную единицу практически любой сложности на основе стандартных функциональных блоков (арифметические, тригонометрические, логические блоки, ПИД-регуляторы, мультиплексоры и т.д.). Это языковое средство

использует технологию инкапсуляции алгоритмов обработки данных и законов регулирования. Все программирование заключается в соединении готовых компонентов. В результате получается наглядная и хорошо контролируемая программная единица

Выход функционального блока может быть соединен со входами других блоков. Каждый функциональный блок представляет собой прямоугольник, внутри которого имеется обозначение функции, выполняемой блоком (рис. 3.3).

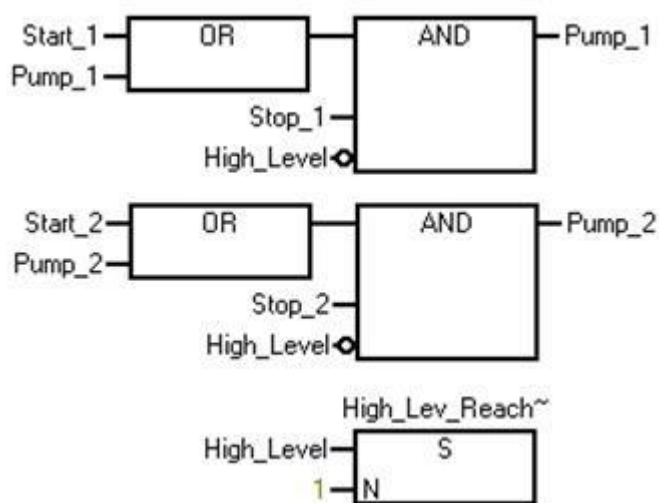


Рисунок 3.3 – Входы-выходы блоков и их соединение

### 3.3 Формальные правила языка FBD

Формальные правила языка FBD:

1. функциональные блоки могут располагаться произвольно в поле программы;
2. не может быть несоединенных входов и выходов функционального блока;
3. соединение блоков может выполняться также при помощи ссылок с определенными именами;
4. функциональные блоки размещаются слева направо, сверху вниз;
5. на входе функционального блока может быть константное выражение, любая внутренняя или входная переменная контроллера; выходная переменная.
6. на выходе блока может быть любая внутренняя или выходная переменная ПЛК.

В таблице 3.1 представлен перечень основных функциональных блоков языка *FBD*.

Таблица 3.1 – Основные функциональные блоки языка *FBD*

Наименование	Обозначение	Описание
1. Функции двоичного типа	<i>NOT</i>	Логическое отрицание
<i>AND</i>	Логическая конъюнкция	
<i>OR</i>	Логическая дизъюнкция	
<i>XOR</i>	Исключающее ИЛИ	
<i>SET</i>	Присвоение переменной единицы	
<i>RESET</i>	Обнуление переменной	
2. Функции управления	<i>RETURN</i>	Возврат из подпрограммы
<i>GOTO</i>	Безусловный переход	
<i>CALL</i>	Вызов подпрограммы	
3. Арифметические функции	<i>ADD</i>	Сложение
<i>SUB</i>	Вычитание	
<i>DIV</i>	Деление	
<i>MUL</i>	Умножение	
4. Функции сравнения	=	Равно
<>	Не равно	

>	Больше	
<	Меньше	
=>	Больше или равно	
<=	Меньше или равно	
5. Математические функции	<i>ABS</i>	Модуль
<i>EXPT</i>	Экспонента	
<i>LOG</i>	Логарифм	
<i>SQRT</i>	Корень	
6. Тригонометрические функции	<i>ACOS</i>	Арккосинус
<i>ASIN</i>	Арсинус	
<i>ATAN</i>	Арктангенс	
<i>COS</i>	Косинус	
<i>SIN</i>	Синус	
<i>TAN</i>	Тангенс	

### 3.4 Реализация конечно-разностных уравнений в среде STEP 7

#### 3.4.1 Блок компрессора

В среде технического программирования Step 7 на языке программирования функциональных блочных диаграмм (FBD) описан расчет математической модели компрессора в которой реализованы уравнения 2.73 и 2.74 на рисунке 3.4, остальной алгоритм программы на языке «инструкции» приведен в приложении А.

Входными параметрами для компрессора являются температура  $T_{in}$  и давление на входе  $P_{in}$ , отношение теплоемкостей  $\gamma$ , КПД компрессора,



переменные параметры  $A_{comp}$ ,  $B_{comp}$ ,  $C_{comp}$ , масштаб массового расхода Scale, производные массовых расходов пленума  $dM_{pl}$  и перепускного канала  $dM_{bl}$ , газовая постоянная R и объем компрессора  $V_{comp}$ . Выходными параметрами являются температура на выходе компрессора  $T_{срout}$ , производная массового расхода компрессора  $dM_{comp}$ , давление  $P_{comp}$  и температуру  $T_{comp}$  в компрессоре.

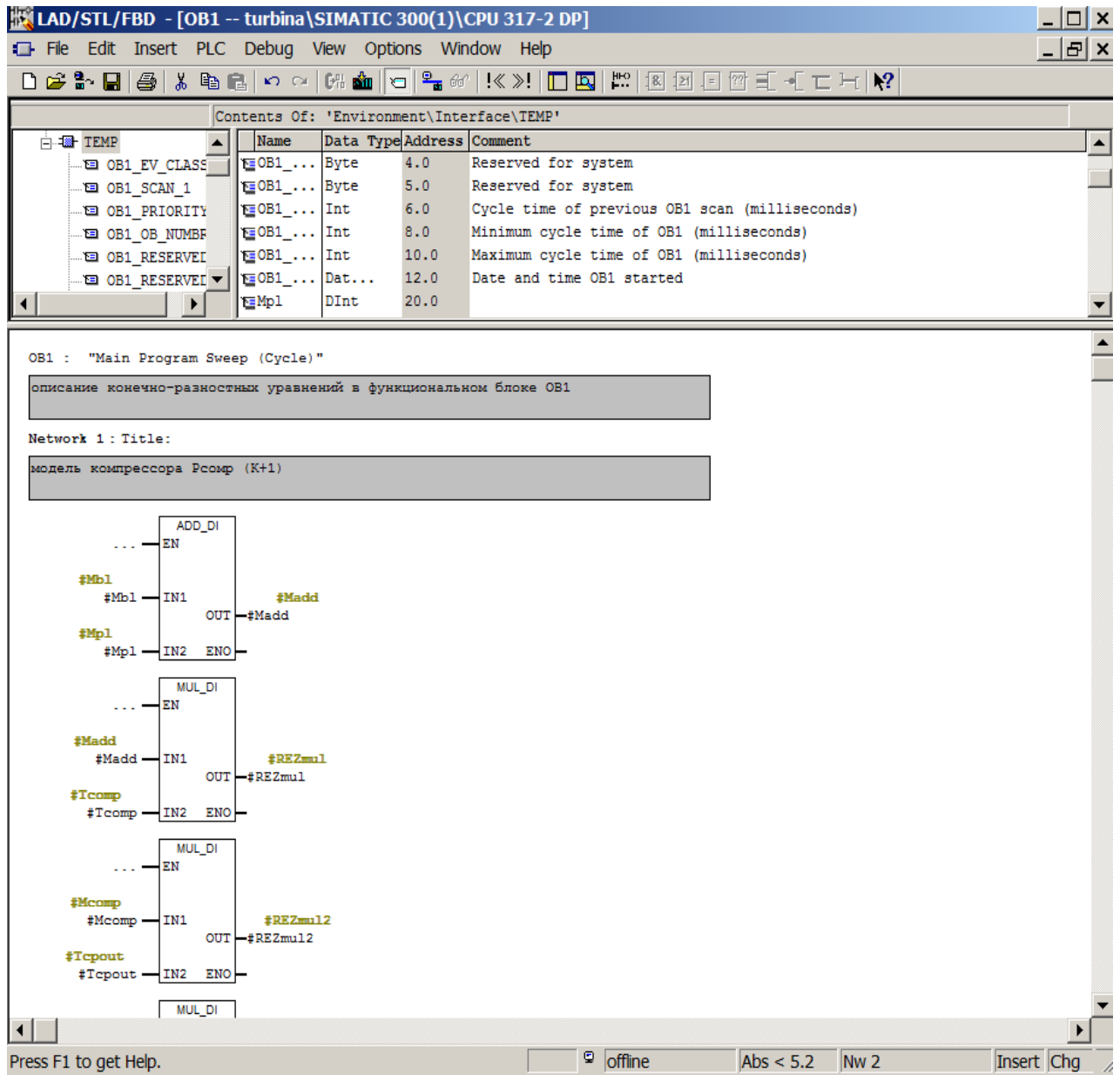


Рисунок 3.4 – Блок компрессора (Pcomp)

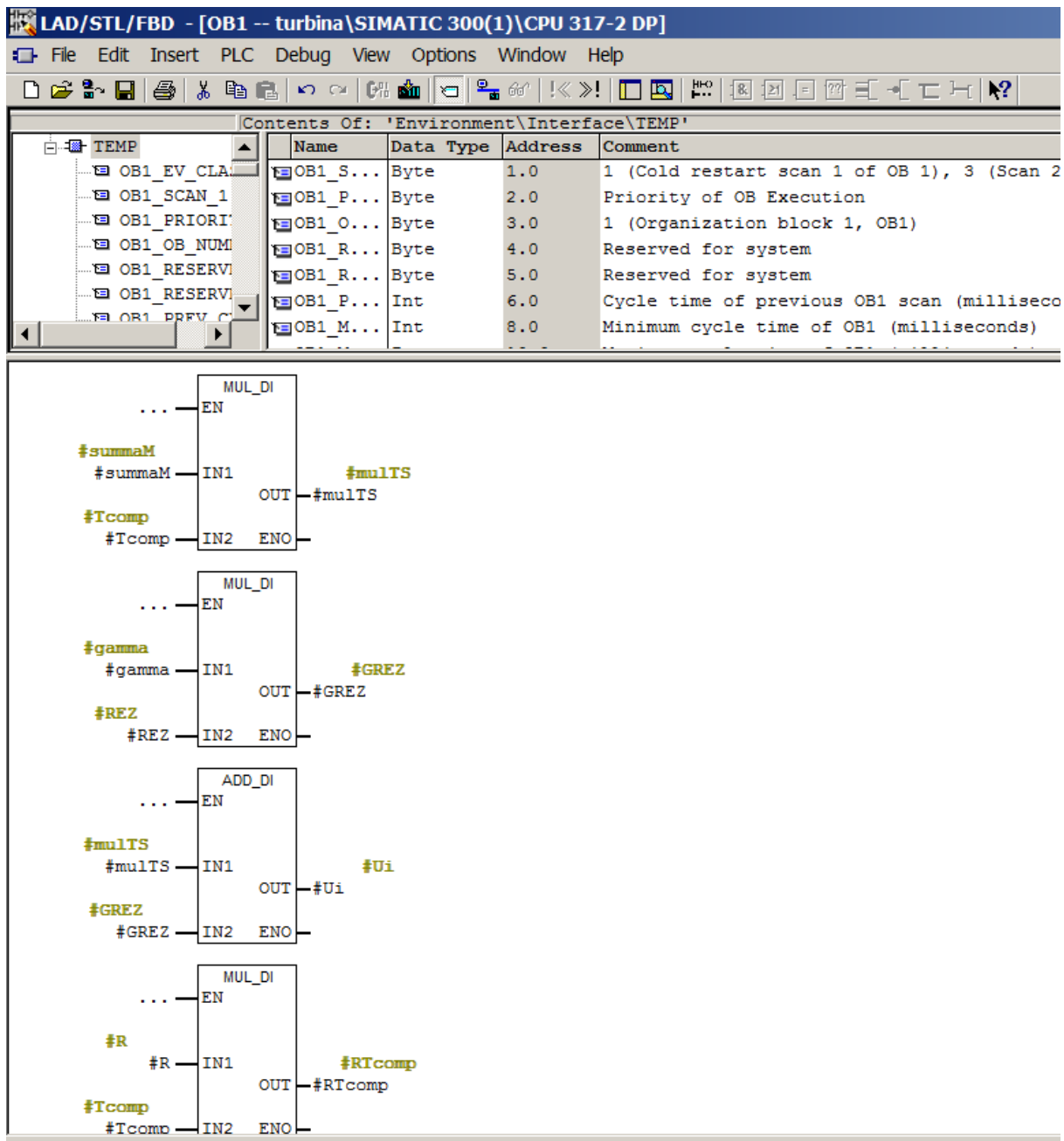


Рисунок 3.5 – Блок компрессора (Tcomp)

### 3.4.2 Блок плenuma

В среде технического программирования Step 7 на языке программирования функциональных блочных диаграмм (FBD) описан расчет математической модели компрессора в которой реализованы уравнения 2.75 и 2.76 на рисунке 3.4, остальной алгоритм программы на языке инструкции приведен в приложении А.

Входными параметрами для плenuma являются давление  $P_{comp}$  и температура  $T_{comp}$  в компрессоре, отношение теплоемкостей  $\gamma$ , производная массового

расхода на клапане дросселя  $dM_{thr}$ , газовая постоянная  $R$ , объем пленума  $V_{pl}$  и коэффициент трения  $\chi_i$ . Выходными производную массового расхода пленума  $dM_{pl}$ , давление  $P_{pl}$  и температуру  $T_{pl}$  в пленуме.

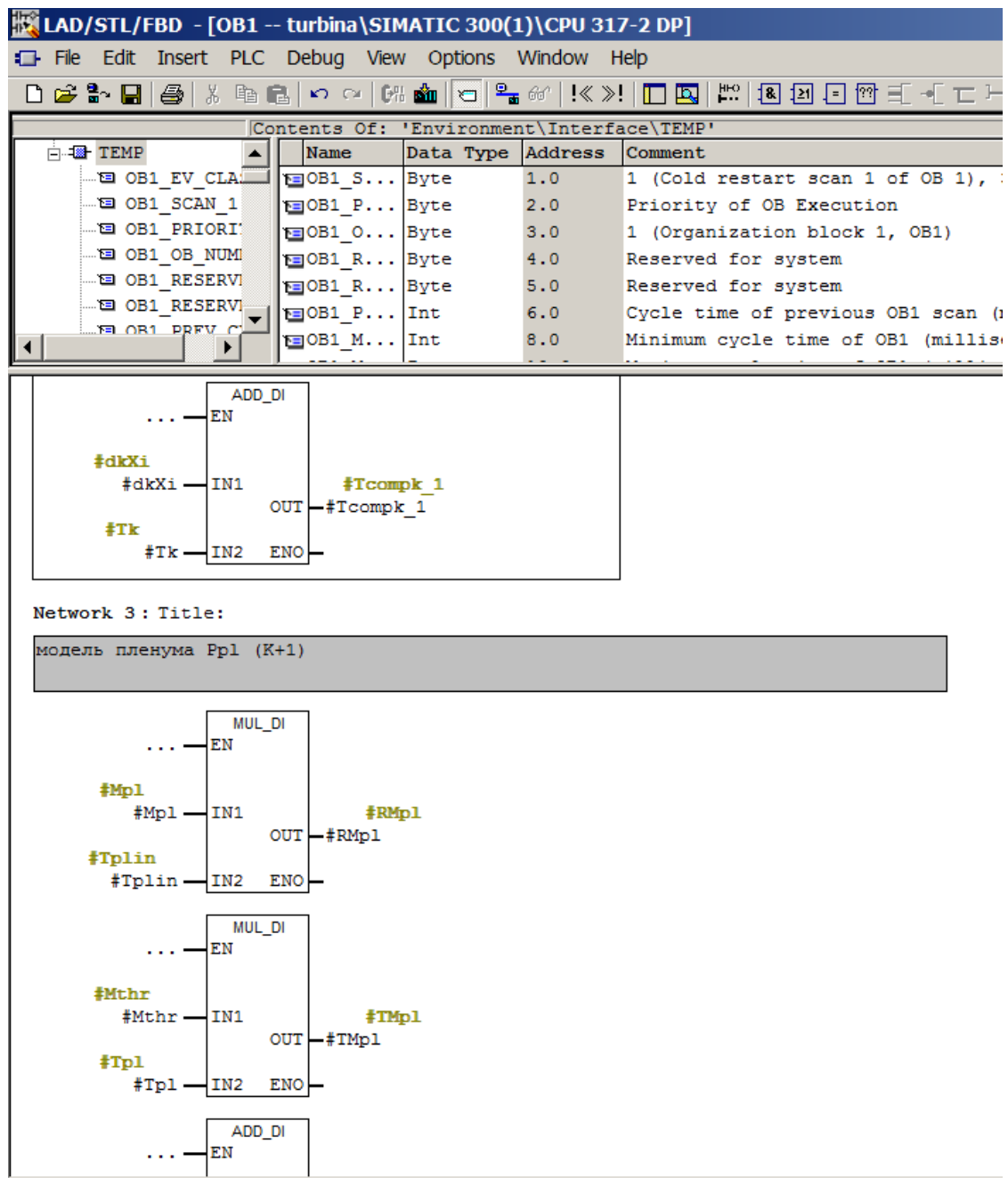


Рисунок 3.6 – Блок пленума (Ppl)

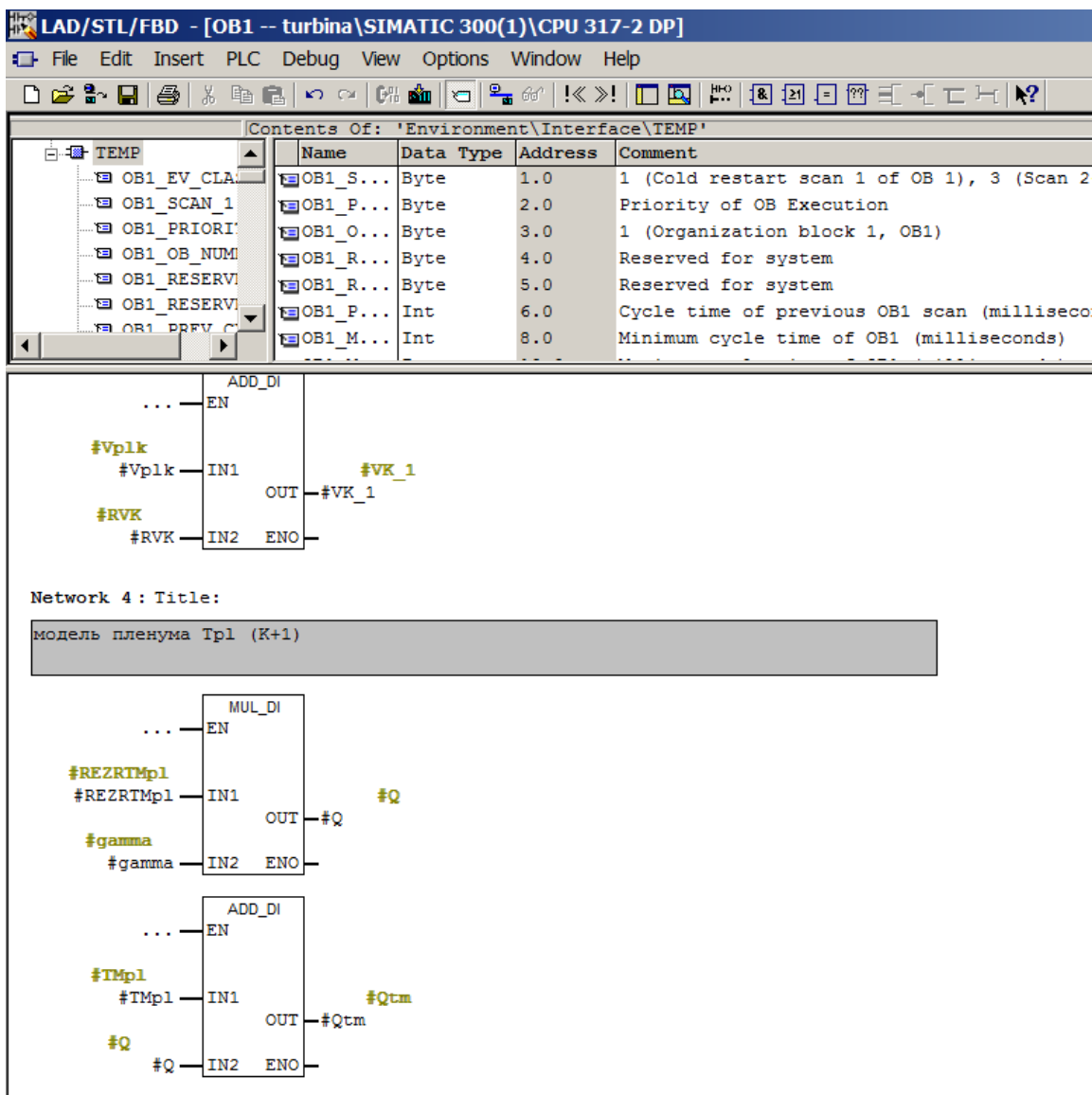


Рисунок 3.7 – Блок пленума (Tr1)

### 3.4.3 Блок турбины

В среде технического программирования Step 7 на языке программирования функциональных блочных диаграмм (FBD) описан расчет математической модели компрессора в которой реализованы уравнения 2.77 и 2.78 2.79 на рисунке 3.8 и 3.9, остальной алгоритм программы на языке инструкции приведен в приложении А. Входными параметрами для турбины являются температура  $T_{tbin}$  и давление на входе  $P_{tbn}$ , производная массового расхода компрессора  $dM_{comp}$ , и постоянные параметры турбины. Такие как КПД турбины  $\eta_{ta.tb}$ , удельная теплоемкость компрессора при постоянном давлении  $c_{p,comp}$ , удельная теплоемкость при постоянном давлении при высокой

температуре  $srT$  и другие. Выходными параметрами являются производная массового расхода турбины  $dMtb$  и скорость вращения вала  $N$ .

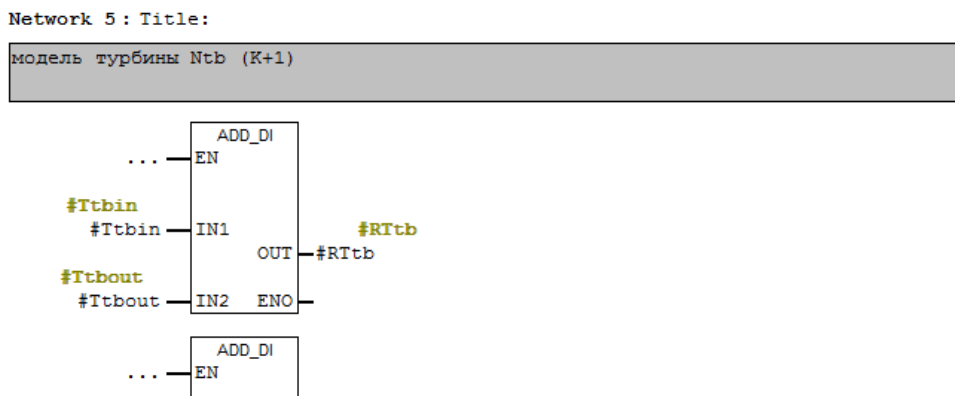


Рисунок 3.8 – Блок турбины (Ntb)

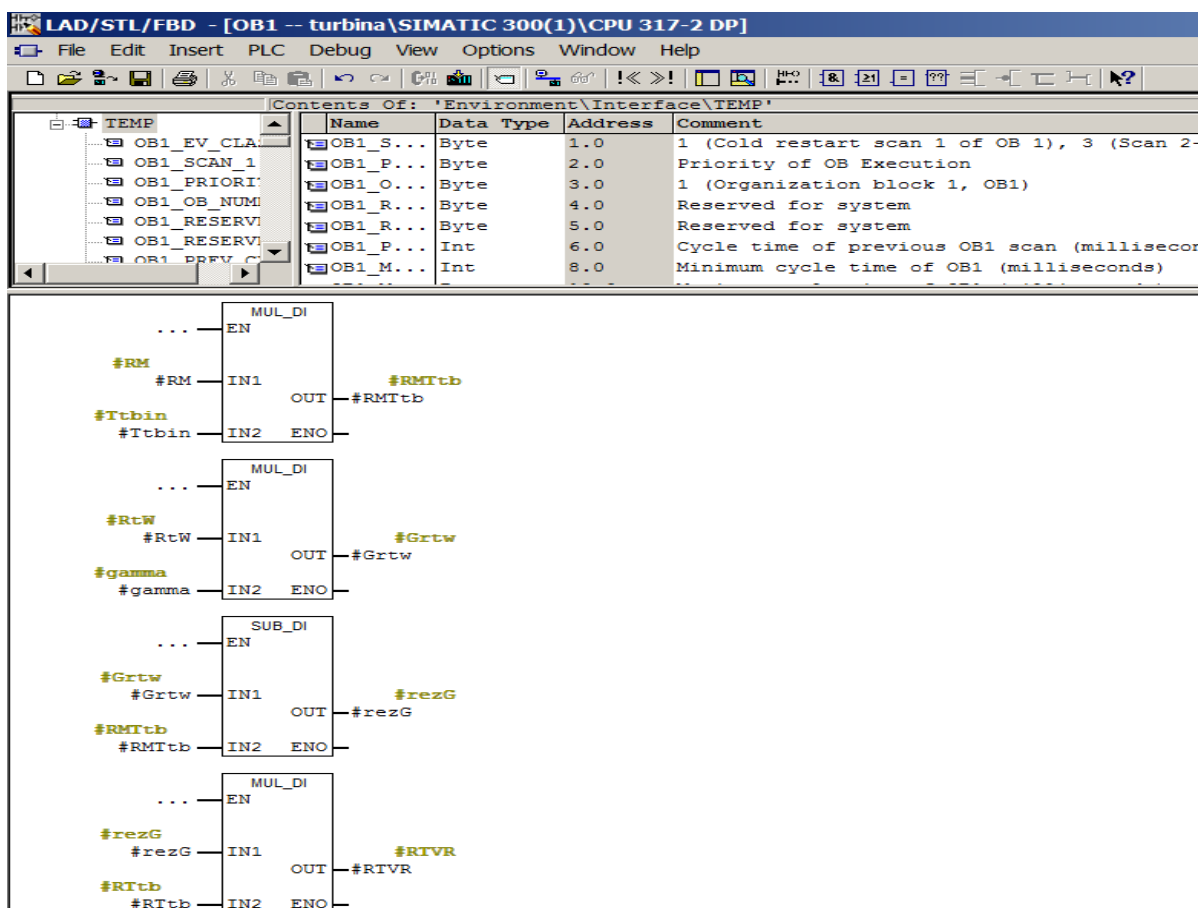


Рисунок 3.9 – Блок турбины (Ttb)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование микрогазотурбинной установки как объекта управления и определены параметры входных и выходных сигналов.

Исходя из требований к аналоговым сигналам, выбраны модули ввода – вывода.

Исходя из электрических характеристик входных сигналов, выбраны модули дискретного ввода – вывода.

С помощью среды технологического программирования «SIMATIC STEP 7 менеджер» и языков технологического программирования FBD – функциональных блочных диаграмм, SCL – языка инструкции, разработано программное обеспечение имитационного стенда для системы управления микрогазотурбинной установкой.

Поставленные цели и задачи выпускной квалификационной работы реализованы, данный комплекс работает согласно установленным техническим характеристикам.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. — Пермь: ОАО "Авиадвигатель", 2006. — 1204 с.
2. Цанев С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов. — М.: Издательство МАИ, 2002. — 584 с.
3. Миргород В. Ф. Виртуальный стенд для моделирования систем авиационных двигателей / В. Ф. Миргород, В. М. Грудинкин // Искусственный интеллект. — 2006. — № 3. — С. 193—198.
4. Kulikov G. G. Dynamic modelling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control / G. G. Kulikov, H. A. Thompson. — London : Springer-Verlag, 2004. — 305 p.
5. Vroemen B. G. Model Predictive Control of a Gas Turbine Installation / B. G. Vroemen. — WFW report 97.002. — Faculty of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology. — 1997. — 107 p.
6. Казаринов, Л.С. Введение в методологию системных исследований и управления: монография / Л.С. Казаринов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, издатель Т. Лурье, 2008. — 344 с.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 616 с.
8. Кузин Ф.А. Магистерская диссертация. Методика написания, правила оформления и порядок защиты. Практическое пособие для студентов-магистрантов. — 2-е изд., пере- раб. и доп. — М.: Ось-89, 1999. — 304 с.
9. P.L. Sorpen. Введение в языки стандарта МЭК 61131-3
10. Петров И. В., «Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования» / Под ред. проф. В. П. Дьяконова.- М.:СОЛОН-Пресс, 2004. — 256с.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

11. Siemens AG, Bereich Automatisierungstechnik: SIMATIC Komponenten für die Vollintegrierte Automation, Nürnberg, 1997, Siemens-Bestell-Nr. E86060-K4670-A101-A3.

12. Siemens AG, Automation and Drives: SIMATIC S7, STEP 7 — Grundwissen, 2006, Siemens-Bestell-Nr.

13. Arnold Zankl: Meilensteine der Automatisierung, ISBN 3-89578-258-0.

14. Matthias Habermann, Torsten Weiß: STEP®7-Crashkurs Extended, 6. Auflage, 2007, VDE VERLAG GMBH.

15. Пупкова К.А. Языки программирования промышленных контроллеров: Учебное пособие.

Деменков Н.П., под. Ред, М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 288 с.

16. Парр Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера..., пер. с 3-го англ. изд., М.: БИНОМ. Лаборатория знаний., 2007- 426с

17. 3 Петров И.В. Программируемые контроллеры. Практическое применение языков стандарта МЭК 61131. Москва "Солон Пресс - 2003"

18. Елизаров И.А. Мартемьянов Ю.Ф. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры и другие Москва "Издательство Машиностроение - 2004".

19. Hans Berger. Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400 Ганс Бергер перевод по 2-му изд. Automating with Step 7 in STL & SCL.. 2006 – 315с.

20. Митин Г.П., Хазанова О.В. Системы автоматизации с использованием программируемых логических контроллеров: Учебное пособие., М.: ИЦ МГТУ "Станкин" 2012г. – 548с.

21. Hans Berger. Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400 Ганс Бергер перевод по 2-му изд. Automating with Step 7 in STL & SCL. 2001.

22. Романов В. П. Основы языка программирования step 7 и базового программного обеспечения промышленных контроллеров siemens. Учебно-методическое пособие Новокузнецк 2009г.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56



23. Деменков Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров: учеб. пособие / Н.П. Деменков; под ред. К.А.Пупкова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. 172 с.

24. Системное руководство Siemens SIMATIC S7-300 C79000-G7076-C233. М.: Фирма Siemens, 2003. 909 с.

25. Tips&Trics. SIMATIC S7-200 by Siemens. Версия 3.0 Вып. 10/1996.

Автоматизация и приводы, СА01 каталог продукции Siemens //СТА. 2006. №

26. Сафонов Е.В., Бромер К.А., Шульц А.О. особенности конструкции эффективных рекуператоров микрогазотурбинных энергоустановок. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.

27. Корытин А. М., Петров Н. К., Радимов С. Н., Шапарев Н. К.

Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для ВУЗов – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 432 с.

28. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 504 с.

29. Программируемый логический контроллер S7-300. Руководство по эксплуатации. [www.automation.siemens.com](http://www.automation.siemens.com). 15.12.2016г.

30. Эйлер Л. Интегральное исчисление. Том 1. — М.: ГИТТЛ. 1956г..

31. Бабенко К. И. Основы численного анализа. — М.: Наука. 1996.

32. Паутов А. С. Численное интегрирование стохастических функционально-дифференциальных уравнений методом Эйлера / А. С. Паутов // Известия Уральского государственного университета. 2005 № 38. — С. 104-121.

33. Феофанова В. А. Дифференциальные уравнения. Лекции, примеры и задачи : учебно-методическое пособие / В. А. Феофанова, В. И. Воротников ; М-во образования и науки РФ ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» Нижнетагильский технологический институт (филиал). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2015. – 128 с.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

34. Долгий Ю. Ф. Асимптотики характеристических показателей функционально-дифференциальных уравнений / Ю. Ф. Долгий // Известия Уральского государственного университета. — 2006. — № 46. — С. 50-59.

35. Новак Е. В. Интегральное исчисление и дифференциальные уравнения : учебное пособие / Е. В. Новак, Т. В. Рязанова, И. В. Новак ; [под общ. ред. Т. В. Рязановой] ; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2015. – 111 с.

36.

Смельчакова Г. А. Автоматизированная система оценки надежности управляющих вычислительных систем в условиях неопределенности относительно реального потока отказов / Г. А. Смельчакова, В. М. Антимиров // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления" : сборник докладов. — Екатеринбург : [УрФУ], 2015. — С. 32-39.

40. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. — СПб.: Профессия, 2007.

41. Бесекерский В.А., Попов Е.П. 4-е изд // Теория систем автоматического управления. — СПб.: Профессия, 2003.

42. Гудвин Г.К., Греббе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. — М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004.

43. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. — М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004.

44. Егоров, А. И. Основы теории управления: учеб. пособие. — М.: Физматлит, 2007.

45. Зубов, В. И. Лекции по теории управления: учеб. пособие. — СПб.: Лань, 2009.

46. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005.

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

47. Огвоздин, В. Ю. Управление качеством. Основы теории и практики: учеб. пособие. — М.: Дело и сервис, 2009.

48. Парахина В.Н. Практикум по теории управления: учеб. пособие. — М.: Финансы и статистика, 2009 (гриф УМО МО РФ).

49. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. — М.: Наука, 2006. — 333 с.

50. Васильев К. К. Теория автоматического управления (следящие системы): Учебное пособие.—2-е изд.— Ульяновск, 2001. — 98 с

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Листинг программы

### Описание блока компрессора

```
L      #Madd          #Madd
L      #Tcomp        #Tcomp
*D
T      #REZmul       #REZmul
NOP    0
```

```
L      #Mcomp        #Mcomp
L      #Tcput        #Tcput
*D
T      #REZmul2     #REZmul2
NOP    0
```

```
L      #gamma        #gamma
L      #R            #R
*D
T      #RG          #RG
NOP    0
```

```
L      #REZ         #REZ
L      #RG          #RG
*D
T      #REZRG      #REZRG
NOP    0
```

```
L      #REZRG      #REZRG
L      #Vcomp      #Vcomp
/D
T      #RV         #RV
NOP    0
```

```
L      #RV         #RV
L      #dK        #dK
*D
T      #RVK       #RVK
NOP    0
```

Продолжение приложения А

L #REZmul #REZmul  
 L #REZmul2 #REZmul2  
 +D  
 T #REZ #REZ  
 NOP 0

L #Madd #Madd  
 L #Mcomp #Mcomp  
 +D  
 T #summaM #summaM  
 NOP 0

L #summaM #summaM  
 L #Tcomp #Tcomp  
 \*D  
 T #multS #multS  
 NOP 0

L #gamma #gamma  
 L #REZ #REZ  
 \*D  
 T #GREZ #GREZ  
 NOP 0

L #multS #multS  
 L #GREZ #GREZ  
 +D  
 T #Ui #Ui  
 NOP 0

L #R #R  
 L #Tcomp #Tcomp  
 \*D  
 T #RTcomp #RTcomp  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #RTcomp #RTcomp  
 L #Ui #Ui  
 \*D  
 T #Yi #Yi  
 NOP 0

L #Yi #Yi  
 L #PVcomp #PVcomp  
 /D  
 T #Xi #Xi  
 NOP 0

L #dK #dK  
 L #Xi #Xi  
 \*D  
 T #dkXi #dkXi  
 NOP 0

L #dkXi #dkXi  
 L #Tk #Tk  
 +D  
 T #Tcompk\_1 #Tcompk\_1  
 NOP 0

L #Mpl #Mpl  
 L #Tplin #Tplin  
 \*D  
 T #RMpl #RMpl  
 NOP 0

L #Mthr #Mthr  
 L #Tpl #Tpl  
 \*D  
 T #TMpl #TMpl  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #RMpl #RMpl  
 L #TMpl #TMpl  
 +D  
 T #REZRTMpl #REZRTMpl  
 NOP 0

L #RG #RG  
 L #REZRTMpl #REZRTMpl  
 \*D  
 T #R00 #R00  
 NOP 0

L #R00 #R00  
 L #Vpl #Vpl  
 /D  
 T #RVpl #RVpl  
 NOP 0

L #dK #dK  
 L #RVpl #RVpl  
 \*D  
 T #RVK #RVK  
 NOP 0

L #Vplk #Vplk  
 L #RVK #RVK  
 +D  
 T #VK\_1 #VK\_1  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #REZRTMpl #REZRTMpl  
 L #gamma #gamma  
 \*D  
 T #Q #Q  
 NOP 0

L #TMpl #TMpl  
 L #Q #Q  
 +D  
 T #Qtm #Qtm  
 NOP 0

L #R #R  
 L #Qtm #Qtm  
 \*D  
 T #RQ #RQ  
 NOP 0

L #R #R  
 L #Qtm #Qtm  
 \*D  
 T #RQ #RQ  
 NOP 0

L #RQ #RQ  
 L #Tpl #Tpl  
 \*D  
 T #RTpl #RTpl  
 NOP 0



Продолжение приложения А

```

L      #RTpl      #RTpl
L      #PVpl      #PVpl
/D
T      #Q1        #Q1
NOP    0

L      #Ppl       #Ppl
L      #Vpl       #Vpl
*D
T      #PVpl      #PVpl
NOP    0

L      #dK        #dK
L      #Q1        #Q1
*D
T      #dkq1      #dkq1
NOP    0

L      #dkq1      #dkq1
L      #Tplk      #Tplk
+D
T      #TplK_1    #TplK_1
NOP    0

L      #Ttbin     #Ttbin
L      #Ttbout    #Ttbout
+D
T      #RTtb      #RTtb
NOP    0

L      #Tcput     #Tcput
L      #Tin       #Tin
+D
T      #REZTcpin  #REZTcpin
NOP    0

```

Продолжение приложения А

L #Cpt #Cpt  
 L #Mtb #Mtb  
 \*D  
 T #CM #CM  
 NOP 0

L #RTtb #RTtb  
 L #CM #CM  
 \*D  
 T #rtcm #rtcm  
 NOP 0

L #Mcomp #Mcomp  
 L #CPcomp #CPcomp  
 \*D  
 T #MCP #MCP  
 NOP 0

L #MCP #MCP  
 L #REZTcpin #REZTcpin  
 \*D  
 T #W #W  
 NOP 0

L #rtcm #rtcm  
 L #W #W  
 +D  
 T #WR #WR  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #I #I  
 L #N #N  
 \*D  
 T #NI #NI  
 NOP 0

L #NI #NI  
 L #WR #WR  
 /D  
 T #NIWR #NIWR  
 NOP 0

L #dK #dK  
 L #NIWR #NIWR  
 \*D  
 T #dKN #dKN  
 NOP 0

L #dKN #dKN  
 L #Nk #Nk  
 +D  
 T #Nk\_1 #Nk\_1  
 NOP 0

L #Mthr #Mthr  
 L #CPcomp #CPcomp  
 \*D  
 T #E #E  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #E #E  
 L #Tccin #Tccin  
 \*D  
 T #TccinE #TccinE  
 NOP 0

L #Cpt #Cpt  
 L #TccinE #TccinE  
 /D  
 T #O1 #O1  
 NOP 0

L #Mtb #Mtb  
 L #Ttbin #Ttbin  
 \*D  
 T #Ti #Ti  
 NOP 0

L #Power #Power  
 L #Cpt #Cpt  
 /D  
 T #W2 #W2  
 NOP 0

L #W2 #W2  
 L #O1 #O1  
 +D  
 T #W3 #W3  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #Ti #Ti  
 L #W3 #W3  
 -D  
 T #RtW #RtW  
 NOP 0

L #RG #RG  
 L #RtW #RtW  
 \*D  
 T #LR #LR  
 NOP 0

L #dK #dK  
 L #LRV #LRV  
 \*D  
 T #dkLVR #dkLVR  
 NOP 0

L #Mthr #Mthr  
 L #Mtb #Mtb  
 -D  
 T #RM #RM  
 NOP 0

L #RM #RM  
 L #Ttbin #Ttbin  
 \*D  
 T #RMTtb #RMTtb  
 NOP 0

Продолжение приложения А

L #RtW #RtW  
 L #gamma #gamma  
 \*D  
 T #Grw #Grw  
 NOP 0

L #Grw #Grw  
 L #RMTtb #RMTtb  
 -D  
 T #rezG #rezG  
 NOP 0

L #RTVR #RTVR  
 L #VPtbin #VPtbin  
 /D  
 T #REZVPtb #REZVPtb  
 NOP 0

L #rezG #rezG  
 L #RTtb #RTtb  
 \*D  
 T #RTVR #RTVR  
 NOP 0

L #Ptbin #Ptbin  
 L #Vcc #Vcc  
 \*D  
 T #VPtbin #VPtbin  
 NOP 0

Окончание приложения А

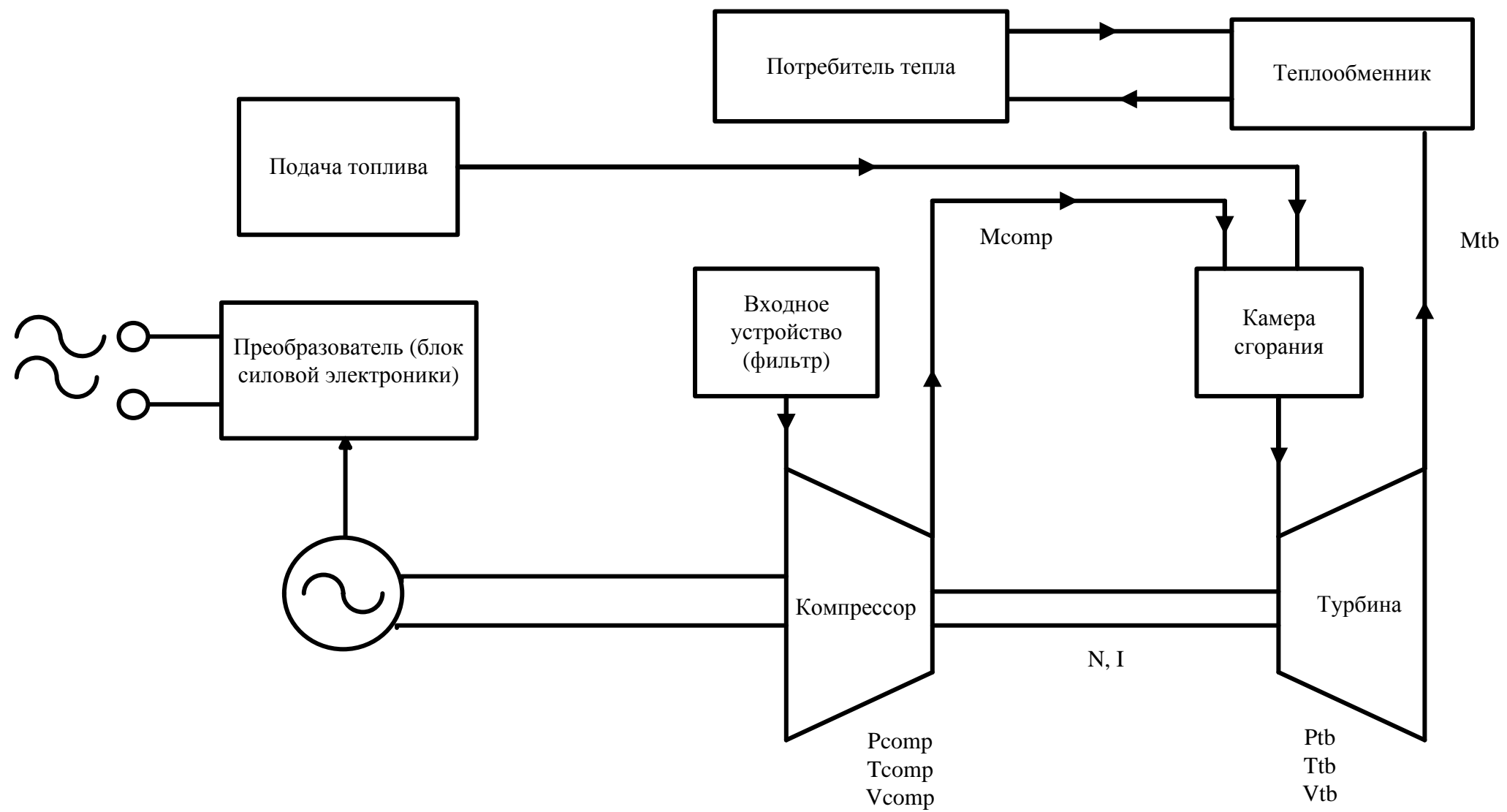
L #RTVR #RTVR  
L #VPtbin #VPtbin  
/D  
T #REZVPtb #REZVPtb  
NOP 0

L #MIG #MIG  
L #PtbinK #PtbinK  
+D  
T #PtBK\_1 #PtBK\_1  
NOP 0

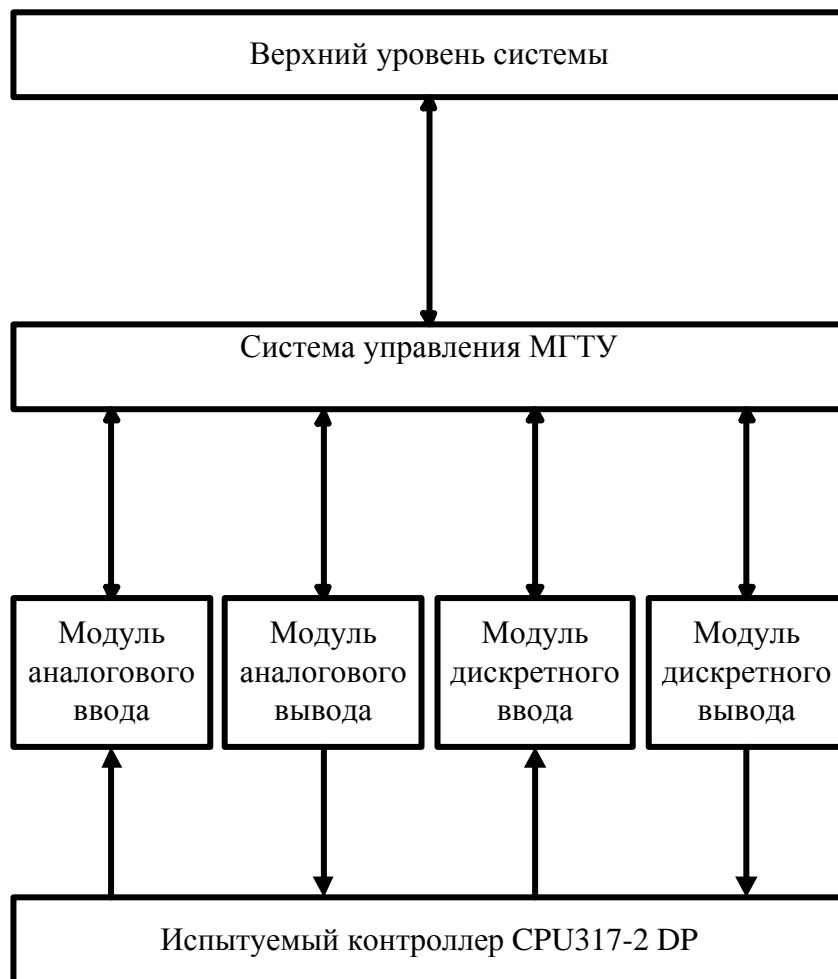
ПИЛОЖЕНИЕ Б  
Схемы и чертежи

					270304.2017.183 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

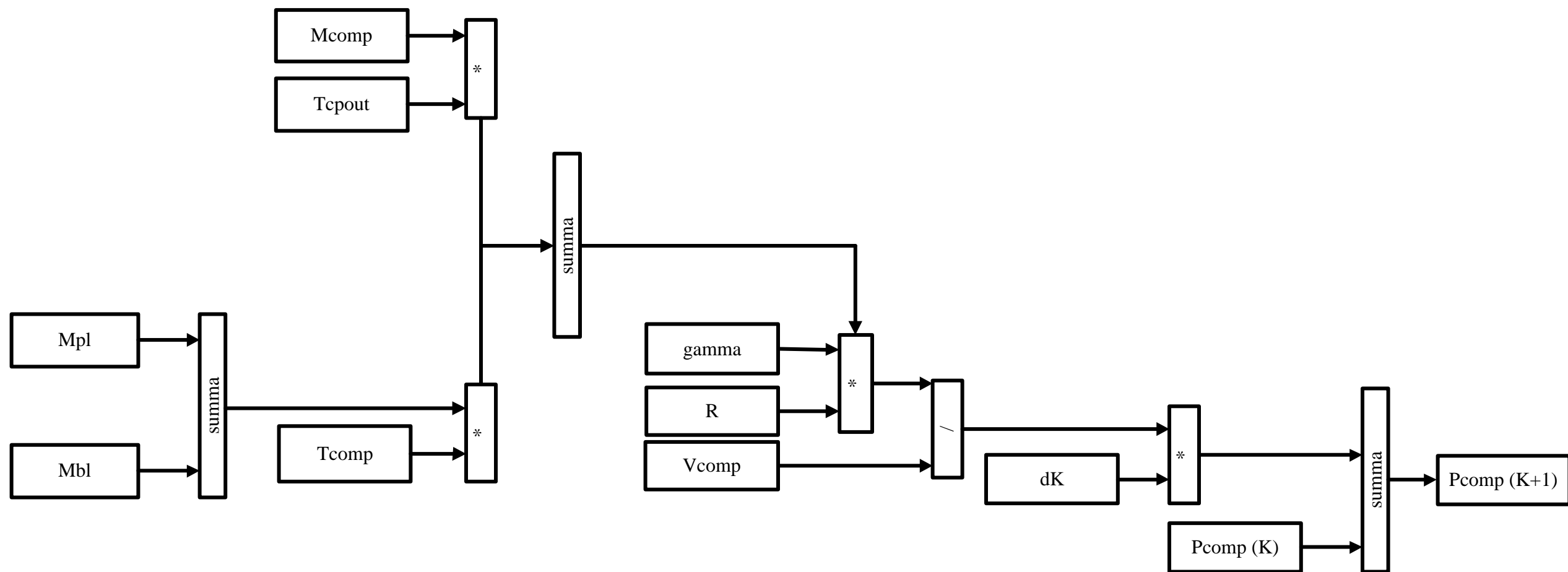




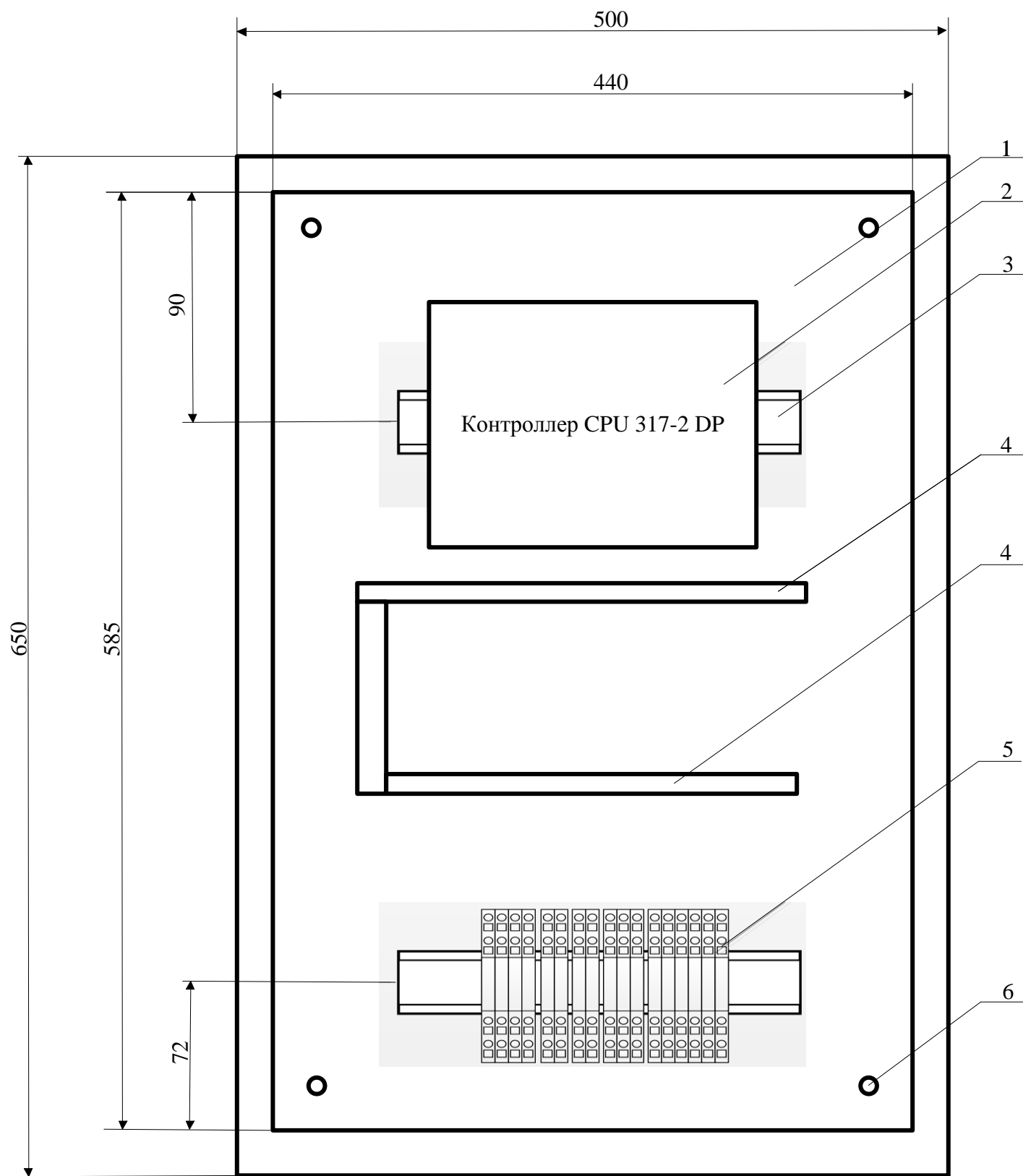
					<b>270304.2017.183.01.01 C1</b>			
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<b>Микрогазотурбинная установка</b>	<i>Литер</i>	<i>Масса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Разраб.</i>		Исламов А.Ф.						
<i>Пров.</i>		Канашев Е.А.						
<i>Т.контр</i>								
<i>Н.контр</i>		Абдуллин В.В.			<b>Схема структурная</b>	<i>Лист</i>		<i>Листов</i>
<i>Утв.</i>		Казаринов Л.С.				<b>ЮУрГУ (ниу)</b>		



					270304.2017.183.02.01.C1			
					Имитатор	Литер	Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Исламов А.Ф.						
Пров.		Канашев Е.А.						
Т.контр						Лист	Листов	
					Схема структурная	ЮУрГУ (ниу)		
Н.контр		Абдуллин В.В.						
Утв.		Казаринов Л.С.						



					270304.2017.183.03.01.C2			
					<b>Расчет параметра <math>P_{comp}</math></b>	Литер	Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Исламов А.Ф.						
Пров.		Канашев Е.А.						
Т.контр								
					<b>Схема функциональная</b>	Лист		Листов
Н.контр		Абдуллин В.В.				<b>ЮУрГУ (ниу)</b>		
Утв.		Казаринов Л.С.						



формат	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Пример
			Документация		
		270304.2017.183.04.01.В06	Вид общий		
A3	1	270304.2017.183.04.01.В06	Монтажная панель	1	
A3	2	270304.2017.183.04.01.В06	Контроллер	1	
A3	3	270304.2017.183.04.01.В06	Монтажная рейка	2	
A3	4	270304.2017.183.04.01.В06	Кабельканал	3	
A3	5	270304.2017.183.04.01.В06	Клемная колодка	1	
A3	6	270304.2017.183.04.01.В06	Крепежное отверстие	4	

					<b>270304.2017.183.04.01.В06</b>			
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<b>Шкаф управления</b>	Литер	Масса	Масштаб
Разраб.		Исламов А.Ф.						
Пров.		Канашев Е.А.						
Т.контр						Лист	Листов	
Н.контр		Абдуллин В.В.						
Утв.		Казаринов Л.С.			<b>Вид общий</b>	<b>ЮУрГУ (ниу)</b>		