Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА АВТОМАТИКИ

ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:

«МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВКИ АММИАКА В ПЕРВЫЙ КОНТУР РЕАКТОРА ВВЭР-1000»

Направление подготовки

14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Студент группы М22-165: Хошимжонов Хуршидбек

Руководитель: Толоконский Андрей Олегович _____

Оценка:_____

г. Москва

2024

РЕФЕРАТ

Объём пояснительной записки 65 страниц, рисунков 41, таблиц 4, источников 8.

АСУТП, MATLAB, SIMULINK, MWBRIDGE, DISPLAY

Цель работы: разработка и исследование модели системы управления регулятора ТВС-01 концентрация аммиака ВВЭР-1000.

В рамках работы была осуществлена реализация модели объекта управления в системе реального времени, а также реализована система управления в Matlab Simulink и в системе MWBridge. Предмет разработки: система управления поддержания заданного технологического параметра в контуре регулирования реактора ВВЭР-1000.

Назначение: выполнение заданной программы моделирования состояния регулятора ТВС-01 концентрация аммиака в теплоносителе. Регулируемый параметр – концентрация аммиака для поддержания концентрации водорода в теплоносителе.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ....4
ВВЕДЕНИЕ....5
Основные технические системы первого контура реактора ВВЭР-1000 и водно-химический режим 9
1.1 Технологическая схема первого контура АЭС с реакторами ВВЭР 9
1.2 Водно-химический режим первого контура....10
Характеристика диагностических показателей....27
1.3 Спецводоочистка. Системы поддержания ВХР первого контура. СВО-2....30
Математическая модель объекта управления....38
2.1 Контуры автоматического регулирования систем....38
2.2 Технологические контуры атомных станций....40
2.3 Постановка задачи 44
2.4 Система химреагентов ТВ20. Структурная схема регулирования аммиака в теплоносителе 45
2.5 Объект управления. Насос-дозатор НД 0,5 Э 100/10....51
2.6 Представление объекта управления в виде разностных уравнений....55
Моделирование процессов в объекте управления в среде Matlab Simulink....57
3.1 Моделирование в среде Simulink....57
Модель регулирования в реальном времени в среде MWBridge....64
4.1 **Программа MikBASIC базы данных реального времени MWBridge**....64
4.2 Синтез регулятора в среде программирования АлгоВУ 67
4.3 Настройка и исследование влияния регулятора на качество регулирования....71
4.4 Человеко-машинный интерфейс....74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 83

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЗ	–	аварийная защита
АРМР	–	автоматический регулятор мощности реактора
АСУ ТП	–	автоматизированная система управления технологическими процессами
АЭС	–	атомная электростанция
БН	–	ректор на быстрых нейтронах
БРУ-А	–	быстродействующие редукционные установки
ВВЭР	–	водо-водяной энергетический реактор
ГПК	–	главный предохранительный клапан
РО	–	регулирующий орган
ГЦН	–	главный циркуляционный насос
ГЦТ	–	главный циркуляционный трубопровод
ИМ	–	исполнительный механизм
ИПУ	–	импульсно-предохранительные устройства
КД	–	компенсатор давления
ОУ	–	объект управления
ПГ	–	Парогенератор
ПТК	–	программно-технический комплекс
РБМК	–	реактор на тепловых нейтронах
РУ	–	реакторная установка
САПР	–	система автоматизированного проектирования
СВБУ	–	система верхнего блочного уровня
СКУ НЭ	–	система контроля и управления нормальной эксплуатации
СКУ РО	–	система контроля и управления реакторного отделения
ТП	–	технологический процесс

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая отрасль уже многие десятилетия является базовой отраслью российской экономики, ее развитием в том числе активно занялись и другие страны. В начале XX века развитие отрасли было напрямую связано с ископаемыми ресурсами, которыми обладает та или иная страна. С открытием мирного атома стало очевидно, что энергетика, основанная на углеводородах, скоро исчерпает свои возможности. В настоящее время мы наблюдаем начало стремительного роста атомной энергетики как в России, так и в других странах мира. Это обусловлено как минимум тремя важными факторами:

1. Атомная энергетика подтвердила своё лидерство с точки зрения экологической безопасности, значительно превосходя другие основные источники энергии.

2. Применение новых технологий в атомной энергетике делает предоставляемые услуги более экономичными, безопасными и менее ресурсоемкими.

3. Существует растущая потребность в новых, более эффективных источниках энергии.

Главной причиной возникновения и стремительного развития атомной энергетики является её значительно превосходящий органическое топливо энергетический эквивалент, основанный на цепной реакции деления. Для получения энергии в размере 1 МВт/сут требуется всего 1.2 г делящегося изотопа урана-235. Если сравнить энергетические показатели органического и ядерного топлива, становится ясно, что несколько граммов урана-235 примерно эквивалентны одной тонне нефти. Точнее говоря, 4 г изотопа урана-235 дают такое же количество энергии, как и 1 т нефти!

Таким образом, мирный атом предлагает уникальные преимущества перед традиционными углеводородными источниками энергии. Это делает его ключевым игроком в обеспечении будущих энергетических потребностей, обеспечивая

экологическую чистоту, экономичность и эффективность использования ресурсов. В этом контексте развитие атомной энергетики представляется не просто перспективным направлением, но и необходимостью для устойчивого развития глобальной энергетической системы.

Ещё одной важной причиной, способствующей развитию атомной энергетики, является ограниченность и невозобновляемость ресурсов органического топлива. Учитывая современные темпы энергопотребления, запасы нефти, угля и природного газа могут исчерпаться через 50—200 лет, согласно различным прогнозам. В то же время ресурсы урана, включая как уран-235, так и уран-238 при условии создания замкнутого топливного цикла, могут обеспечить человечество энергией на 10 000 лет.

Кроме того, на Земле имеются значительные запасы тория. Объемы ториевых ресурсов, по оценкам, сопоставимы с запасами урана, а в некоторых случаях могут даже превышать их в несколько раз. Торий также может быть использован в ядерной энергетике, что дополнительно увеличивает потенциал атомной энергетики как долгосрочного источника энергии.

Таким образом, в условиях ограниченных и исчерпаемых запасов органического топлива, уран и торий представляют собой практически неисчерпаемые ресурсы. Это делает атомную энергетику особенно привлекательной с точки зрения устойчивого развития и долгосрочного обеспечения глобальных энергетических потребностей.

Ядерный реактор впервые был создан еще в 1942 г., при этом коммерческое использование его энергии началось лишь в 1950-х годах.

Существует несколько разновидностей реакторов, вот некоторые из них:

1. РБМК – реактор на тепловых нейтронах, водографитовый;
2. ВВЭР – реактор на тепловых нейтронах корпусного типа;

3. БН – ректор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим натриевым теплоносителем.

Разнообразные типы реакторов представляют собой различные подходы к производству энергии. Один из самых распространенных в мире и в России - это ВВЭР-1000.

ВВЭР-1000 представляет собой водо-водяной реактор корпусного типа, который является главным компонентом атомной электростанции (АЭС), где происходит цепная реакция и генерируется энергия. Этот реактор работает на тепловых нейтронах с использованием воды в качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов (вода под давлением).

При разработке и создании корпусов ВВЭР-1000 основное внимание уделяется обеспечению долговечной и надежной эксплуатации реактора на протяжении нескольких десятилетий. Корпус реактора работает в условиях высокого давления и температуры теплоносителя, интенсивного радиационного излучения и высокой скорости течения теплоносителя, что создает агрессивную среду даже для высококачественных конструкционных материалов.

ВВЭР-1000 состоит из различных систем и оборудования, предназначенных для обеспечения нормальной эксплуатации. К ним относятся главный циркуляционный контур и система компенсации давления, система управления и защиты, система контроля и диагностики, система радиационной защиты, система контроля герметичности оболочек ТВЭЛов, система диагностики и транспортно-технологическое оборудование для перегрузки топлива.

Для обеспечения безопасности и надежности работы атомных электростанций используются различные технологические решения, включая использование аммиака для уменьшения коррозии. Регулирующая система, рассматриваемая в данной работе, находится в системе внешнего водяного охлаждения (СВО-2). Поддержание определенной концентрации аммиака помогает

снизить скорость коррозии конструкционных материалов и минимизировать поступление продуктов коррозии в теплоноситель.

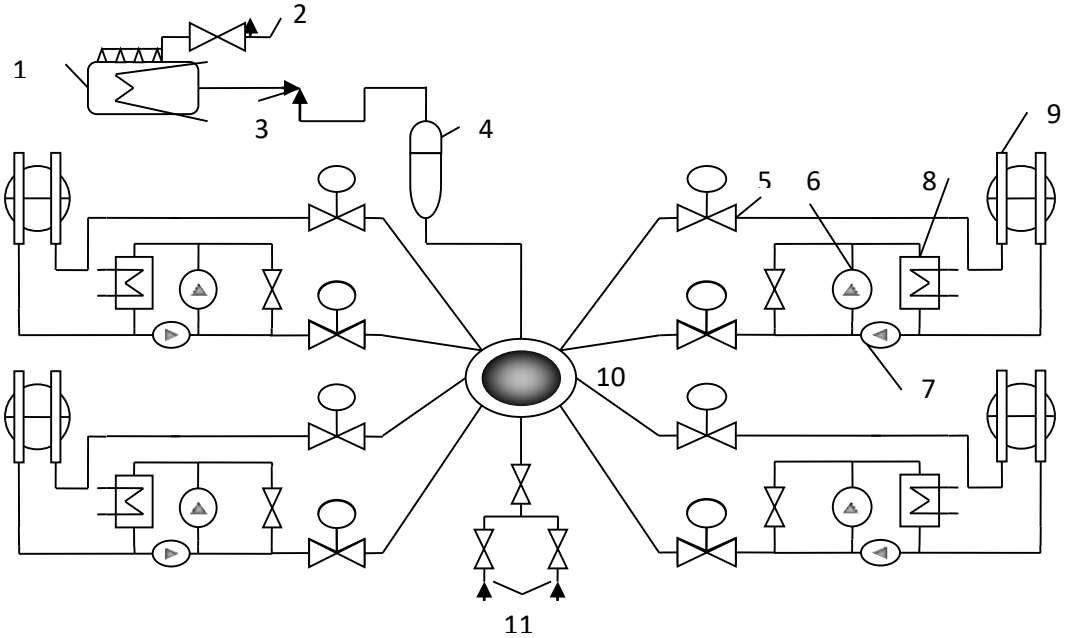
Глава 1

Основные технические системы первого контура реактора ВВЭР-1000 и водно-химический режим

1.1 Технологическая схема первого контура АЭС с реакторами ВВЭР

При анализе технологической схемы первого контура можно заметить, что она разделена на несколько отдельных циркуляционных контуров, или петель. Это позволяет отключать любой из контуров для проведения ремонтных работ на работающем реакторе (см. рисунок 1).

Каждая из четырех циркуляционных петель (на реакторе ВВЭР-440 их количество увеличено до шести) включает в себя ряд основных компонентов. Среди них главный циркуляционный насос (ГЦН) 7, горизонтальный парогенератор 9, две главные запорные задвижки 5 с электроприводами, паровой компенсатор давления 4 (объема) с электроподогревателем и, конечно же, сам



реактор 10 с системой подачи подпиточной воды.

Рисунок 1 - Схема первого контура АЭС с реактором ВВЭР-1000

1 – барботажный бак;

2 – предохранительный клапан;

3 – регулятор;

4 – компенсатор

давления;

5 – главная запорная задвижка;

6 – вспомогательный насос;

7 – ГЦН;

8 – теплообменник контура охлаждения подшипника ГЦН;

9 – парогенератор;

10 – реактор;

11 – вход для подпиточной воды в реактор.

1.2 Водно-химический режим первого контура

Особенностью первого контура является возможное накопление продуктов коррозии на поверхности ТВЭЛов. Это не только ухудшает теплоотвод и может привести к разрушению оболочек ТВЭЛов, но и активирует отложения, которые, скапливаясь на отдельных участках внутренних поверхностей контура, затрудняют проведение ремонтных работ, ухудшая радиационную обстановку.

Водно-химический режим (ВХР) первого контура должен соответствовать следующим требованиям:

1) Минимизация скорости коррозии конструкционных материалов первого контура;

2) Минимизация образования отложений продуктов коррозии на ТВЭЛах, поверхности парогенераторов и другом оборудовании контура;

3) Подавление образования продуктов радиолиза теплоносителя при работе энергоблока;

4) Минимизация количества радиоактивных отходов;

5) Минимизация влияния отложений на реактивность активной зоны.

Важным аспектом, определяющим организацию водного режима первого контура реакторов ВВЭР, является применение борного регулирования. Жидкий поглотитель бора помогает снизить неравномерность тепловыделения в активной зоне, что позволяет повышать ее мощность при сохранении тех же габаритных размеров. При этом медленные эффекты реактивности компенсируются благодаря равномерному распределению бора в воде, а быстрые эффекты управляются стержнями системы управления и защиты реактора.

Для регулирования реактивности используется борная кислота, которая обладает рядом преимуществ в реакторных условиях, таких как химическая стойкость, хорошая растворимость в воде и образование растворимых соединений с катионами воды реактора. Однако существуют и некоторые недостатки:

- Понижение pH реакторной воды;

- Затруднение очистки воды реакторов от хлоридов;

- Повышение удельной электрической проводимости воды и невозможность использования кислорода для пассивации конструкционных материалов.

На практике концентрация борной кислоты в первом контуре может поддерживаться в пределах от 8 до 13,5 г/кг при работе реактора на мощности и до 18 г/л для отравления реактора при остановках на перегрузку топлива или при ремонтах оборудования. Введение таких больших количеств борной кислоты усиливает коррозионную агрессивность теплоносителя, что требует коррекции водного режима с применением ингибиторов коррозии.

При выборе щелочи в качестве корректирующей добавки учитывается их агрессивность к циркониевым сплавам. По этому свойству щелочи можно расположить в следующем порядке: LiOH > NaOH > KOH >> NH4OH. Из этого

следует, что аммиачный режим является наиболее безопасным в отношении агрессивности к оболочкам ТВЭЛов из сплавов циркония. Однако аммиак, используемый в качестве регулятора pH теплоносителя, имеет ряд недостатков и не может корректировать pH при высоких температурах.

Использование NaOH отпадает из-за сильной активации нейтронами в реакторе и образования радиоактивного изотопа 23Na

$$^{23}_{11}\mathrm{Na} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na} + \gamma$$

и увеличением активности теплоносителя за счет распада сравнительно короткоживущего изотопа $^{24}_{11}Na$ с периодом полураспада 15 часов, который излучает высокоэнергетические γ-кванты..

При использовании LiOH изотоп 6Li, содержащийся в естественном литии в количестве 7,5%, образует тритий по соответствующей реакции:

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H}$$

а получение LiOH без изотопа $^{6}_{3}\mathrm{Li}$ делает LiOH дорогостоящим реагентом.

Калий также подвергается активации нейтронами, что приводит к образованию радиоактивного изотопа 42K:

$$^{41}_{19}\mathrm{K} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{42}_{19}\mathrm{K} + \gamma$$

с периодом полураспада 12,4 часа. Однако содержание изотопа 41K в природной смеси составляет менее 6,9%, что означает, что его вклад в общую радиоактивность теплоносителя невелик.

Итак, можно выделить ряд преимуществ КОН, из-за которых выбор остановился именно на этом основании. Преимущества КОН включают:

- Небольшой вклад в общую активность.

- Отсутствие образования труднорастворимых соединений с типичными примесями реакторной воды.

- Отсутствие накопления в отложениях.

- Эффективный вывод на фильтрах байпасной очистки теплоносителя.

Однако при дозировании КОН в контур необходимо учитывать поступление в теплоноситель других щелочных ионов, таких как Li+, который образуется в активной зоне реактора при облучении бора нейтронами

$$({}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\mathrm{He});$$

Из-за поступления Na+ в первый контур с подпиточной водой и корректирующими добавками, нормирование проводится не только по концентрации ионов К+, а также по суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов, включая калий, натрий и литий.

Расчет суммарной щелочности выполняется согласно следующей формуле:

$$\sum \text{Щ} = \frac{(\mathrm{K})}{39} + \frac{(\mathrm{Li})}{7} + \frac{(\mathrm{Na})}{23} \quad \text{ммоль/дм}^3,$$

где концентрация калия (K), лития (Li) и натрия (Na) в реакторе составляет, соответственно, мг/дм³, при этом атомные массы составляют 39, 7 и 23 единицы. При повышенной температуре в реакторе основным средством нейтрализации является гидроксид калия. Использование аммиака при низких температурах усиливает его основные свойства, обеспечивая необходимое значение pH теплоносителя без необходимости дополнительного увеличения концентрации калия.

В первом контуре реакторов с водой под давлением применяется режим водно-химической обработки с использованием аммиачно-калиевого состава, при этом реактивность реактора контролируется с использованием бора. Помимо поддержания оптимального уровня pH теплоносителя, дозирование аммиака выполняется для подавления радиолиза воды, который происходит через соответствующую реакцию:

$$2\mathrm{H_2O} \leftrightarrow 2\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2},$$

Вследствие термического распада аммиака при повышенной температуре и активности образуется водород в результате реакции:

$$2NH_3 \leftrightarrow N_2 + 3H_2$$

Возникающий водород не только смещает равновесие реакции радиолиза влево, но также может активно участвовать в ходе этой реакции:

$$2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$$

Для поддержания оптимального уровня концентрации водорода в диапазоне от 2,2 до 4,5 мг/дм³ необходимо регулировать концентрацию аммиака.

Водно-химический режим (ВХР) первого контура ВВЭР-1000 является коррекционным, где в качестве корректирующих добавок в теплоноситель вводятся борная кислота H3BO3, гидроокись калия KOH, или гидроксид лития LiOH (на зарубежных реакторах PWR), а также аммиак и гидразин-гидрат N2H4·2H2O.

Бор, добавленный в виде борной кислоты, используется для мягкой коррекции реактивности реактора.

Борная кислота представляет собой стабильное соединение, устойчивое к воздействию радиации и не подверженное разложению при высоких температурах. Она легко растворяется в воде, не вызывает образования отложений и шлама, а в присутствии щелочей действует как ингибитор коррозии. Концентрация борной кислоты регулируется в зависимости от запаса реактивности в активной зоне реактора.

Ввод борной кислоты напрямую в теплоноситель вызывает значительное понижение уровня pH, что требует коррекции водно-химического режима с применением подщелачивания. Для нейтрализации борной кислоты в контур циркуляции теплоносителя добавляется раствор едкого калия.

Действие ионизирующего излучения на воду первого контура реактора ВВЭР-1000 порождает разнообразные радиационно-химические процессы,

которые значительно изменяют состав используемых в качестве теплоносителя воды и растворов. Уникальные условия в данном контуре способствуют образованию коррозионно-активных промежуточных радикалов, таких как H·, OH·, eaq, а также различных коррозионно-активных молекулярных продуктов как H_2, O_2 и H_2O_2.

Радиолиз воды замедляется в присутствии водорода (когда его концентрация превышает 5 нмл/дм³). Именно поэтому для подавления радиолиза в теплоносителе необходимо поддерживать высокий уровень концентрации водорода. Для этого в теплоноситель добавляется аммиак, который разлагается в реакторе, образуя водород и азот по следующей реакции::

$$2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2.$$

При работе реактора на высокой мощности под воздействием нейтронов в теплоносителе происходят ряд ядерных реакций, в результате которых образуются изотопы кислорода, азота, натрия и лития. Эти изотопы оказывают значительное влияние на управление водно-химическим режимом первого контура.

Особое внимание следует уделить изотопу лития 7Li, который образуется в результате реакции 10B(n, α)7Li. Он существенно влияет на водно-химический режим первого контура. При длительной эксплуатации реактора на высокой мощности содержание лития в теплоносителе возрастает до высоких концентраций, достигая до 1,0 мг/дм³, что требует особого учета при управлении водно-химическим режимом.

Значение pH в широком диапазоне существенно не влияет на скорость коррозии хромникелевых сталей, если отсутствуют агенты, активирующие коррозию. Однако, при снижении pH до 3,0 и ниже, скорость коррозии хромникелевых сталей, используемых в оборудовании первого контура, значительно возрастает.

Нормирование показателей качества теплоносителя обусловлено следующими факторами:

1. Поддержание pH : Удержание pH в установленных пределах снижает скорость коррозии конструкционных материалов и уменьшает попадание продуктов коррозии в теплоноситель. Нижний предел pH (5,9) устанавливается для предотвращения высокой скорости коррозии металла основного оборудования, а верхний предел (10,3) - для минимизации риска коррозионного растрескивания циркониевых сплавов оболочек ТВЭЛов.

2. Хлоридные и фторидные соединения : Эти соединения поступают в первый контур в основном с подпиточной водой и оказывают негативное коррозионное воздействие на конструкционные материалы реакторной установки. Концентрация хлоридов и фторидов должна поддерживаться в нормированных пределах (не более 0,1 мг/дм^3) с помощью использования реагентов высокой степени чистоты и фильтров СВО-2.

3. Свободный кислород : Накопление свободного кислорода в теплоносителе происходит в результате радиолиза воды и его поступления с подпиточной водой. Концентрация кислорода должна поддерживаться в пределах норм (не более 0,005 мг/дм^3) с помощью деаэраторов или связывания избыточного кислорода гидразингидратом, вводимым в подпиточную воду.

4. Водород : Водород необходим в теплоносителе первого контура для подавления радиолиза воды. Концентрация водорода в пределах 2,7-5,4 мг/дм^3 (30-60 нмл/дм^3) практически полностью подавляет радиолиз контурной воды. Верхний предел концентрации водорода (5,4 мг/дм^3) ограничен из-за риска водородного охрупчивания циркониевых сплавов.

5. Борная кислота : Используется в качестве поглотителя нейтронов. Её концентрация зависит от состояния активной зоны и регулируется в зависимости от запаса реактивности активной зоны.

6. Ионы щелочных металлов : Суммарная концентрация этих ионов регулируется введением гидроокиси калия в контур в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе.

7. Аммиак : Является основным источником водорода в теплоносителе первого контура. Концентрация аммиака поддерживается на уровне, обеспечивающем безопасную концентрацию водорода (2,2-4,5 мг/дм³ или 25-30 нмл/дм³). Верхний предел концентрации аммиака должен определяться верхним пределом концентрации водорода в теплоносителе.

Нормы качества теплоносителя в "горячем" состоянии энергоблока ВВЭР-1000 или при минимально контролируемом уровне мощности реактора представлены в таблице 1.

Существует три вида водно-химических режимов:

1. Нейтральный (бескоррекционный) – со значением pH теплоносителя в пределах 5,0–7,5.

- Достоинства : Простота ведения данного режима. В атомных реакторах, полностью изготовленных из нержавеющей стали, допустимо использование растворов борной кислоты без дополнительной регулировки, так как скорости коррозии нержавеющих сталей при pH 5–10 изменяются незначительно.

- Недостатки :

1. Усиление переноса продуктов коррозии по контуру при низких значениях pH.

2. Значительное загрязнение участков контура радиоактивными продуктами коррозии.

- Заключение : Для уменьшения переноса продуктов коррозии предпочтительно частично нейтрализовать влияние борной кислоты в контуре.

2. Сильнощелочной – со значением pH теплоносителя более 10,0, поддерживается за счет сильного основания.

- Достоинства :

1. При высоких значениях pH значительно замедляется скорость коррозии сталей при их взаимодействии с горячей водой, что уменьшает скорость накопления водорода в контурной воде. Например, при аммиачном водном режиме скорость коррозии углеродистой стали может достигать 5-7 мг/м²·ч, тогда как при применении едкой щёлочи она может снижаться до 1,5–2,0 мг/м²·ч.

2. С ростом температуры значительно увеличивается растворимость магнетита, что уменьшает отложения на наиболее горячих участках контура, таких как оболочки ТВЭЛов.

- Недостатки :

- Возможное концентрирование нелетучей щёлочи на некоторых участках контура, особенно в активной зоне реактора (например, при наличии поверхностного кипения), что может приводить к коррозионному растрескиванию ответственных конструкций.

3. Слабощелочной (аммиачный) – со значением pH теплоносителя в пределах 8,5–10,0, поддерживается за счет аммиака.

- Достоинства :

- Этот режим позволяет поддерживать pH на уровне, который снижает коррозионную активность и предотвращает образование отложений.

- Недостатки :

- Требует постоянного контроля и регулировки концентрации аммиака для поддержания стабильного pH.

Каждый из этих водно-химических режимов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного режима зависит от условий эксплуатации и требований к работе реактора.

Однако аммиак, как регулятор pH теплоносителя, имеет существенный недостаток. При повышении температуры теплоносителя его основные свойства ослабевают, что связано со снижением степени диссоциации молекул при данной концентрации (см. рис. 2).

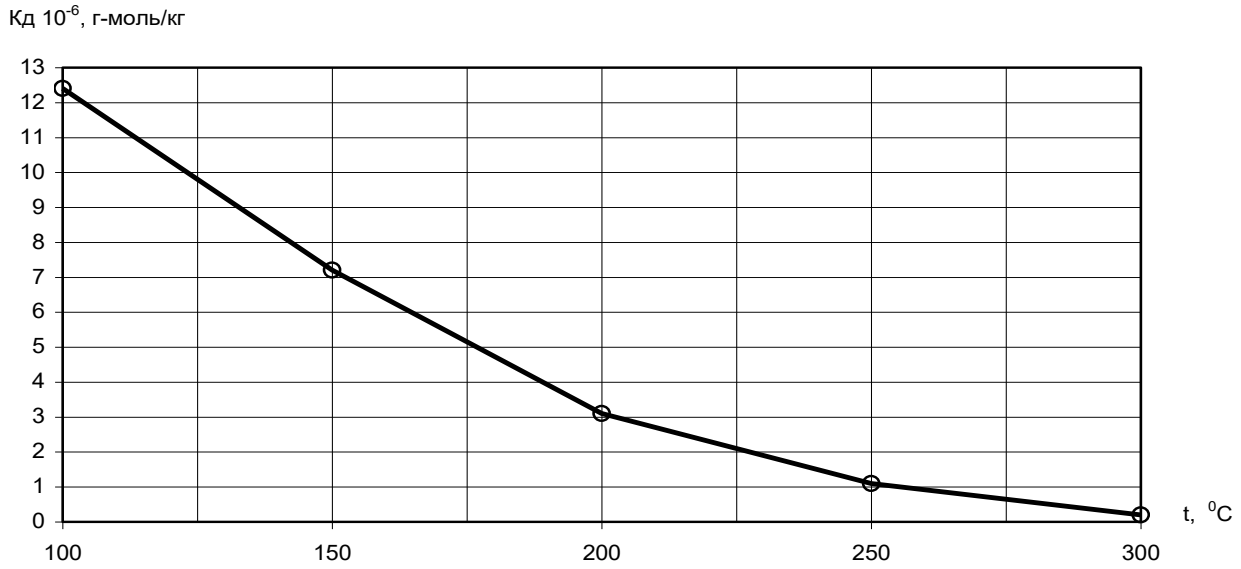


Рисунок 2 - Зависимость константы диссоциации аммиака от температуры

Для достижения требуемого уровня pH при эксплуатации реактора на мощности необходимо использовать очень высокие концентрации аммиака, достигающие до 0,1 г/дм³ и более. Такие концентрации практически невозможно обеспечить в реальных условиях. Помимо этого, повышение температуры теплоносителя приводит к увеличению равновесной концентрации водорода, обусловленной радиолитическим разложением аммиака:

$$2NH_3 \leftrightarrow N_2 + 3H_2,$$

Увеличение концентрации водорода представляет опасность, так как может привести к радиационно-водородному охрупчиванию корпусной стали, что негативно сказывается на её прочности и долговечности.

Чтобы эффективно управлять водно-химическим режимом первого контура, на атомных электростанциях используется комбинированный подход. В этом подходе сочетаются сильнощелочной и аммиачный режимы. Это позволяет воспользоваться преимуществами каждого из этих режимов и нивелировать их недостатки. Сильнощелочной режим обеспечивает снижение скорости коррозии материалов и уменьшает накопление водорода, тогда как аммиачный режим позволяет более гибко регулировать pH теплоносителя. Таким образом, комбинация этих режимов обеспечивает оптимальные условия для работы реактора, повышая его безопасность и надежность.

Таблица 1 - Нормы качества теплоносителя

Нормируемые показатели				
Наименование показателей	Диапазон допускаемых значений	Отклонения от допускаемых значений		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Массовая концентрация хлорид-иона, мг/дм^3	не более 0,1	-	0,1 - 0,2	более 0,2
Массовая концентрация фторид-иона, мг/дм^3	не более 0,1	-	0,1 - 0,2	более 0,2
Массовая концентрация	не более 0,005	0,005 - 0,02	0,02 - 0,1	более 0,1

растворенного кислорода, мг/дм^3				
Массовая концентрация растворенного водорода, мг/дм^3	от 2,2 до 4,5	от 4,5 до 7,2 или менее 2,2 до 1,3	более 7,2 до 9,0 или менее 1,3 до 0,5	более 9,0 или менее 0,5
Суммарная молярная концентрация ионов щелочных металлов (K, Li, Na) в зависимости от текущей концентрации борной кислоты, моль/дм^3	Зона А	Зоны Б и В	Зоны Г и Д	Зона Е

Диагностические показатели

Наименование показателей	Контрольные уровни
Водородный показатель pH, единиц	от 5,8 до10,3
Массовая концентрация аммиака, мг/дм^3	не менее 3,0
Массовая концентрация железа, мг/дм^3	не более 0,05
Массовая концентрация меди*), мг/дм^3	не более 0,02
Массовая концентрация нитрат-иона, мг/дм^3	не более 0,2
Массовая концентрация сульфат-ионов, мг/дм^3	не более 0,2
Массовая концентрация общего органического углерода), мг/дм^3	не более 0,5

Характеристика нормируемых показателей

Концентрация хлоридов и фторидов

Из всех растворенных минеральных примесей хлоридные и фторидные ионы представляют наибольшую опасность, так как они являются сильнейшими активаторами коррозионных процессов. Основным источником загрязнения воды первого контура фторид-ионами являются вновь устанавливаемые ТВС (тепловыделяющие сборки), которые в процессе изготовления обрабатываются плавиковой кислотой, а также подпиточная вода. Хлоридные ионы поступают преимущественно с подпиточной водой и содержатся во всех реагентах, вводимых в первый контур.

Хлоридные и фторидные ионы препятствуют образованию защитной пленки на поверхностях металлов и значительно увеличивают скорость коррозии почти всех металлов. В сочетании с кислородом даже небольшие концентрации хлоридов и фторидов могут вызывать коррозионное растрескивание аустенитных сталей и язвенную коррозию циркония. Исследования показали, что при концентрации хлорид- и фторид-ионов менее 0,1 мг/дм³ эти ионы практически не влияют на стойкость конструкционных материалов. Однако, дальнейшее повышение концентрации этих ионов увеличивает пористость защитных пленок и снижает их защитные свойства

Концентрация фторид-ионов строго контролируется в течение первых 1000 часов работы реактора после перегрузки активной зоны, чтобы минимизировать их влияние на коррозионные процессы.

Кислород

Кислород при определённых условиях выступает как активный интенсификатор скорости коррозии аустенитных нержавеющих сталей, находящихся под напряжением, и циркониевых сплавов. Наличие кислорода в системе может значительно ускорить коррозионные процессы, что требует строгого контроля его концентрации в теплоносителе. Поддержание низкой

концентрации кислорода в воде первого контура является критически важным для предотвращения коррозии и обеспечения долгосрочной надёжности оборудования реактора.

Кислород в первом контуре

Кислород попадает в первый контур с подпиточной водой в случае ухудшения или отсутствия термической деаэрации потоков, а также образуется в результате радиолиза воды. Роль кислорода в коррозионных процессах является достаточно противоречивой. С одной стороны, он действует как активный деполяризатор, усиливая коррозию металлов. С другой стороны, кислород вступает в реакцию с металлами, образуя защитные окисные пленки.

При увеличении толщины окисной пленки возникают внутренние напряжения из-за разницы плотности металла и пленки, что может привести к потере целостности пленок и снижению их защитных свойств. Кислород также действует как деполяризатор в электрохимической коррозии, поэтому концентрация кислорода в теплоносителе первого контура строго нормируется.

Для удаления кислорода из подпиточной воды используется термическая деаэрация и дозирование гидразина в первый контур для создания его концентрации в 2-3 раза выше, чем концентрация кислорода. Химическое обескислороживание происходит за счёт реакции кислорода с гидразином.

$$O_2 + N_2H_4 = N_2 + 2H_2O$$

Избыток гидразина разлагается по реакциям:

$$3N_2H_4 \rightarrow 4NH_3 + N_2,$$
$$3N_2H_4 \rightarrow 2NH_3 + 3H_2 + 2N_2$$

При введении гидразина в первый контур, он реагирует с гидроксидами железа по реакциям:

$$4Fe(OH)_3 + N_2H_4 \rightarrow 4Fe(OH)_2 + 4H_2O + N_2,$$
$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$$

Гидразин также взаимодействует с продуктами коррозии конструкционных материалов контура по реакциям:

$$6Fe_2O_3 + N_2H_4 \rightarrow 4Fe_2O_4 + 2H_2O + N_2,$$
$$2Cu_2O + N_2H_4 \rightarrow 4Cu + 2H_2O + N_2,$$
$$2CuO + N_2H_4 \rightarrow 2Cu + 2H_2O + N_2$$

Взаимодействие азота и кислорода в первом контуре

Как отмечается, многие реакции в первом контуре приводят к образованию азота в качестве одного из продуктов. При наличии как кислорода, так и азота в воде первого контура возникает ряд химических реакций.

Источники азота включают:

- Разложение аммиака и гидразина;

- Перенос из компенсаторов объема в первый контур.

При отсутствии кислорода, когда радиолиз воды подавлен, присутствие азота приводит к образованию аммиака, так как водород всегда присутствует в результате радиолиза воды и химических добавок.

Процесс взаимодействия азота с радиолитическими газами в присутствии кислорода можно представить в виде следующей цепочки реакций:

$$N_2 + 3H_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4OH,$$
$$2NH_4OH + 1{,}5O_2 \rightarrow 2HNO_2 + H_2O + 3H_2,$$
$$2HNO_2 + O_2 \rightarrow 2HNO_3$$

При значительных поглощенных дозах излучения процесс доходит до формирования конечного продукта, что позволяет представить его в виде одной общей реакции:

$$2N_2 + 2H_2O + 5O_2 \rightarrow 4HNO_3$$

Образовавшаяся азотная кислота увеличивает скорость коррозии и ускоряет накопление отложений на поверхности ТВЭЛов, а также снижает pH.

Продукты коррозии частично взаимодействуют с азотной кислотой с образованием $Fe(NO_3)_3$ - нитратов,

$$Fe_2O_3 + 6HNO_3 \rightarrow 2Fe(NO_3)_3 + 3H_2O,$$

которые гидролизуются по реакции:

$$Fe(NO_3)_3 + 3H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3HNO_3$$

Образующаяся гидроокись железа может накапливаться на внутренней поверхности оборудования.

Источником водорода является аммиак, который в условиях нейтронного поля реактора распадается, образуя водород и азот.

Один из методов поддержания концентрации кислорода на нормированном уровне - подавление процесса радиолиза воды. Для этого важно поддерживать концентрацию водорода в теплоносителе не менее 2,2 мг/дм³. Верхний предел концентрации водорода, ограниченный процессом водородного охрупчивания сталей и циркониевых сплавов, составляет 4,5 мг/дм³.

Суммарная концентрация ионов щелочных металлов (натрия, калия, лития) также регулируется. Для нейтрализации борной кислоты и достижения нормированных значений pH теплоносителя вводится сильное основание - КОН.

Контроль концентрации вводимого гидроксида калия (КОН) обязателен из-за возможности высокой концентрации свободной щелочи при повышенных температурах, что может привести к локальному испарению. Как мы уже обсуждали, это представляет опасность с точки зрения ослабления стали с высоким содержанием щелока и циркониевых сплавов. Кроме того, следует помнить, что в теплоноситель первого контура могут поступать и другие ионы щелочных металлов.

Контроль суммарной концентрации ионов щелочных металлов обязателен и должен строго соответствовать концентрации борной кислоты. Эта зависимость изображается на графике (рис. 3), который вычисляется с учетом условия

поддержания значения pH на уровне 7,2±0,1 при температуре 260 ºС в первом контуре, независимо от концентрации борной кислоты.

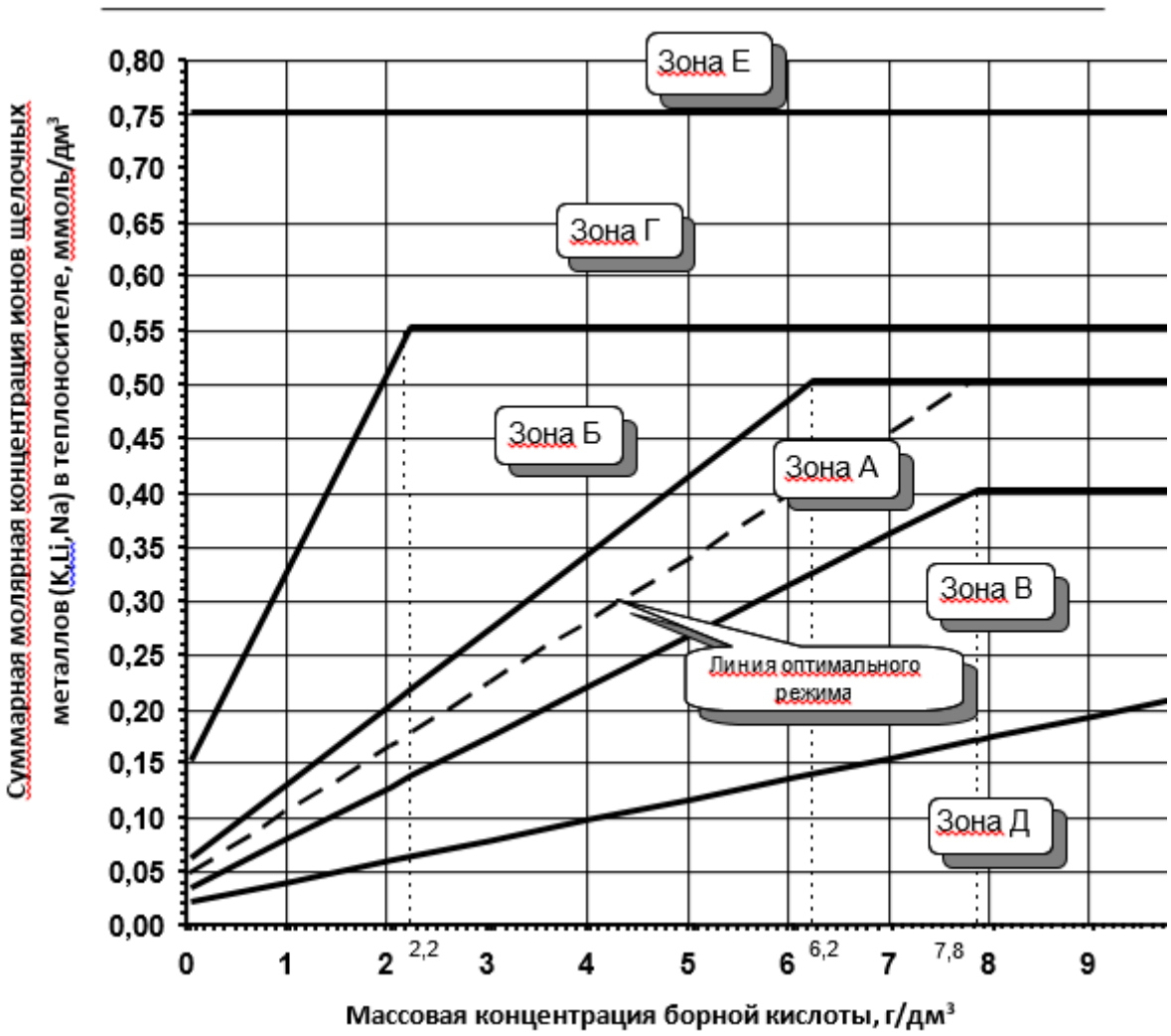


Рисунок 3 - Зависимость массовой концентрации борной кислоты от суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов

Допустимая концентрация суммы ионов щелочных металлов находится в диапозоне 0,02÷0,5 ммоль/дм^3.

Характеристика диагностических показателей

Показатель концентрации водородных ионов (pH) характеризует реакцию воды (кислая, щелочная, нейтральная).

Значение **pH** реакторной воды установлено из соображений коррозионной устойчивости конструкционных материалов. Нижний предел **5,8** обуславливается ограничением протекания электорохимической коррозии с водородной деполяризацией, верхнее значение **10,3**-процессом щелочного охрупчивания сталей и циркониевых сплавов.

Железо.

Железо играет ключевую роль в процессах коррозии и отложений в первом контуре атомного реактора. Все материалы, используемые для изготовления оборудования первого контура, подвержены коррозии в разной степени, в зависимости от их коррозионной стойкости и условий эксплуатации. Ограничение содержания продуктов коррозии в теплоносителе имеет важное значение, поскольку это позволяет снизить скорость образования отложений на различных поверхностях контура.

Отложения на поверхности тепловыделяющих сборок (ТВЭЛ) могут привести к увеличению температуры металла оболочки, что в крайнем случае может привести к пережогу оболочки и выбросу ядерного топлива в теплоноситель. Кроме того, образование отложений способствует неравномерной коррозии, так как потенциал продуктов коррозии отличается от потенциала металла, что может привести к образованию коррозионных элементов.

Продукты коррозии при многократном облучении в активной зоне активируются, что приводит к увеличению радиоактивности оборудования и затрудняет его обслуживание и ремонт.

Способность различных соединений образовывать отложения зависит от того, достигнут ли предел растворимости (насыщения) по соответствующему соединению. Поэтому, чем ниже концентрация продуктов коррозии, тем меньше вероятность их укрупнения и отложения на поверхностях первого контура.

Исследования показали, что при концентрации продуктов коррозии (железо, хром, никель) менее 0,2 мг/дм3 вероятность их отложений минимальна. При концентрации железа в теплоносителе менее 0,05 мг/дм3 контроль за содержанием хрома и никеля может быть не проводиться. Однако, при концентрации железа в теплоносителе более 0,05 мг/дм3 обязательно требуется контроль концентрации хрома и никеля, а также принятие мер по поиску и устранению причин увеличения концентрации продуктов коррозии.

Медь.

Медь играет важную роль в качестве составляющей теплоносителя первого контура атомного реактора. Нормативы качества устанавливают ограничение на содержание меди на уровне менее 0,02 мг/дм3.

Появление меди в теплоносителе первого контура может происходить из продуктов коррозии материалов, содержащих медь, используемых в оборудовании первого контура, а также из подпиточной воды.

Медь, будучи электроположительным элементом, способствует ускорению скорости катодного процесса электрохимической коррозии. Исследования показывают, что двухвалентные ионы меди в большей степени ускоряют катодный процесс на материалах, таких как цирконий, по сравнению с кислородом и ионами водорода. Это подчеркивает важность контроля за содержанием меди в теплоносителе, чтобы предотвратить ускоренную коррозию и сохранить стабильность работы оборудования первого контура.

Нитрат-ионы играют важную роль в процессе регенерации катионитовых фильтров СВО-2 с использованием азотной кислоты. После ввода в эксплуатацию свежеотрегенерированного фильтра возможен смыв остаточных количеств кислотного остатка, выраженного в форме ионов $NO3^-$. Для контроля этого диагностического показателя требуется проведение мониторинга в течение суток после ввода в эксплуатацию свежеотрегенерированного катионитового фильтра.

Сульфат-ионы, с другой стороны, поступают в теплоноситель первого контура вместе с подпиточной водой и могут также входить в состав реагентов,

добавляемых в контур. Присутствие сульфат-ионов может приводить к образованию труднорастворимых соединений с некоторыми катионами, что способствует накоплению отложений в системе. Контроль концентрации сульфат-ионов в теплоносителе первого контура имеет значение для поддержания оптимального рабочего состояния системы и предотвращения возможных проблем, связанных с образованием отложений.

Контроль массовой концентрации общего органического углерода необходим для отслеживания наличия органических веществ, поступающих в теплоноситель как с маслами и нефтепродуктами, так и в виде продуктов деструкции ионообменных материалов в результате радиолиза и термолиза.

В случае отклонения одного или нескольких нормируемых показателей в пределах 1 уровня допустимости, энергоблоку разрешается продолжать работу в "горячем" состоянии в течение 24 часов с момента обнаружения отклонений. Если отклонения не устранены в течение этого времени, то энергоблок плавно переводится в "холодное" состояние. В случае достижения нормируемых показателей второго уровня отклонений, энергоблок также плавно переводится в "холодное" состояние. Эти меры направлены на обеспечение безопасности и нормальной работы энергоблока при выявлении отклонений от нормативных показателей.

1.3 Спецводоочистка. Системы поддержания ВХР первого контура. СВО-2

Водно-химический режим является неотъемлемой частью обеспечения стабильной работы основного и вспомогательного оборудования без дефектов и с максимальной экономичностью. Этот комплекс мер включает в себя использование различных химических реагентов, которые оказывают определенное воздействие на химический состав теплоносителя и поддерживают его в оптимальном состоянии с помощью систем, управляемых в реакторном отделении.

К системам, направленным на поддержание водно-химического режима в первом контуре, относятся: система управления химическими добавками; система обходной фильтрации для очистки теплоносителя первого контура (СВО-1); система очистки воды, используемой для устранения организованных утечек и промывки первого контура (СВО-2); система очистки воды в бассейнах для хранения и обработки борной кислоты (СВО-4); система подачи и промывки первого контура.

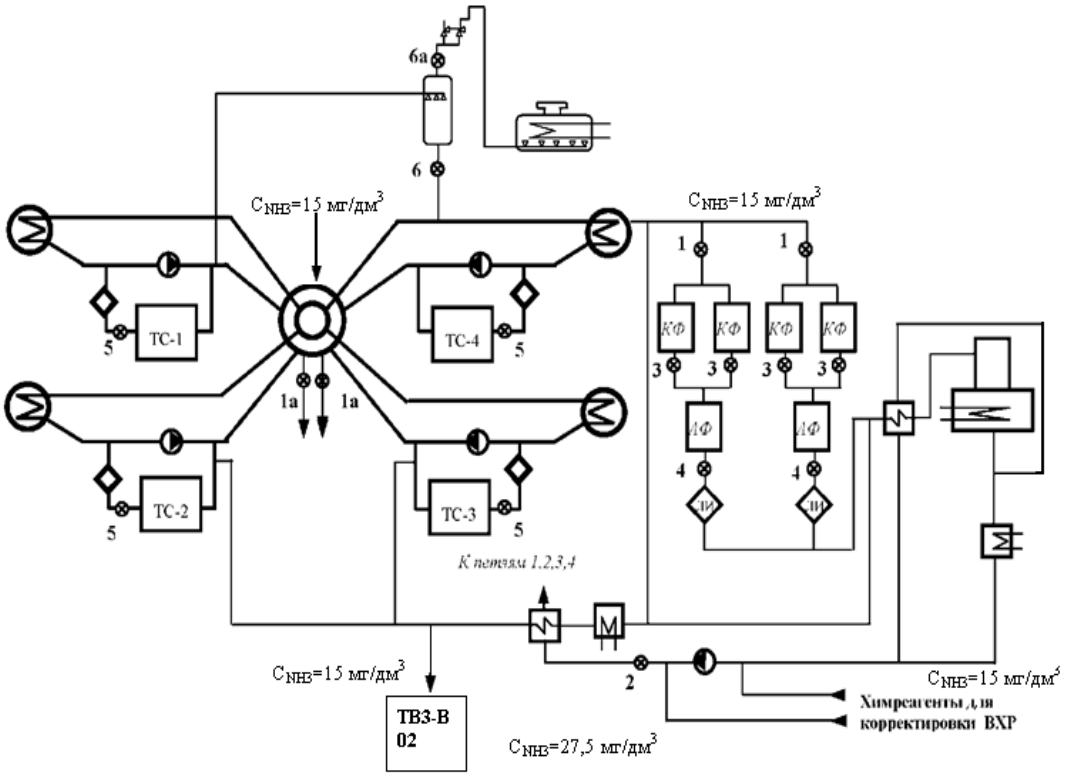


Рисунок 4 - Принципиальная схема первого контура с системами СВО-1 (ТС), СВО-2, подпитки-продувки (ТВЗ-В02)

Система реагентного хозяйства разработана для получения, хранения и точной дозировки реагентов в первый контур с целью поддержания оптимального водно-химического режима в соответствии с установленными стандартами.

Эта система включает в себя резервуары с различными растворами реагентов, такими как 3% раствор гидроокиси калия, 2% раствор гидразин-гидрата, 3% раствор аммиака, раствор борной кислоты (начальная концентрация 16 г/л и регулировка до текущего уровня в первом контуре) и очищенный борный концентрат (с концентрацией 40 г/дм3), а также насосы для точной подачи реагентов в контур.

Для минимизации влияния примесей, которые могут попасть в первый контур вместе с корректирующими добавками, к реагентам устанавливаются строгие требования по их чистоте. Особое внимание уделяется содержанию в реагентах ионов Cl^{-} и Na^{+}, чтобы предотвратить нежелательные вещества.

Система очистки организованных протечек и продувочной воды первого контура (СВО-2) разработана для удаления радиоактивных примесей из продувочной воды и жидкостей, вытекающих из организованных утечек, таких как K^{+}, Na^{+}, Li^{+}, Cl^{-}, Ni^{2+}, Co^{2+}, NO^{3-}, NO^{2-}, Fe^{2+}, Cu^{2+} и другие. Эта система состоит из двух параллельных единиц, работающих под давлением до 20 кг/см2.

Каждая нитка включает в себя несколько компонентов:

- 1. Катионитовый фильтр в H^{+}-форме : Этот фильтр используется для регулирования уровня щелочности в первом контуре и для очистки от продуктов коррозии и других примесей, находящихся в катионной форме, включая радиоактивные элементы, такие как Cs, Fe, Cr, Ni.
- 2. Катионитовый фильтр в аммиачно-калиевой форме : Этот фильтр переводится в эту форму в период выхода реактора на мощность и используется для постепенной регулировки аммиачно-калиевого водно-химического режима. Катионитовые фильтры загружены катионитом КУ-2-8чс ядерного класса.

– 3. Анионитовый фильтр в BO^{3^-}-форме : Этот фильтр предназначен для очистки теплоносителя от анионов радиоактивных нуклидов, хлоридов, фторидов, а также для вывода борной кислоты из теплоносителя в конце эксплуатационного периода реактора, когда вывод ее водообменом становится нецелесообразным. Анионитовые фильтры загружены анионитом АВ-17-8чс ядерного класса в ОН-форме. Перевод фильтров в $BO3^-$-форму осуществляется в период выхода реактора на мощность.

– 4. Фильтр-ловушка зернистых материалов : Этот фильтр предназначен для задержки и удаления зернистых материалов из теплоносителя.

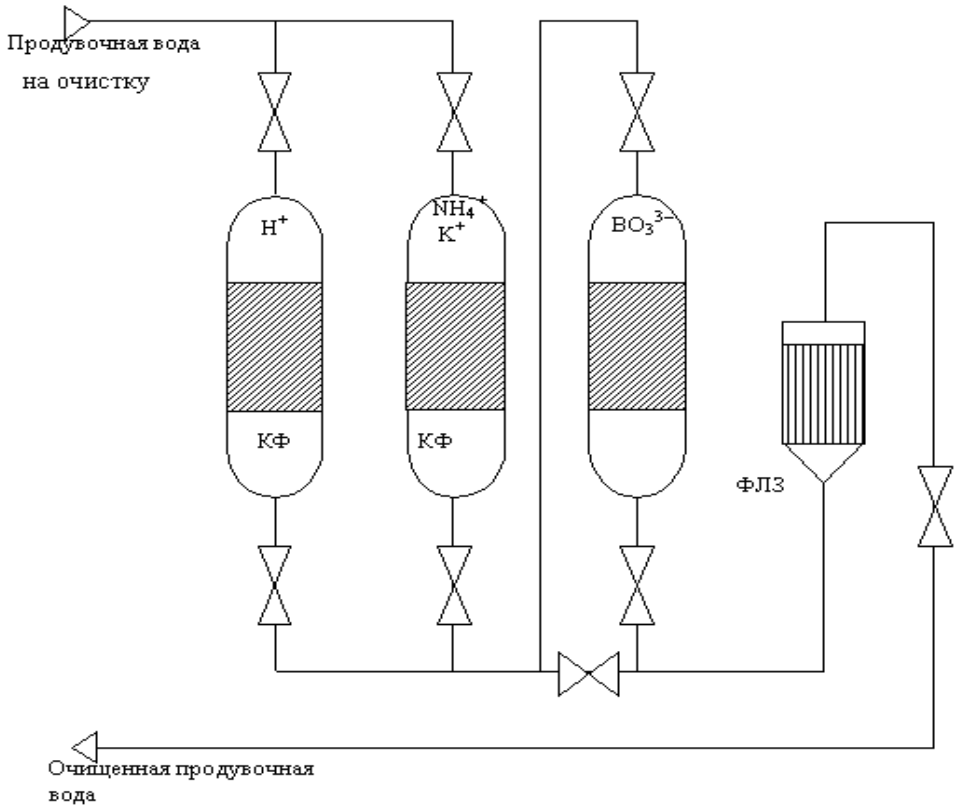


Рисунок 5 - Принципиальная технологическая схема установки СВО – 2

Система подпитки-продувки первого контура выполняет несколько ключевых функций:

1. Регулирование концентрации борной кислоты в первом контуре : Это важное действие, которое позволяет контролировать уровень борной кислоты в теплоносителе первого контура, что имеет значение для поддержания оптимального водно-химического режима.

2. Подача реагентов в первый контур : Система обеспечивает подачу необходимых реагентов в первый контур для поддержания желаемых параметров водно-химического состояния.

3. Регулирование расхода продувочной воды, подаваемой на СВО-2 : Это важная функция для контроля за расходом продувочной воды, которая используется для очистки системы от радиоактивных примесей и других загрязнений.

4. Дегазация подпиточной воды и прочее : Система также выполняет задачу дегазации подпиточной воды и других процессов, что способствует поддержанию оптимальных условий работы первого контура.

Система подпитки-продувки первого контура включает в себя несколько компонентов:

1. Два деаэратора : Один из них предназначен для деаэрации подпиточной воды и постоянно находится в работе, а второй заполнен чистым конденсатом и используется для подпитки первого контура при выводе бора.

2. Три подпиточных агрегата : Каждый из них состоит из двух насосов - предвключенного бустерного и основного насоса. Эти агрегаты обеспечивают надежную подачу подпиточной воды в первый контур.

Важно отметить, что часть подпиточной воды также направляется на уплотнение вала ГЦН. Кроме того, для компенсации неорганизованных протечек первого контура и регулирования реактивности реактора используется подпитка деаэратора раствором борной кислоты или чистым конденсатом, в зависимости от текущего

режима работы реакторной установки.

Система очистки организованных протечек и продувочной воды первого контура (СВО-2) играет ключевую роль в обеспечении надежной работы первого контура. Ее функции включают:

1. Очистка продувочной воды и организованных протечек : Удаляются продукты коррозии, осколки деления ядерного топлива, различные примеси и ионы, в том числе поступающие с подпиточной водой и коррекционными реагентами.

2. Регулирование уровня концентрации щелочных металлов и аммиака : Происходит плавное регулирование содержания Na, K, Li и аммиака в первом контуре.

3. Вывод избыточной щелочности : Избыточная щелочность выводится из теплоносителя, что способствует поддержанию оптимального водно-химического режима.

4. Удаление борной кислоты : В конце кампании реактора производится удаление борной кислоты из теплоносителя.

СВО-2 включает две технологические нитки, каждая из которых обеспечивает эффективную очистку. Катионитовые фильтры загружены специальными формами катионита - Н-формой и (NH_4 +I<) - формой. Анионитовый фильтр работает в борной или ОН-форме, осуществляя удаление анионов примесей и радионуклидов из теплоносителя.:

$$R\text{-}N(CH_3)3H_2BO_3 + An\ R\text{-}N(CH_3)_3\ Ап + H_2BO_3\ .$$

Правильно, реакция обмена, описанная вами, показывает, что борная кислота (H_3BO_3) не может быть удалена анионитом, находящимся в борной форме (BO_3^-). Это связано с тем, что в данной реакции происходит обмен аниона BO_3^- на анион NO_3^-, что не позволяет эффективно вывести борную кислоту из теплоносителя.

Для того чтобы удалить борную кислоту из теплоносителя в конце кампании реактора, используется анионит, который находится в ОН-форме. В данном случае, анионит способен эффективно связывать анионы борной кислоты (H_3BO_3), образуя боратные соединения, которые затем выводятся из теплоносителя:

$$R\text{-}N(CH_3)_3OH + H_2BO_3\ R\text{-}N(CH_3)_3H_2BO_3 + OH\ .$$

Правильно, катионитовый фильтр, находящийся в форме (NH_4+K), предназначен для очистки теплоносителя от различных катионов, которые могут присутствовать в качестве примесей. В данной форме катионит способен эффективно удерживать катионы аммония (NH_4^+) и калия (K^+), которые могут быть присутствовать в теплоносителе. Это позволяет поддерживать требуемый уровень чистоты теплоносителя и обеспечивать нормальное функционирование системы:

$$R\text{-}SO_3NH4 + Kat^+\ R\text{-}SO_3Kat + NtV;$$

$$R\text{-}SO_3K + Kat^+\ R\text{-}SO_3Kat + K^+.$$

Верно, чтобы очистить теплоноситель от катионов Na и K, катионит должен быть в форме H^+. В данной форме катионит способен эффективно удерживать катионы натрия (Na^+) и калия (K^+), что позволяет удалить эти примеси из теплоносителя. Поэтому параллельно с катионитом в форме (NH_4+K), необходимо использовать катионит в форме H^+ для полной очистки теплоносителя от нежелательных катионов:

$$R\text{-}SO_3H + K\ R\text{-}SO3K + Ef;$$

$$R\text{-}SO3H + NH?\ R\text{-}SO3NH4 + ft.$$

Используя комбинацию ионитов в различных формах, мы обеспечиваем не только необходимую концентрацию корректирующих добавок в первом контуре, но и сохраняем требуемый уровень чистоты теплоносителя.

Благодаря комбинации ионообменных смол в различных формах поддерживается не только необходимая концентрация корректирующих добавок в первом контуре, но и требуемая чистота теплоносителя. Замена фильтрующего материала происходит после пропуска примерно 80 тысяч объемов воды через один объем ионитов или после полного истощения, что определяется на основе результатов химических анализов фильтрата. Характеристики используемых ионообменных смол в системе СВО-2 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики ионообменных смол

Показатель	Марка ионита	
	КУ-2-8 чс	АВ-17-8 чс
Внешний вид	Сферические зерна	
Фракционный состав набухшего ионита,	0,4-1,25	0,4-1,25
Содержание рабочей фракции,	95,0	95,0
Насыпная масса набухшего ионита в исходной форме (H^+, OH'), т/м^3	0,75 - 0,80	0,74
Содержание хлорид-иона, мг/дм^3, не	0,03	0,005
ДОЕ, кг-экв/м^	1,3	0,9
Форма товарного ионита	H+	OH'

В нормальном режиме работы энергоблока продувка первого контура осуществляется непрерывно со скоростью 15-25 м3/ч. Продувочная вода охлаждается через регенеративный теплообмен до температур в диапазоне 40-50 °С и после этого поступает на СВО-2. Давление в системе СВО-2 поддерживается на уровне 16 кгс/см2.

В процессе работы всегда одна из двух параллельных ниток системы находится в активном режиме, а другая является резервной. Активация второй нитки происходит, когда расход продувочной воды первого контура превышает 30 т/ч. Кроме того, если рабочая нитка отправляется на регенерацию или ремонт, резервная нитка также подключается к работе. Во время эксплуатации системы СВО-2 контролируется перепад давления на фильтрах работающей нитки, который не должен превышать следующие значения:

- для катионитового фильтра - 1,0 кгс/см2;
- для анионитового фильтра - 0,8 кгс/см2;
- для фильтра-ловушки ионитов - 0,5 кгс/см2.

Регенерация рабочей нитки фильтров производится при достижении хотя бы одного из следующих критериев:

- Повышение значения pH свыше 6,5 на выходе катионитового фильтра при совместной работе катионитового и анионитового фильтров.

- Содержание ионов натрия после катионитового фильтра достигает 1 мг/кг и выше.

- Содержание продуктов коррозии после катионитового фильтра превышает 0,2 мг/кг.

- Содержание хлорид-иона после анионитового фильтра составляет 0,1 мг/кг и выше.

Регенерация ионитов проводится следующим образом: для катионитового фильтра используется подача 5% раствора азотной кислоты HNO3, а для анионитового фильтра - подача 5% раствора щелочи КОН..

Глава 2

Математическая модель объекта управления

2.1 Контуры автоматического регулирования систем

Автоматическое регулирование - одна из главных управляющих функций АСУ ТП энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000, от ее действия зависят безопасность и качество технологических процессов и срок эксплуатации энергетического оборудования. В системах автоматического регулирования (САР) энергоблока используются пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы, который формируют законы регулирования. Во время внедрения и модернизации САР энергоблоков основной задачей, которая связана с обеспечением безопасности эксплуатации АЭС, становится обоснование устойчивости всех контуров автоматического регулирования.

Эффективная настройка контуров автоматического регулирования играет ключевую роль в обеспечении надежности и экономичности работы системы в целом. Выбор оптимальных параметров регулирования напрямую зависит от требований к качеству выполнения технологических процессов.

Важной задачей автоматических регуляторов является удержание технических параметров в рамках заданных значений. Структурная схема контура автоматического регулирования изображена на рисунке 1.

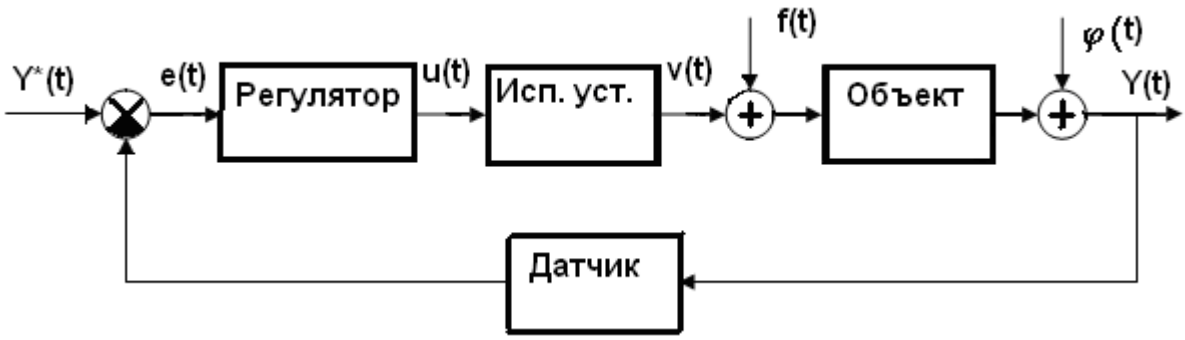


Рисунок 6 – Структурная схема контура автоматического регулирования

Входной сигнал $Y \cdot (t)$ сравнивается с текущим значением регулируемого параметра $Y(t)$. Как итог, появляется сигнал рассогласования, поступающий в

регулятор. Регулятор создает управляющий сигнал $u(t)$ и направляет его на исполнительное устройство. Управляющее воздействие $v(t)$ от исполнительного устройства попадает на вход объекта. Помимо управляющего воздействия $V(t)$ на объект оказывает влияние возмущение $f(t)$. Функция регулятора – обеспечить изменение $Y(t)$ в соответствии с заданием входного сигнала $Y \cdot (t)$ в условиях действия возмущений $f(t)$ и погрешностей измерения выходного сигнала $\varphi(t)$.

В соответствии с различными методиками, регуляторы формируют управляющий сигнал. В зависимости от используемых методов, регуляторы могут быть классифицированы следующим образом:

- Релейные регуляторы, которые могут быть двух- или трехпозиционными.

- Типовые промышленные регуляторы непрерывного действия, такие как П-, И-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы.

- Регуляторы с выходом на импульсный исполнительный механизм, который может использовать амплитудную, широтную, частотную или фазовую модуляцию выходной последовательности импульсов.

- Регуляторы состояния динамической системы, представленные как в непрерывном, так и в дискретном вариантах.

- Регуляторы, основанные на нечеткой логике (fuzzy logic).

- Регуляторы, использующие искусственные нейронные сети.

2.2 Технологические контуры атомных станций

Атомные электростанции отличаются не только типом реакторов и материалами теплоносителя, но и по структуре тепловых контуров.

Одной из функций теплоносителя является отвод тепла, выделяющегося при внутриядерных реакциях в реакторе. Для предотвращения образования отложений на элементах, где происходит выделение тепла, требуется использование высокочистого теплоносителя, поэтому часто применяется замкнутый контур. Еще одной причиной выбора замкнутого контура является то, что прохождение через реактор активирует теплоноситель, и его утечки могут создать радиационные риски. Исходя из этого, классификация атомных электростанций в значительной мере зависит от количества используемых в них тепловых контуров.

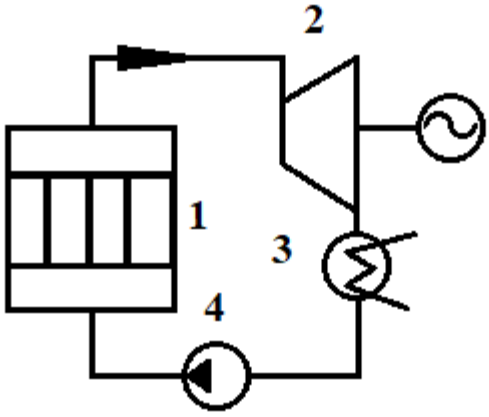


Рисунок 7 - Технологическая схема одноконтурной АЭС:

1 – реактор; 2 – турбогенератор; 3 – конденсатор; 4 – питательный насос.

Атомные электростанции (АЭС) подразделяются на одноконтурные, двухконтурные, не полностью двухконтурные и трехконтурные. Одноконтурной называется АЭС, у которой контур теплоносителя совпадает с контуром рабочего тела.

В реакторе происходит образование пара, который направляется в турбину. Там пар расширяется, выполняя работу, которая преобразуется в электроэнергию в генераторе. Затем конденсированный пар, теплонесущая среда, снова подается в

реактор с помощью насоса. В результате контур рабочего тела становится одновременно контуром теплоносителя, иногда также используется как контур замедлителя, и оказывается замкнутым.

Двухконтурной АЭС называется в том случае, если контуры теплоносителя и рабочего тела (пара) разделены.

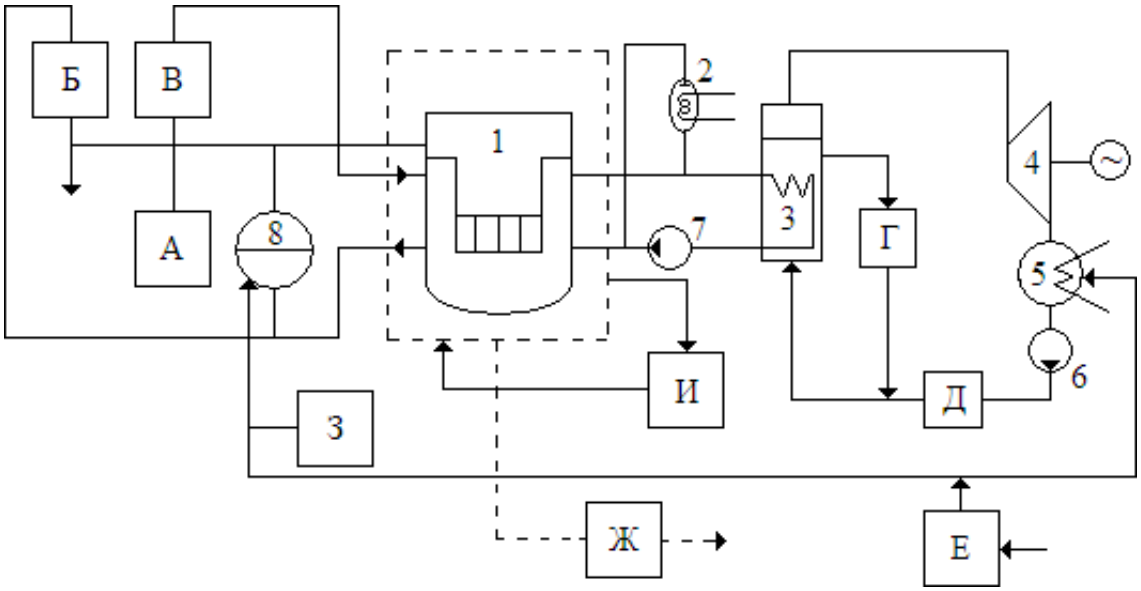


Рисунок 8 - Принципиальная схема двухконтурной АЭС с водно-химическими системами:

1 – реактор типа ВВЭР; 2 – компенсатор объема; 3 – парогенератор; 4 – турбогенератор; 5 – конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – ГЦН; 8 – деаэратор подпитки; А – очистка теплоносителя; Б – очистка организованных протечек (СВО-2); В – борорегулирующая система; Г – очистка воды парогенератора (СВО-5); Д – блочная конденсатоочистка; Е – подготовка добавочной воды (ХВО); Ж – переработка сбросных вод (СВО-3); З – коррекционная обработка теплоносителя; И – очистка борсодержащих вод (СВО-4, СВО-6).

В таких системах первый контур, содержащий теплоноситель, называется основным, а второй контур, где циркулирует рабочее тело, обычно пар, - вспомогательным. Он охлаждается теплоносителем, который прокачивается через

реактор и парогенератор с помощью циркуляционного насоса. Хотя первый контур становится радиоактивным, он включает только часть оборудования станции. Когда в реакторе не образуется пар, в первый контур вводится компенсатор объема. Это делается потому, что объем теплоносителя зависит от его температуры, которая изменяется в процессе эксплуатации. Затем, из парогенератора пар переходит в турбину, после нее в конденсатор, а конденсат в свою очередь с помощью насоса попадает в парогенератор. Второй контур, который образовался таким способом, активирует оборудование, которое работает без радиационной активности, что очень облегчает эксплуатацию станции. На двухконтурной станции обязательно нахождение парогенерирующей установки – элемента, который разделяет два контура, в следствие чего установка одинаково относится и к первому, и ко второму контуру. Чтобы обеспечить передачу тепла через поверхность нагрева, необходимо создать разницу в температуре между теплоносителем и кипящей водой в парогенераторе. Поэтому для водного теплоносителя требуется поддержание более высокого давления в первом контуре по сравнению с давлением пара, который поступает на турбину. Необходимость предотвратить закипание теплоносителя в каналах реактора ведет к тому, что давление в первом контуре должно быть выше, чем во втором контуре. Поэтому тепловая экономичность двухконтурной станции всегда ниже, чем одноконтурной станции с таким же давлением в реакторе. При этом в реальности экономичность циклов почти одинаковая, это связано с необходимостью применения в одноконтурной схеме специальных мер по удалению продуктов коррозии сталей из воды, которая поступает на турбину (регенеративный подогрев).

Атомные электростанции также могут функционировать как частично двухконтурные. В таком варианте существует как самостоятельный первый контур теплоносителя, так и контур теплоносителя, совмещенный с вторым контуром. Пар, образующийся в реакторе, проходит через барабан-сепаратор для осушки, затем направляется в парогенератор, где конденсируется и смешивается с водой. Теплоноситель, поддерживаемый циркуляционным насосом,

возвращается обратно в реактор. Насыщенный пар из парогенератора используется для нагрева в реакторе, превращаясь таким образом не только в рабочее вещество, но и в теплоноситель. После этого пар проходит по всему второму контуру, который становится совмещенным с первым, особенно в его паровой части, обладающей наименьшей степенью радиоактивности.

Есть теплоносители, в которых бурное химическое взаимодействие вызывается попаданием пара или воды. В таком случае возникает опасность выброса радиационно-активных веществ из первого контура непосредственно в обслуживаемые помещения. К таким теплоносителям относится, например, жидкий натрий. Чтобы этого избежать создается дополнительный (промежуточный) контур, для того, чтобы в аварийных ситуациях была возможность не допустить контакт радиоактивного натрия с водой или водяным паром. АЭС с подобной системой называются трехконтурными.

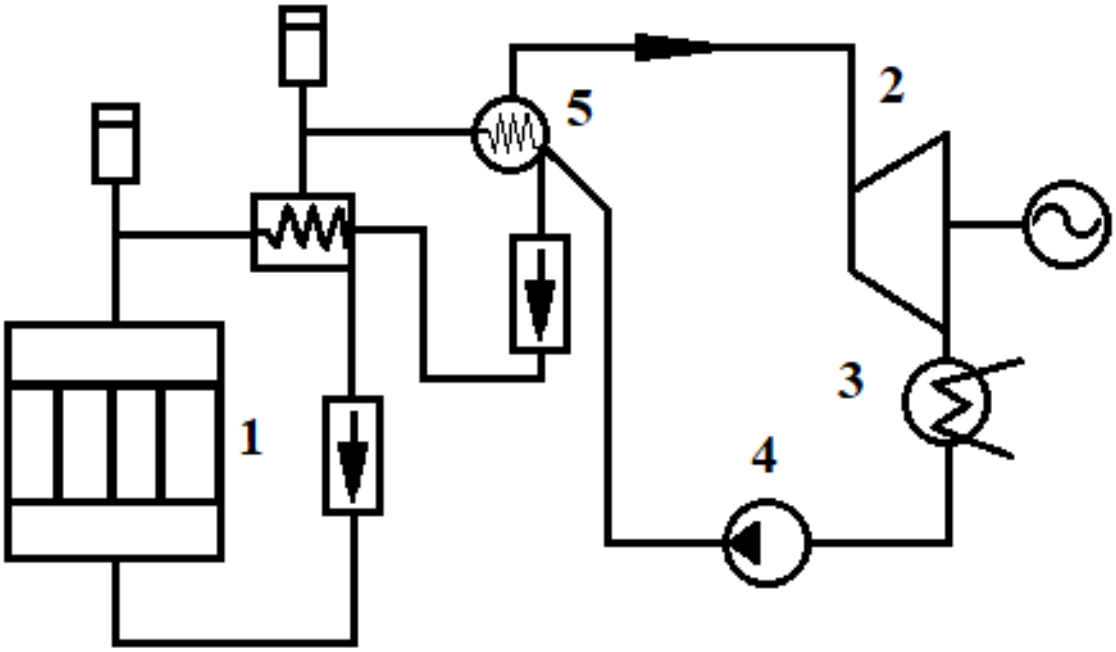


Рисунок 9 - Технологическая схема трехконтурной АЭС

1 – реактор;

2 – турбогенератор;

3 – конденсатор;

4 – питательный насос;

5 – парогенератор.

2.3 Постановка задачи

В данной работе с целью проведения изучения модели системы управления регулятора ТВС-01 концентрации аммиака в теплоносителе реактора ВВЭР-1000 нужно изучить свойства объекта управления, а также свойства и характеристики исполняющего механизма и структуру и характеристики регулятора концентрации аммиака в теплоносителе. Для этого необходимо составить структурную математическую модель регулятора, исполнительного механизма и объекта управления, а также провести моделирование контура регулирования в среде Simulink пакета Matlab. Затем перейти от структурно-математической модели исполняющего механизма и объекта управления к разностным уравнениям и реализовать их в ПТК «УМИКОН».

Полученные разностные уравнения исполняющего механизма и объекта управления нужно протестировать в среде реального времени и сравнить с результатами моделирования, которые были получены в среде Matlab.

После изучения результата проведенных исследований нужно будет сделать выводы о проведенных результатах работы.

2.4 Система химреагентов ТВ20. Структурная схема регулирования аммиака в теплоносителе

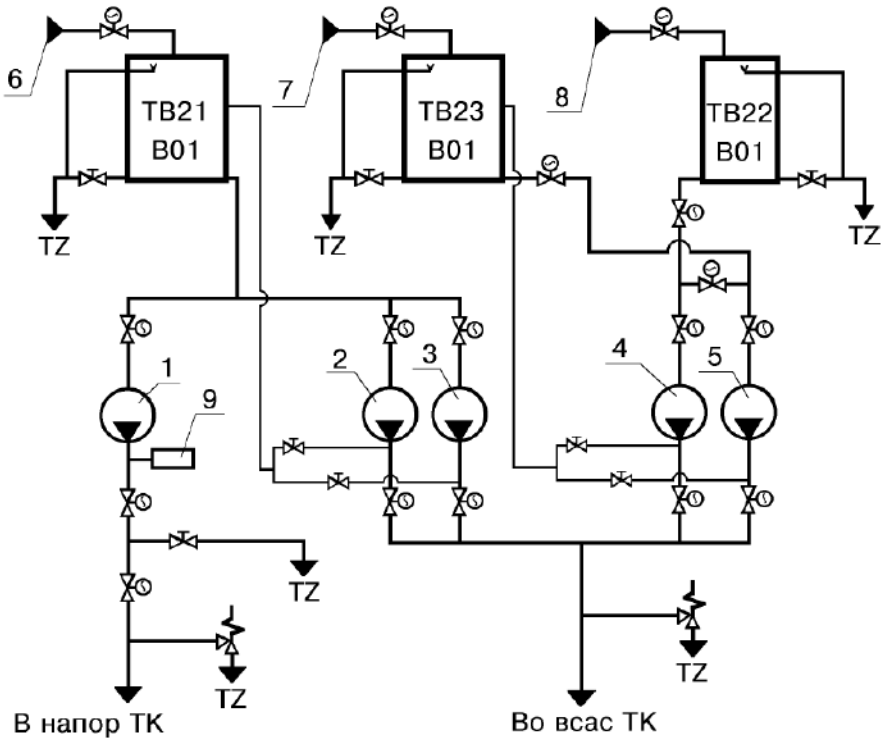


Рисунок 10 - Упрощенная схема узла реагентов РО

1- Дозирующий насос для аммиака ТВ30Д07

2- Дозирующий насос для аммиака ТВ30Д06

3- Дозирующий насос для аммиака ТВ30Д05

4- Дозирующий насос для КОН и гидразина ТВ30Д04

5- Дозирующий насос для КОН и гидразина ТВ30Д03

6, 7, 8 – Наполнение резервуаров аммиаком, КОН и гидразином со специализированных контейнеров

9- Емкость для снижения давления

Подгруппа калия гидроксида (KOH) предназначена для хранения и дозирования раствора гидроксида калия в первый контур с целью поддержания уровня pH теплоносителя в первом контуре в определенных пределах.

Таблица 3 - Насос дозатора TB20D01-02-03-04-05

Наименование насоса	Маркировка	Тип	Подача л/ч	Напор кгс/см²	Частота вращения об/мин
Насос-дозатор едкого калия и гидразина	TB20D01 TB20D02	НД 0,5Э 100/10 К1 ЗА	100	10	1500
Насос-дозатор аммиака	TB20D03 TB20D04	НД 0,5Э 100/10 К1 ЗА	100	10	1500
Насос-дозатор аммиака	TB20D05	НД 25/250 ДА	25	250	1500

Система химреагентов TB20

Система предназначена для следующих целей:

- Приема и хранения реагентов, включая аммиак, едкий калий и гидразин гидрат.

- Приготовления растворов этих реагентов с необходимой концентрацией.

- Подачи растворов реагентов на всасывание и напор подпиточных насосов с целью корректировки водно-химического режима первого контура.

Система химреагентов TB20 состоит из:

- баков TB21B01, TB22B01, TB23B01
- насосов TB20D01, 02, 03, 04, 05
- трубопроводов, арматуры, КИП.

Основные потоки

Основной режим работы системы TB20 заключается в подаче химреагентов (аммиака, едкого калия, гидразин гидрата) на всас подпиточных насосов.

Раствор аммиака из бака TB21B01 попадает в общий всасывающий коллектор насосов TB20D03, 04, 05 с арматурой TB20S13, 14, 15 на всасе. Насосом, находящимся в работе TB20D03, 04 через напорную арматуру TB20S18, 19 соответственно, раствор аммиака подается в общий для насосов TB20D01, 02, 03,

04 напорный коллектор, из которого он попадает во всасывающий коллектор подпиточных насосов TK21, 22, 23D01, 02. При необходимости быстрого увеличения концентрации аммиака в первом контуре раствор аммиака из бака TB21B01 насосом TB20D05 через напорные арматуры TB20S16, 17 подается в напорный коллектор подпиточных насосов TK21, 22, 23D01, 02.

Раствор гидразин гидрата из бака TB22B01 через арматуру TB20S05 попадает во всасывающий трубопровод насоса TB20D02 с арматурой TB20S08 на всасе. Насосом TB20D02 через напорную арматуру TB20S09 раствор гидразин гидрата подается в общий для насосов TB20D01, 02, 03, 04 напорный коллектор из которого он попадает во всасывающий коллектор подпиточных насосов TK21, 22, 23D01, 02.

Раствор едкого калия из резервуара TB23B01 через контрольный клапан TB20S02 поступает во всасывающий трубопровод насоса TB20D01, оборудованного клапаном TB20S06 на всасывающем патрубке. Насос TB20D01 направляет раствор едкого калия через напорный клапан TB20S07 в общий напорный коллектор для насосов TB20D01, TB20D02, TB20D03 и TB20D04. Оттуда раствор подается во всасывающий коллектор подпиточных насосов TK21, TK22, и насосов TB23D01 и TB23D02.

Всасывающие трубопроводы насосов TB20D01, 02 объединены между собой перемычкой с арматурой TB20S03, что дает возможность взаиморезервирования этих насосов.

Для резервирования насосов TB20D01, 02 установлена перемычка между всасывающим коллектором этих насосов и всасом TB20D05 с арматурой TB20S36, что позволяет осуществлять подачу гидразин-гидрата или едкого калия в I контур насосом TB20D05. Перемычка с арматурой TB20S36 врезана на всас TB20D05 после арматуры TB20S15 (находящейся на всасе из бака аммиака TB21B01), которая должна быть закрыта при подаче гидразин-гидрата или едкого калия в I контур насосом TB20D05.

Прием химреагентов в баки TB21, 22, 23B01 производится из СК с узла химреагентов через арматуры TB20S12, 04, 01 соответственно.

Описание компонентов системы TB20

Насосы химреагентов TB20D01, 02, 03, 04

Насосы химреагентов TB20D01, TB20D02, TB20D03 и TB20D04 используются для перекачивания химических реагентов из резервуаров TB20B01, TB20B02 и TB20B03 на всасывающие патрубки подпиточных насосов TK21, TK22 и насосов TB23D01 и TB23D02.

Тип насосов НД, Э-100/10, представляет собой автоматизированные электронасосные дозирующие одноплунжерные устройства с регулируемой подачей. Они предназначены для объемного дозирования нейтральных и агрессивных жидкостей. В их состав входят гидроцилиндр (1), регулирующий механизм (2), редукторный двигатель (3) и исполнительный механизм (4). Все узлы агрегата устанавливаются на корпусе регулирующего механизма.

Регулирующий механизм (изображенный на рисунке 12) выполняет функцию преобразования вращательного движения вала мотор-редуктора в поступательное движение плунжера гидроцилиндра и изменения его хода. Вал регулирующего механизма получает вращение через зубчатую муфту от вала мотор-редуктора. Кулачок, установленный на валу регулирующего механизма, преобразует вращательное движение в поступательное движение ползуна, к которому жестко прикреплен плунжер. При вращении кулачка он входит в контакт с ползуном, начиная процесс нагнетания. При достижении полного подъема кулачка процесс нагнетания завершается, и дальнейшее вращение кулачка заставляет ползун и плунжер возвращаться в исходное положение под действием пружины, что приводит к процессу всасывания. Регулирование подачи осуществляется путем изменения длины хода плунжера путем регулирования зазора между кулачком и ползуном. Это регулирование подачи может быть выполнено автоматически с

помощью исполнительного механизма МЭМ-6,3/160-25 или вручную с помощью колпака регулятора.

Основные характеристики насосов:

- Подача 100 л/ч,
- Предельное давление 10 кгс/см^2,
- Диапазон регулирования хода плунжера:

  Максимальный 0...32 мм,

  Рабочий 8...32 мм.

Бак аммиака ТВ21В01

Бак аммиака ТВ21В01 предназначен для приема и хранения раствора аммиака с концентрацией от 0,8% до 1,5%. Этот бак имеет вертикальную цилиндрическую форму и оснащен герметичным люком. Основные характеристики данного бака следующие:

- Геометрический объем: 4,3 м^3
- Рабочий объем: 3,8 м^3
- Объемно-высотное отношение: 25 л/см

Бак гидразина ТВ22В01

Бак гидразина ТВ22В01 предназначен для приема и хранения раствора гидразин гидрата с концентрацией от 2% до 3%. Этот бак также имеет вертикальную цилиндрическую форму и оборудован герметичным люком. Его основные характеристики следующие:

- Геометрический объем: 1,4 м^3
- Рабочий объем: 1,3 м^3
- Объемно-высотное отношение: 10 л/см

Бак едкого калия TB23B01

Бак едкого калия TB23B01 предназначен для приема и хранения раствора едкого калия с концентрацией 1%.

Он имеет такие же характеристики и размеры, как и бак TB21B01.

Предохранительные клапаны

Предохранительные клапаны TB20D05 и TB20S28 предназначены для предотвращения повреждений трубопроводов и насосов TB20D01, 02, 03, 04, 05 из-за избыточного давления, возникающего при работе указанных насосов с закрытой арматурой TB20S30 на напорном трубопроводе. Клапан TB20S27 установлен на напорном трубопроводе насоса TB20D05, а клапан TB20S28 - на напорном коллекторе насосов TB20D01, 02, 03, 04.

Предохранительные клапаны настроены на давление открытия:

- клапан TB20S27 199 кг/см2,
- клапан TB20S28 5,5 кг/см2.

Размещение оборудования

Насосы TB20D01,02,03,04,05 расположены в пом. А-047/1 обстройки РО на отметке -4,2.

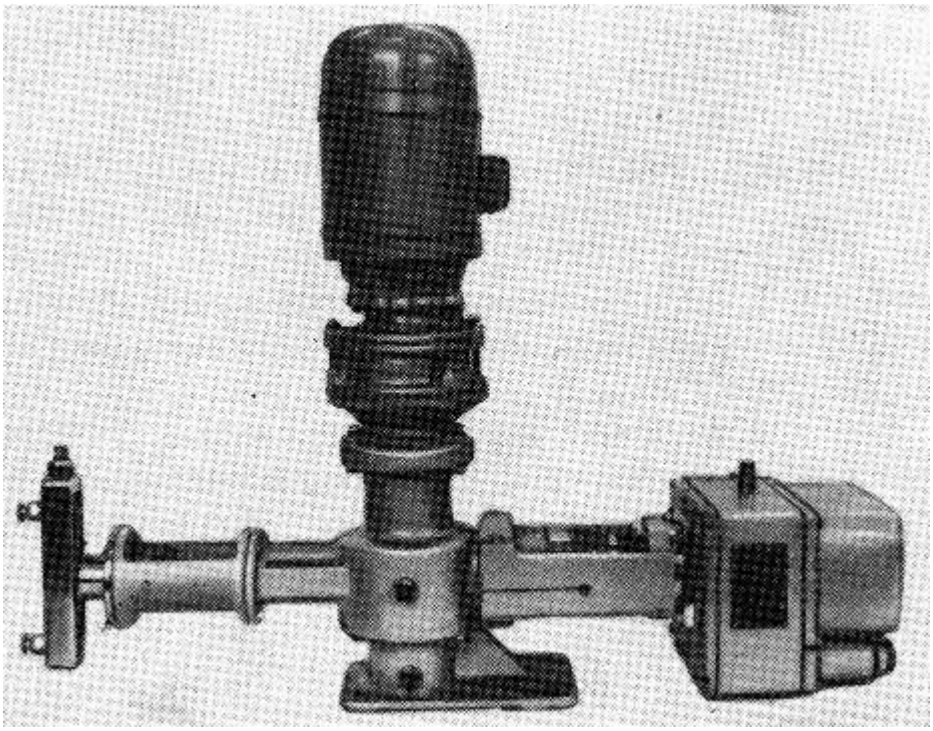
Бак TB21(23)B01 расположен в пом. А047/2 обстройки РО на отметке -4,2.

Бак TB22B01 расположен в пом. А047/1 обстройки РО на отметке -4,2.

В нормальных условиях эксплуатации блока, аммиак должен непрерывно дозироваться в теплоноситель 1-го контура. В процессе работы аммиак непрерывно уходит из цикла.

2.5 Объект управления. Насос-дозатор НД 0,5 Э 100/10

Рисунок 11 - Общий вид насоса НД 0,5 Э 100/10



Система дозировки реагентов оперирует главным образом плунжерными насосами-дозаторами из серии НД, оснащенными устройством автоматического регулирования производительности. Эти насосы предназначены для непрерывного объемного дозирования жидкостей в технологических процессах. При стабильных параметрах окружающей среды, таких как плотность и вязкость жидкостей, температура и режим эксплуатации, они обеспечивают высокую точность дозирования.

Каждый дозировочный электронасосный агрегат включает в себя двигатель, редуктор, регулирующий механизм и гидроцилиндр. Регулирование производительности может осуществляться как при работе насосов, так и при их остановке.

Автоматическое или дистанционное управление производительностью этих насосов осуществляется путем изменения хода плунжера с помощью электрического исполнительного механизма. Выходной вал этого механизма связан с регулирующим устройством насоса-дозатора. Ход плунжера

ограничивается передним положением регулирующего устройства, а полный ход плунжера составляет 32 мм..

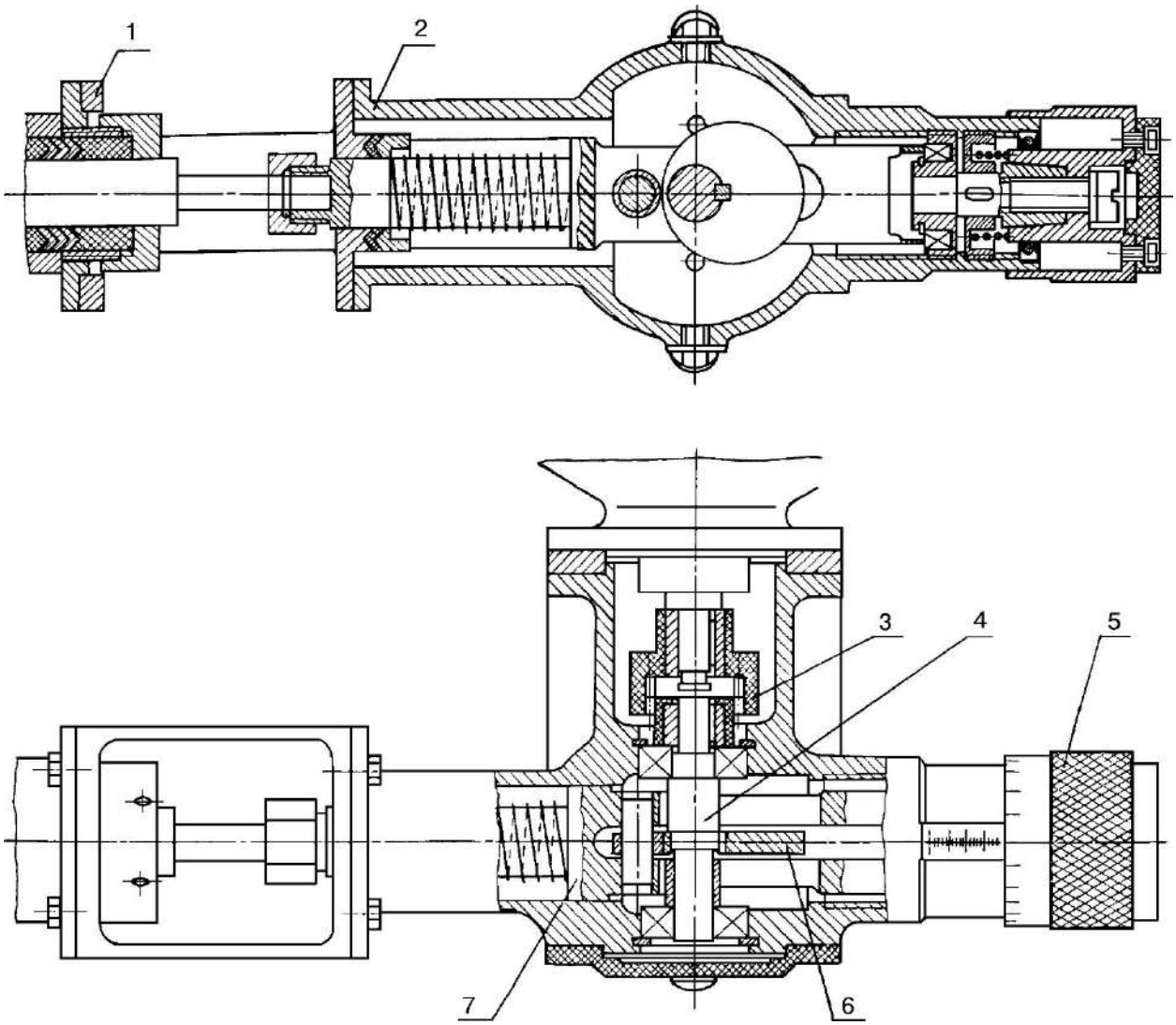


Рисунок 12 - Устройства насоса НД 0,5 Э 100/10

1- кронштейн

2- корпус

3- зубчатая муфта

4- вал

5- колпак регулятора

6- кулачок

7- ползун

Во время нормальной работы блока необходимо непрерывно дозировать аммиак в подпиточную воду. Поскольку аммиак постоянно теряется в процессе циркуляции, его замещение осуществляется посредством постоянной дозировки на всас подпиточного агрегата.

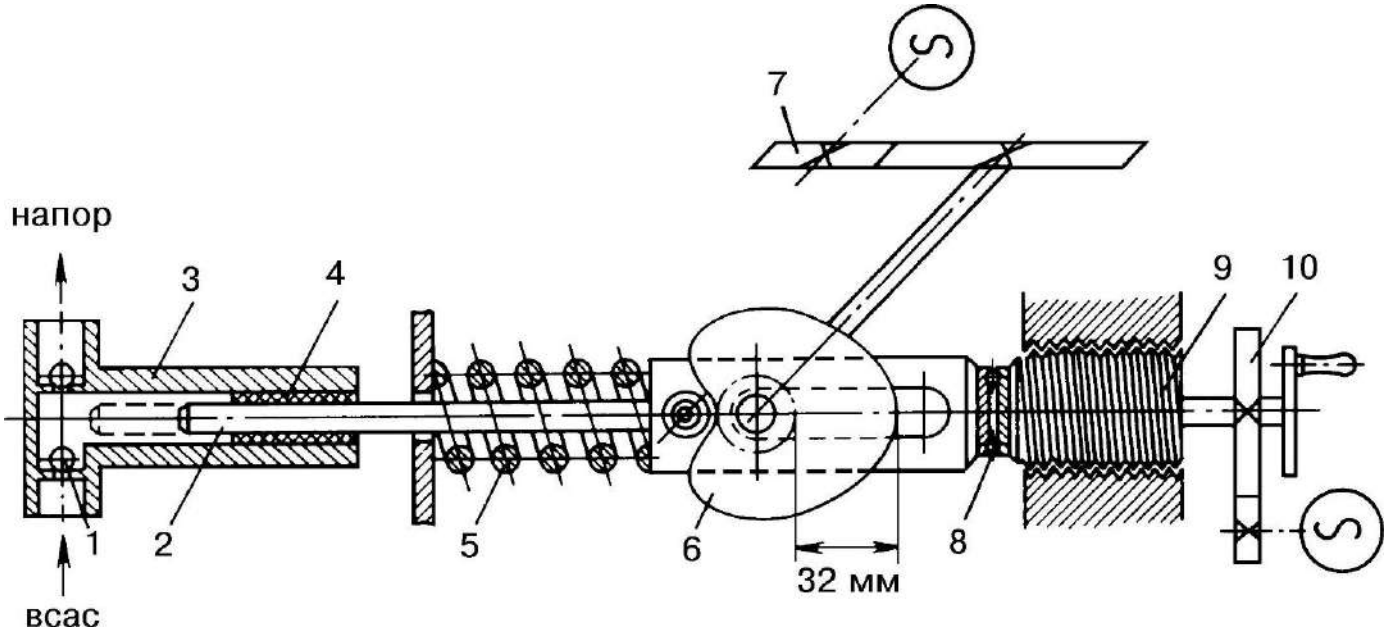


Рисунок 13 - Упрощенная схема регулирования подачи насосов-дозаторов

1- клапан

2- плунжер

3- корпус насоса

4- уплотнения

5- возвратная пружина

6- кулачок

7- электродвигатель

8- упорный подшипник

9- регулирующее устройство

10- испол нителный механизм

Оператор РО регулирует подачу аммиака вручную на основе расхода подпиточной воды. Дозировка аммиака осуществляется с учетом того, чтобы концентрация NH_3 в подпиточной воде составляла не менее 5 мг/литр. Однако

важно избегать превышения дозировки аммиака более чем на 50 мг/литр, поскольку это может привести к резкому увеличению концентрации щелочных металлов в теплоносителе. Для оперативной коррекции такого нарушения следует активировать катионитовый фильтр системы СВО-2, который находится в форме Н.

2.6 Представление объекта управления в виде разностных уравнений

Для создания модели объекта управления используются разностные уравнения модели, которые составляются с применением передаточных функций.

В следствие того, что исследуемый объект управления обладает свойством самовыравнивания, то для создания разностных уравнений рассмотрим апериодического звено первого порядка.

Учитывая цели исследовательской работы, которая состоит из моделирования и проектирования системы автоматического управления, а не определения конструктивных характеристик исполнительного механизма. В этом смысле будет использоваться передаточная функция исполнительного механизма без инерционности.

Для исполнительного механизма:

$$W(s) = K = \frac{X_{\text{вых}}(S)}{X_{\text{вх}}(S)}$$

$$X_{\text{вых}}(s) = X_{\text{вх}}(s) \cdot K;$$

$$\textit{При } S \to \frac{d}{dt}$$

$$X_{\text{вых}}(t) = X_{\text{вх}}(t) \cdot K$$

Для объекта управления:

$$W(s) = \frac{k}{TS+1} = \frac{X_{\text{вых}}(S)}{X_{\text{вх}}(S)};$$

$$k \cdot X_{\text{вх}}(S) = X_{\text{вых}}(S) \cdot (TS + 1);$$

$$T \cdot S \cdot X_{\text{вых}}(S) + X_{\text{вых}}(S) = k \cdot X_{\text{вх}}(S);$$

$$\textit{При } S \to \frac{d}{dt};$$

$$T\frac{d}{dt}X_{\text{вых}}(t) + X_{\text{вых}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}(t);$$

$$T\left(\frac{X_{\text{вых}}(t+\Delta t) - X_{\text{вых}}(t)}{\Delta t}\right) + X_{\text{вых}}(t) = k \cdot X_{\text{вх}}(t);$$

$$X_{\text{вых}}(t+\Delta t) - X_{\text{вых}}(t) = \frac{\Delta t}{T}(k \cdot X_{\text{вх}}(t) - X_{\text{вых}});$$

$$\text{X}_{\text{вых}}(t) = \frac{k \cdot X_{\text{вх}}(t) - \frac{T}{\Delta t} X_{\text{вых}}(t-\Delta t)}{(\frac{T}{\Delta t}+1)}$$

Наша передаточная функция получается:

$$W(s) = K\text{им} * \frac{\text{Коу}}{TS+1}$$

Определим $К_{им}$ и $К_{оу}$ и $Т_{оу}$. Начнем с $К_{им}$. Предполагаем что оператор задает мощность насоса. На 100% длина хода плунжера изменится на 40мм. Тогда

$$K\text{им} = \frac{4\text{ см}}{100} = 0{,}04$$

Из справочника насос-дозатора НД 0,5Э 100/10 нашел что постоянное времени равно 12. Я нашёл коэффициент объекта управления с помощью подбор. И этот коэффициент равен 12, то есть $К_{оу}$=12.

Определили $К_{им}$ и $К_{оу}$ и $Т_{оу}$:

$$W(s) = 0{,}04 * \frac{1.012}{12S+1}$$

С помощью передаточной функции нашего объекта управления и исполнительного механизма, теперь мы можем смоделировать систему в среде Matlab Simulink и MWBridge.

Формулы для $\text{X}_{\text{вых}}(t)$ нам нужны для того чтобы в среде MWBridge MikBASIC смоделировать объект управления и исполнительного механизма. Будем записать параметры разностных уравнений, которые нашли. С помощью этих формул мы можем смоделировать дифференцирование. $X_{\text{вых}}(t-\Delta t)$ можем получить с помощью функции .VALUEOLD в среде MikBASIC.

Глава 3

Моделирование процессов в объекте управления в среде Matlab Simulink

3.1 Моделирование в среде Simulink

По идее оператор, как определили в предыдущем главе, задает подачу(ч/л) аммиака по месту пропорционально расходу подпиточной воды. Это означает что в схеме не будет обратной связи.

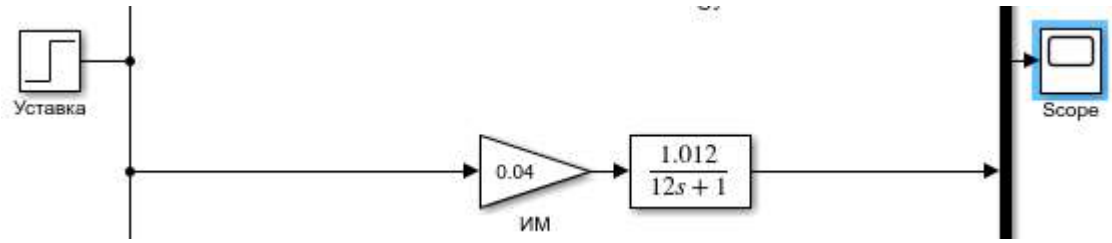


Рисунок 14 - Исполнительный механизм и объект управления в программе Simulink

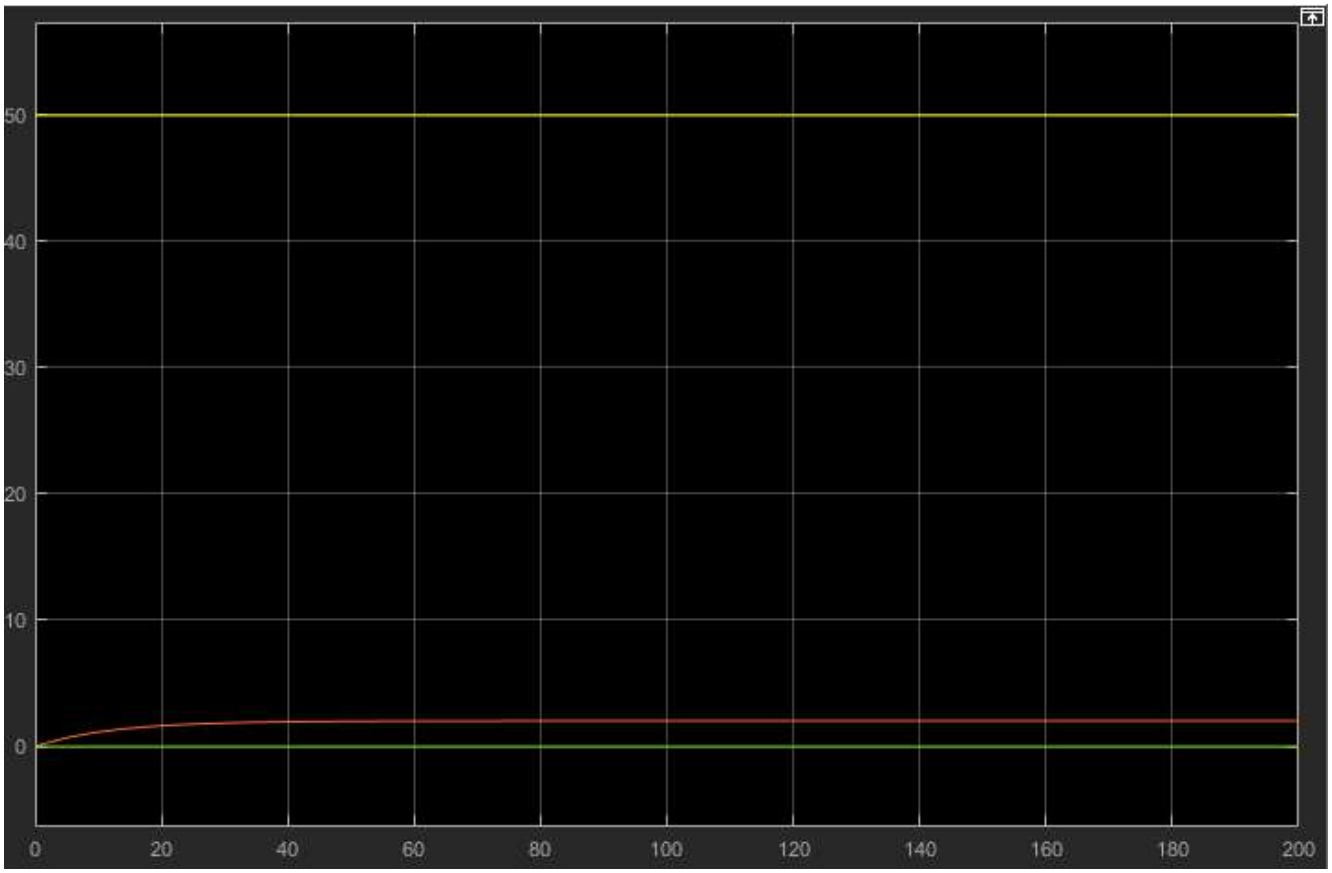


Рисунок 15 - График ИМ+ОУ в программе Scope

Из графика можно понять что для регулирование нам понадобится П-регулятор.

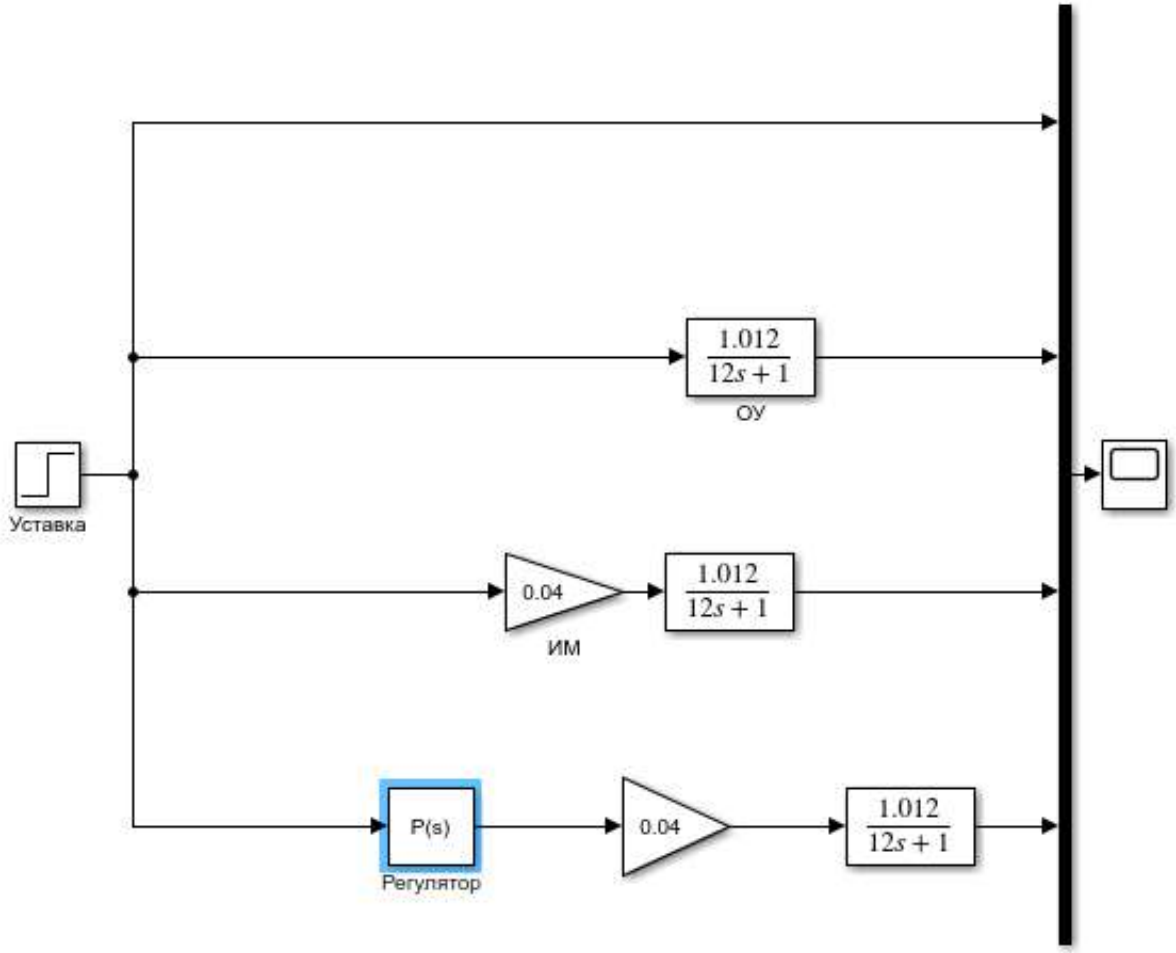


Рисунок 16 – Общий вид схемы

Чтобы проверить воздействия входного сигнала и изучить воздействию каждого объекта смоделировали в Simulink 4 линии сигнала. Первая линия представляет собой прямую связь уставки с Scope. Вторая линия представляет собой только объект управлению. В трет линию добавили исполнительный механизм. В четвёртую линию наконец-то добавили регулятор и теперь задав уставку, можем сравнить первую и четвёртую линию через Scope.

Через Mux объединили все линии в одно и теперь в одном графике можем их наблюдать.

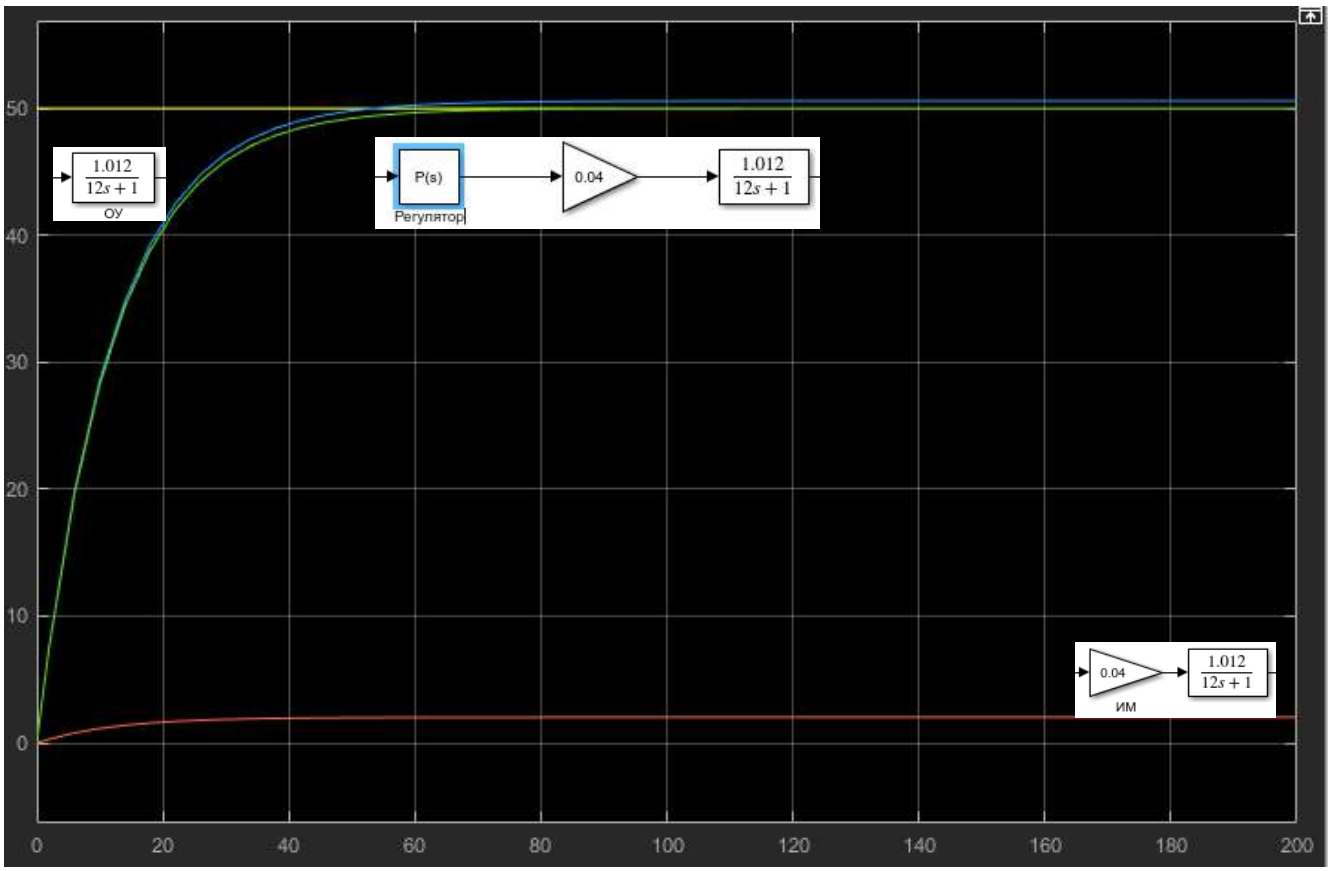


Рисунок 17 – Схема с регулятором в окне Scope

На рисунке оранжевым цветом изображен сигнал третьей линии. Голубым цветом нарисован сигнал второй линии. Желтым цветом изображён сигнал первой линии – уставка. Зелёным цветом изображён сигнал четвёртой линии.

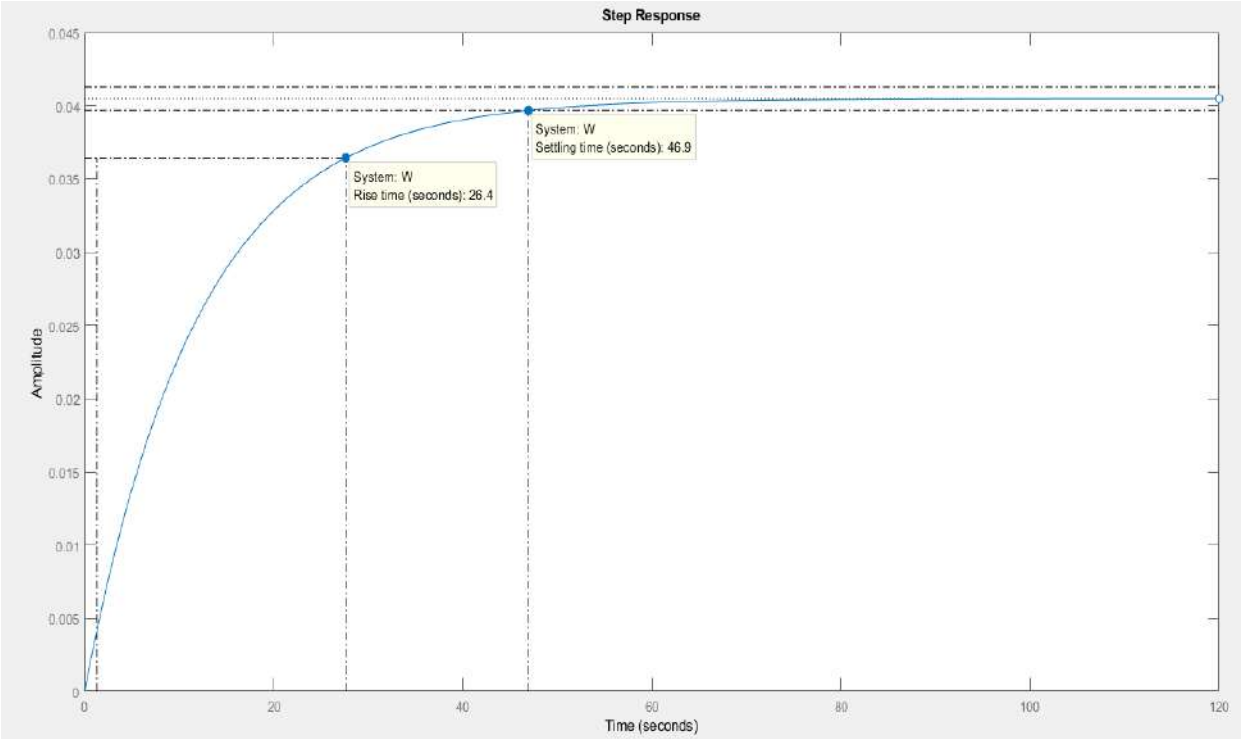


Рисунок 18 – Step Response ИМ+РО+ОУ

В рисунке 18 можно увидеть что rise time = 26.4 s, setting time = 45.9 s. В следующих графиках будем убедится что у них всех rise time и setting time похоже будет, как в теории.

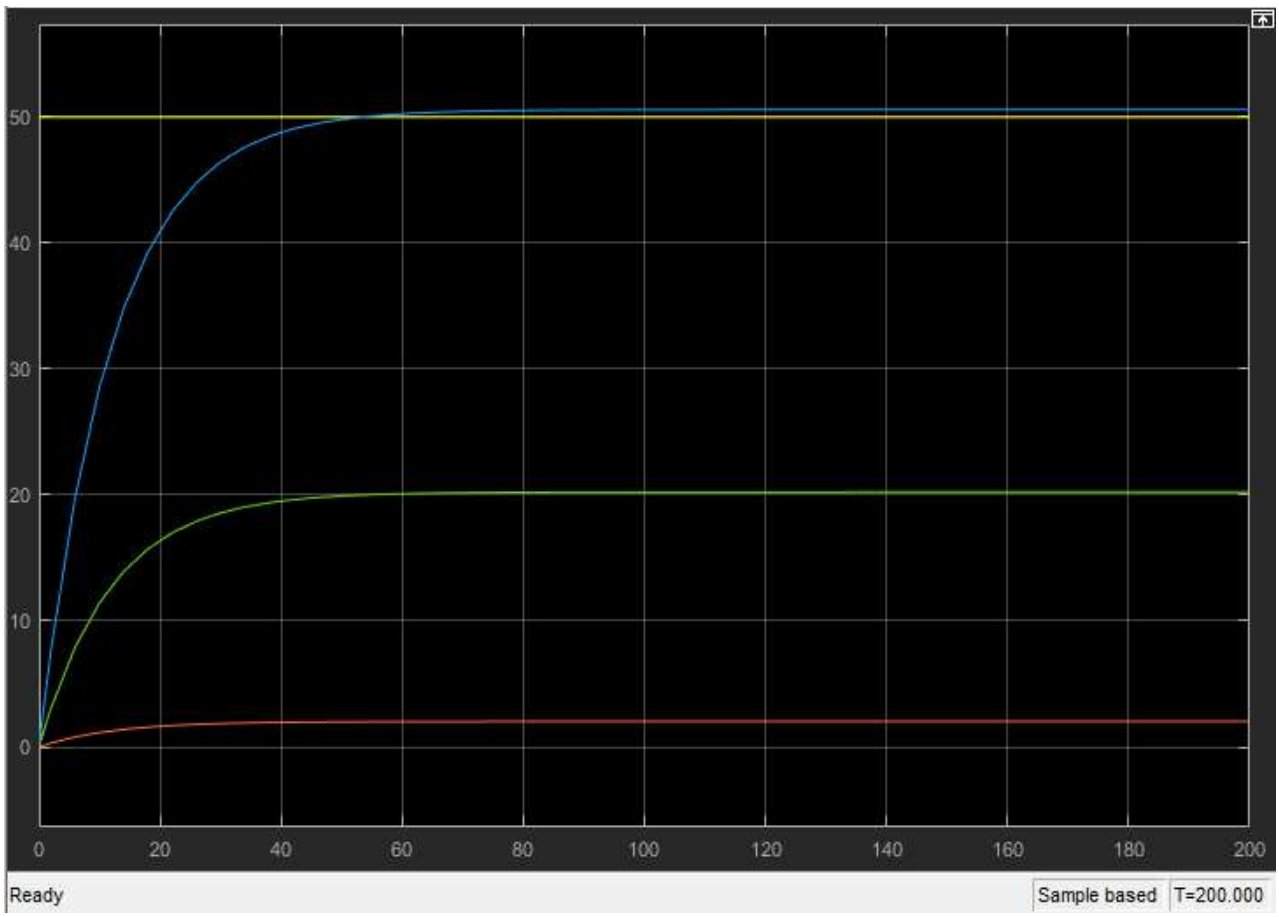


Рисунок 19 – Выходной сигнал в $K_{рег}$=10

На рисунке 19 с зелёным цветом изображён сигнал четвёртой линии когда коэффициент регулирования П-регулятора. Из графика можно понять что нужно увеличит коэффициент. Попробуем в величине $K_{рег}$=20, $K_{рег}$=27**.**

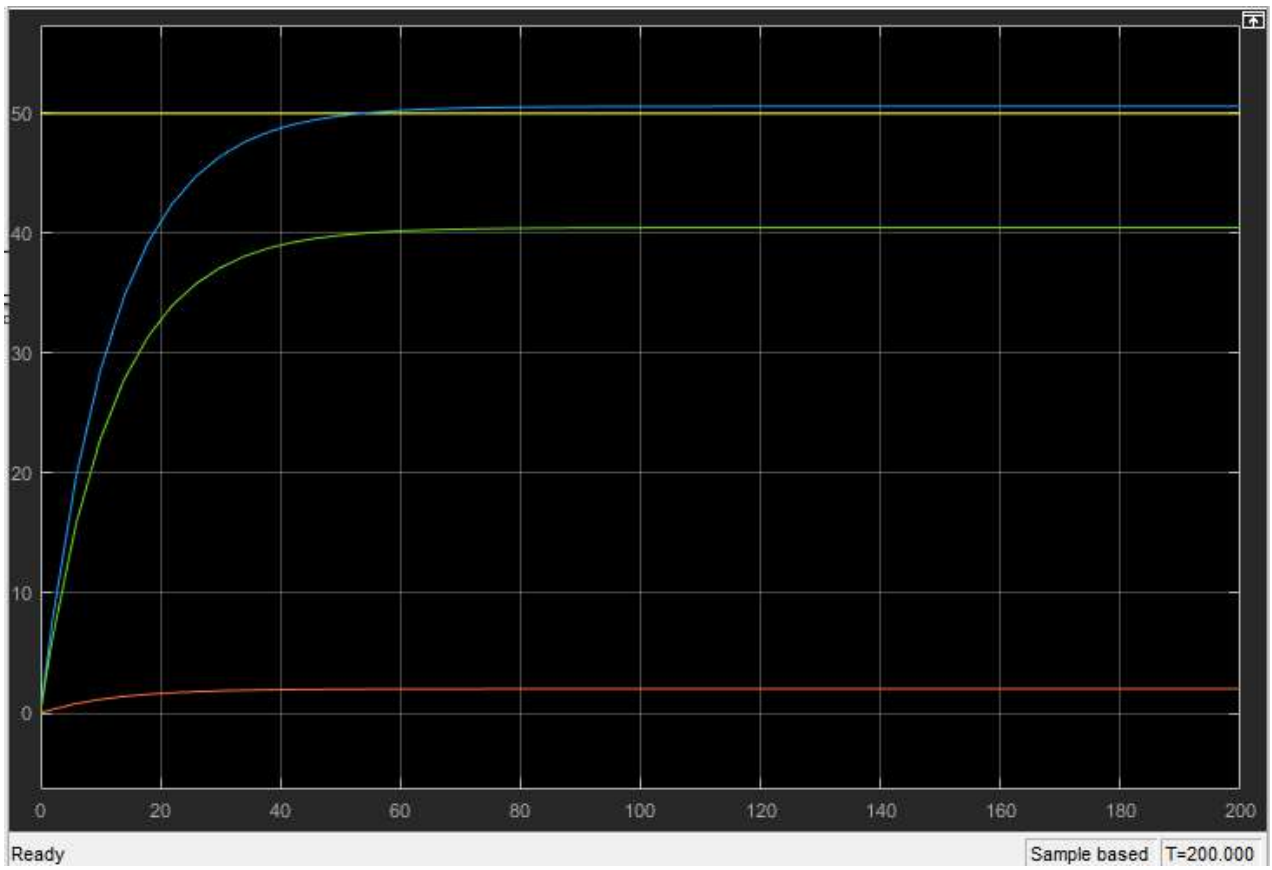


Рисунок 20 – Выходной сигнал в $K_{рег}$=10

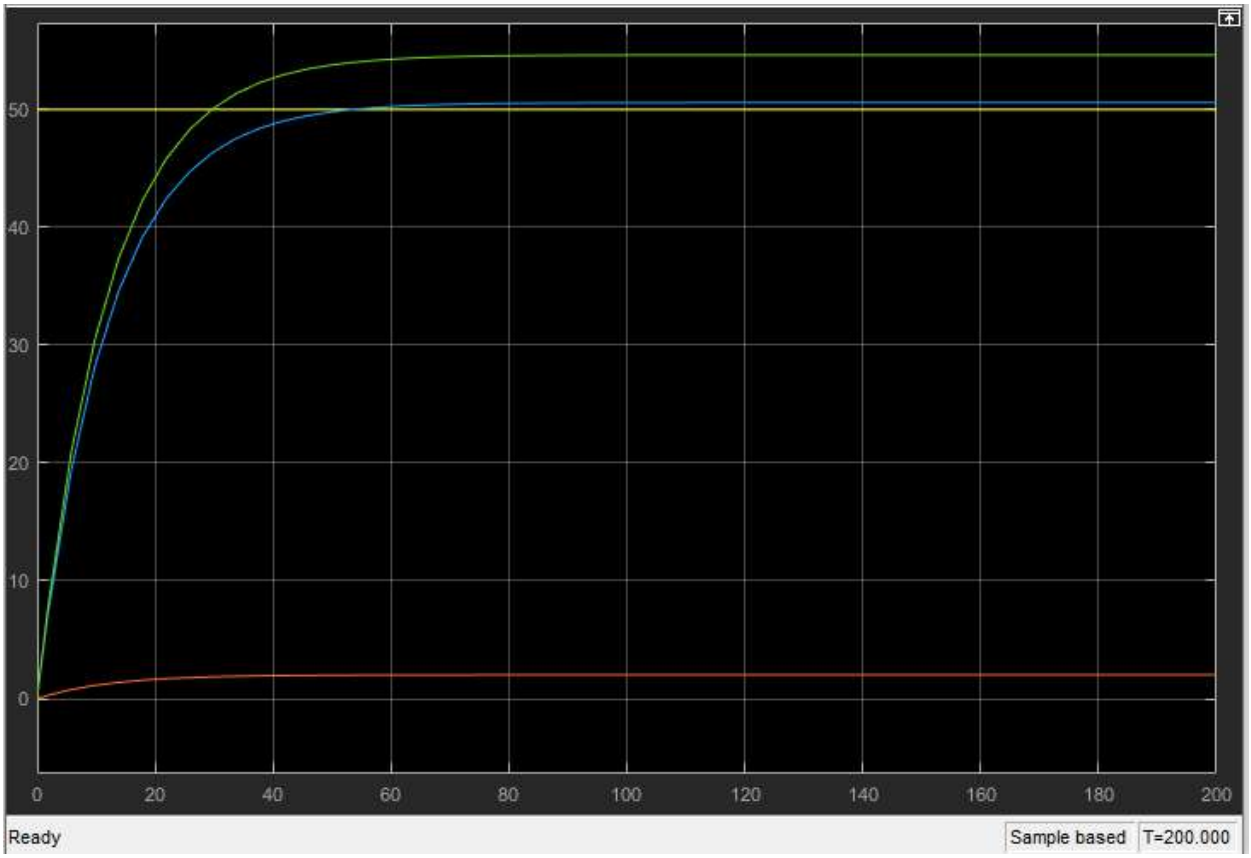


Рисунок 21 – Выходной сигнал в $K_{рег}$=27

Из графиков можно понять что величина которая мы ищем находится в интервале (25;27). Подобрав величин как делали раньше, найдём величину $\mathbf{K_{рег}}$ которую сигнал уставки и выход объекта управления были одно и тоже через settiting time.

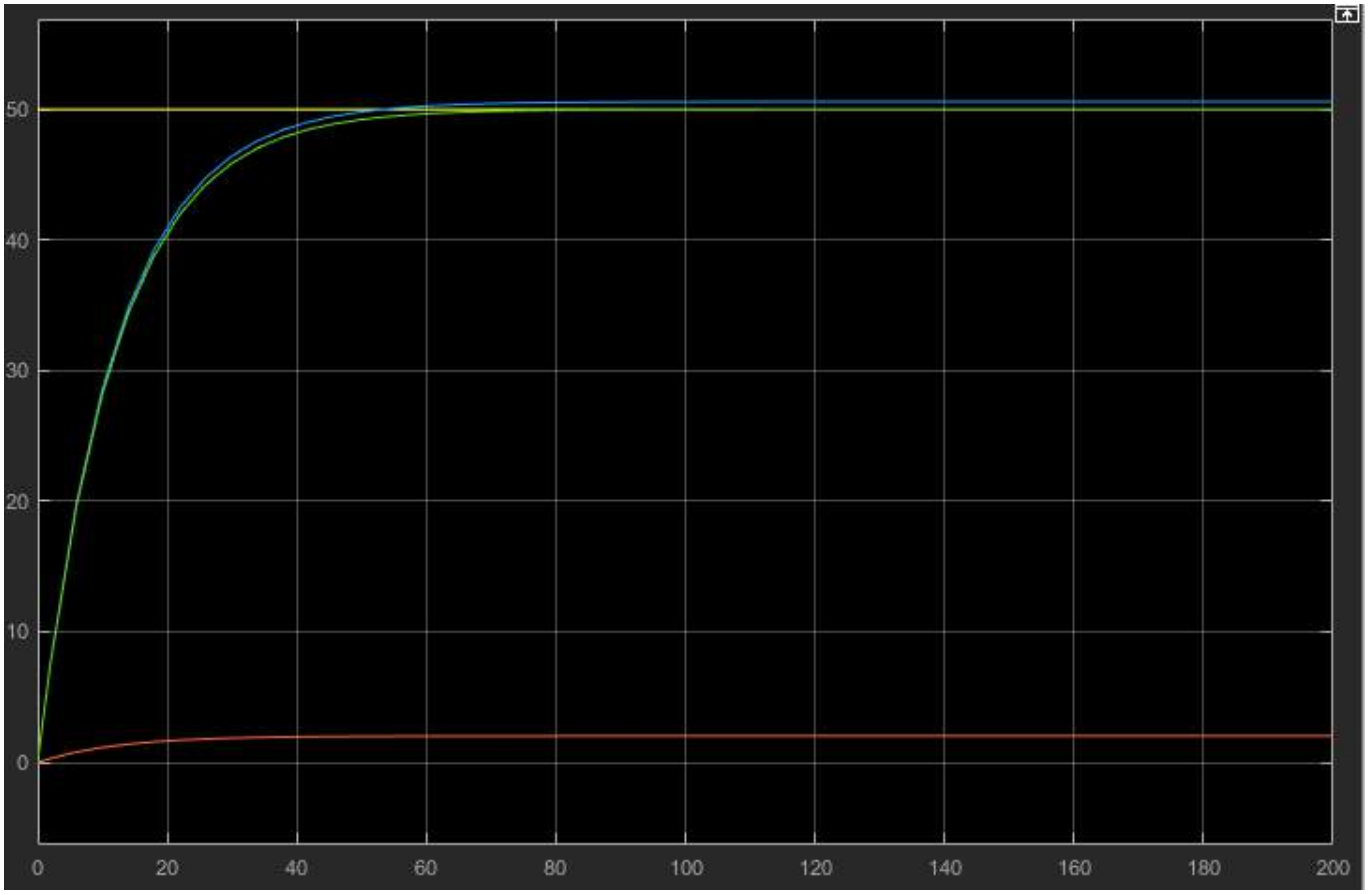


Рисунок 22 – Выходной сигнал в $K_{рег}$=24,705

Через подбор нашли значения $\mathbf{K_{рег}}$ который нужен для регулировании. Из графика можно убедится что через 60 секунд выходной сигнал равняется с уставом. Это означает что наш П-регулятор должен иметь коэффициент регулирования равной 24,705.

Глава 4

Модель регулирования в реальном времени в среде MWBridge

4.1 Программа MikBASIC базы данных реального времени MWBridge

В этом случае используется передаточная функция по концентрации аммиака в теплоносителе в MWbridge с помощью программы MikBasic:

$$W(s) = 0.04 * \frac{1.012}{12S + 1}$$

Запишем параметры разностных уравнений, которые нашли в MWbridge по очереди:

$$W(s) = 0.04 * \frac{1.012}{12S+1}$$

В программе определим переменные модели и системы управления следующим образом:

- A[2] – К_ИМ, коэффициент передачи исполнительного механизма,
- A[5] – коэффициент пропорциональности для ОУ,
- A[0] – dt , время ОУ,
- A[10] – включение и выключение системы (onn off) ,
- A[11] – вход ИМРО, вход в исполнительный механизм,
- A[12] – выход ИМРО, выход от исполнительного механизма
- A[13] – $К_{рег}$, коэффициент регулирование,
- A[21] – вход ОУ , вход объекта управления
- A[22] – выход ОУ , выход объекта управления,
- A[25] – К, пропорциональное составляющее,
- A[26] – Т, постоянное времени,
- A[27] – Т_вызова, период вызова,

После этого получаем следующую таблицу значений:

УСО Сеть Алго Алго ВУ ТЭП Мнемосхемы Документы Просмотр трендов

Пользовательские профили | Настройки | Основные | Сеть/УСО | Тренды | WEB | Время | [] Такт БД,ms: 1002|приём: 0|переда

Основные | Значения | Усреднения | Все | Уставки | Статусы | Синхронизация НСИ

Номер	Название	Описание	Посл.Зна...	Статус	Время об...	Источник	Таймаут
A0	dt	время ОУ	1002	0	21:44:48.528	Такт работ...	60000
A1			10	0	21:44:49.006		10000
A2	К_ИМ	коэффиц...	0.04	0	21:44:49.006		0
A3			###	38	03:00:00.000		0
A4			###	38	03:00:00.000		0
A5	коэффиц...	коэффиц...	1.012	0	21:44:49.006		0
A6			12	0	21:44:49.006		0
A7			###	38	03:00:00.000		10000
A8			###	38	03:00:00.000		10000
A9			###	38	03:00:00.000		0
A10	on/off	включени...	###	38	03:00:00.000		0
A11	входИМРО	вход в ис...	10	0	21:44:49.006		0
A12	выходИМ...	выход от ...	4	0	21:44:49.006		0
A13	Крег	коэффиц...	###	38	03:00:00.000		0
A14		коэффициент регулирование			###		60000
A15			###	38	03:00:00.000		60000
A16			###	38	03:00:00.000		60000
A17			###	38	03:00:00.000		60000
A18			###	38	03:00:00.000		60000
A19			###	38	03:00:00.000		60000
A20			###	###	###		60000
A21	входОУ	вход объе...	4	0	21:44:49.006		0
A22	выходОУ	выход об...	4.04797	0	21:44:49.006		0
A23			###	###	###		60000
A24			###	###	###		60000
A25	К	пропорци...	1	0	21:39:37.961		0
A26	Т	постоянн...	1	0	21:39:38.963		0
A27	Т_выова	период в...	1	0	21:39:39.967		0
A28			###	38	03:00:00.000		0
A29			###	###	###		60000
A30			###	###	###		60000
A31			10	0	21:44:49.006		0

A
D
Статистика
Вычисления
MikBASIC

Группы

Навигация

<< < > >>

Номер:

A000 D000 D999

-1 -10 -100 +1 +10 +100

Редактирование

Копир. Встав. С A0

Вырез. Отмена По A0

Поиск

Замена

Искать в отмеченном

Искать Поиск и замена

Настройки просмотра

Открывать с места последнего просмотра

Запомнить позицию

Рисунок 23 – Окно БД в MWBridge

Значения таймаут изменили на 0 чтобы значения ячеек который мы заполнили. И можно наблюдать что время обновления ячеек которые заполняется автоматически изменяется со временем на более свежую дату.

Для удобства, создал группу из ячеек 31, 32 и 33 чтобы наблюдать через трендов.

MikBASIC

```
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[11].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[12].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[12].VALUEOLD = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[21].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[22].VALUE = 0
IF A[10].VALUE = 0 THEN A[32].VALUE = 0

A[1].VALUE = 10
rem уставка - A[31]
A[31].VALUE = A[1].VALUE
rem  K1_ин
A[5].VALUE = 1.012
rem  T1_ин
A[6].VALUE = 12
rem K_им_ро
A[2].VALUE = 0.04
rem A[3] - dt
rem A[3].VALUE = A[0].VALUE / 1000
rem вход ИМРО
rem выход рег A[32]
rem A[11].VALUE = A[11].VALUE
rem выход  ИМРО
A[12].VALUE = A[2].VALUE * A[11].VALUE * A[13].VALUE
rem A[21] - вход ОУ
A[21].VALUE = A[12].VALUE
rem A[22] - выход ОУ
A[22].VALUE = (A[5].VALUE * A[21].VALUE + (A[6].VALUE * A[22].VALUEOLD/0.1)) / (
A[33].VALUE = A[22].VALUE
```

Принять изменения

ProgBuilder

{}
IF
ELSE
GOTO
FOR
GOSUB
GOSUB
RETURN
SHELL
REM
BEEP
END
PLAYSOUND
RND
PI
A[0].VALUE
A[0].STATUS
A[0].TIMEOU
A[0].SOURCE
A[0].DRIVE
A[0].VALUEO
A[0].STATUS
A[0].SPEED
A[0].CODE
A[0].FCODE
MSEC
SEC
MIN
HOUR
DAY
MON

Время выполнения программы, мсек 0

Текущая строка редактирования 1

Рисунок 24 – Код MikBasic

При помощи реализованной программы проведем исследование обьекта управления и системы управления при различных настроечных параметров системы управления.

4.2 Синтез регулятора в среде программирования АлгоВУ

Система программирования на языке алгоблоков разработана для создания пользовательских процедур, которые исполняются программой MWBridge в режиме реального времени. Каждый алгоблок представляет собой набор двоичных данных, определяющих операцию, включая операнды, результат исполнения, тип операции, условия выполнения и использования операндов, а также логический результат выполнения операции. Дополнительные флаги указывают на режимы использования этих данных.

Процедуры представляют собой последовательные наборы алгоблоков, которые исполняются друг за другом. Их выполнение осуществляется по специальному циклическому алгоритму, который разделяет время на циклы обхода. Циклы обхода определяются оператором на этапе конструирования алгоблоков и формируют первые процедуры. Первая процедура всегда существует и составляет быстрый цикл обхода, который безусловно исполняется на каждом такте работы ядра реального времени.

Для организации вычислительного процесса оператору предоставляется алгоблок "Цикл Переход на предыдущий цикл обхода", который позволяет прервать выполнение текущего цикла обхода и перейти к исполнению предыдущего цикла обхода. Этот алгоблок может быть сделан условным, позволяя изменять алгоритм организации вычислительного процесса во время работы программы.

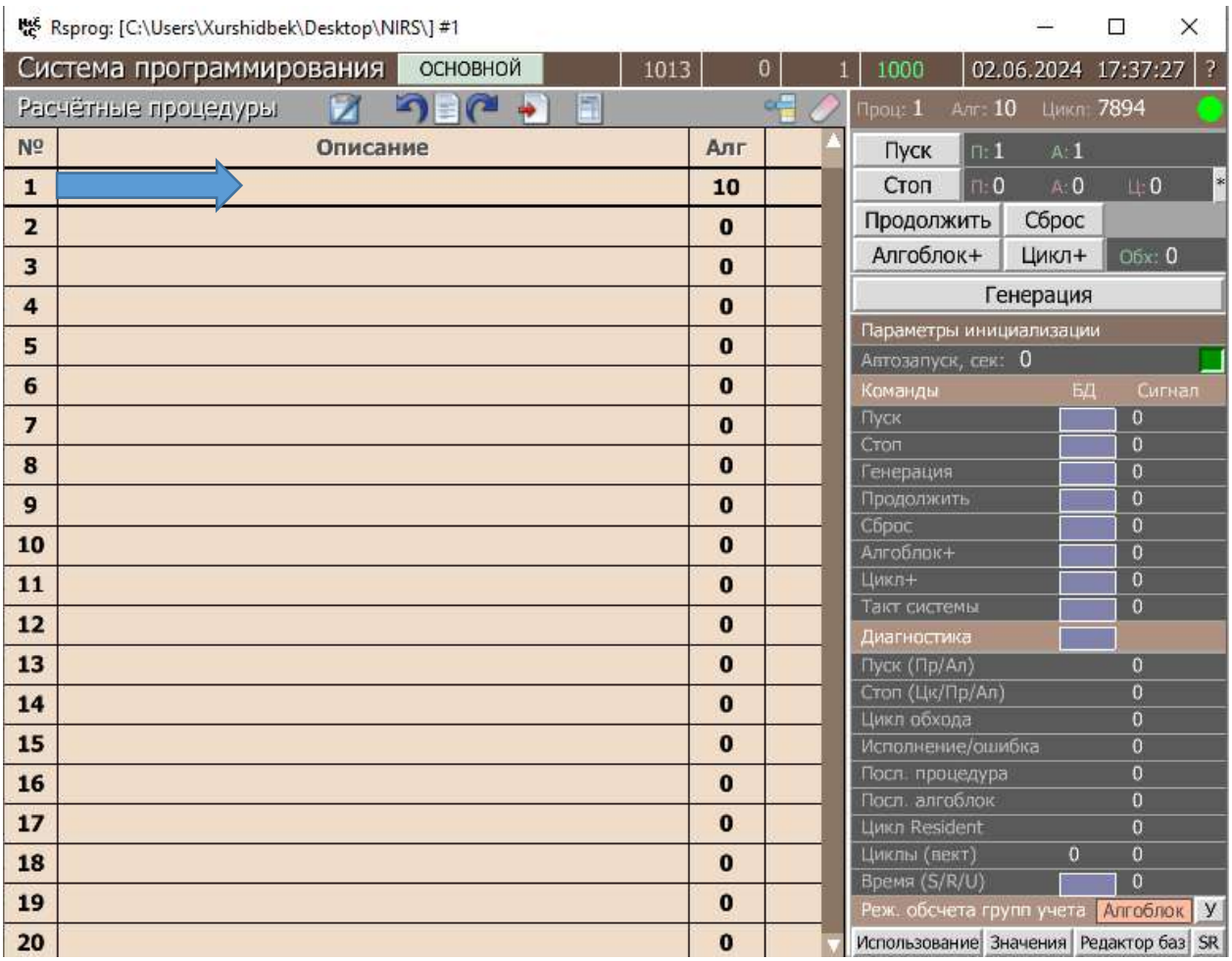


Рисунок 25 – Окно Rsprog1

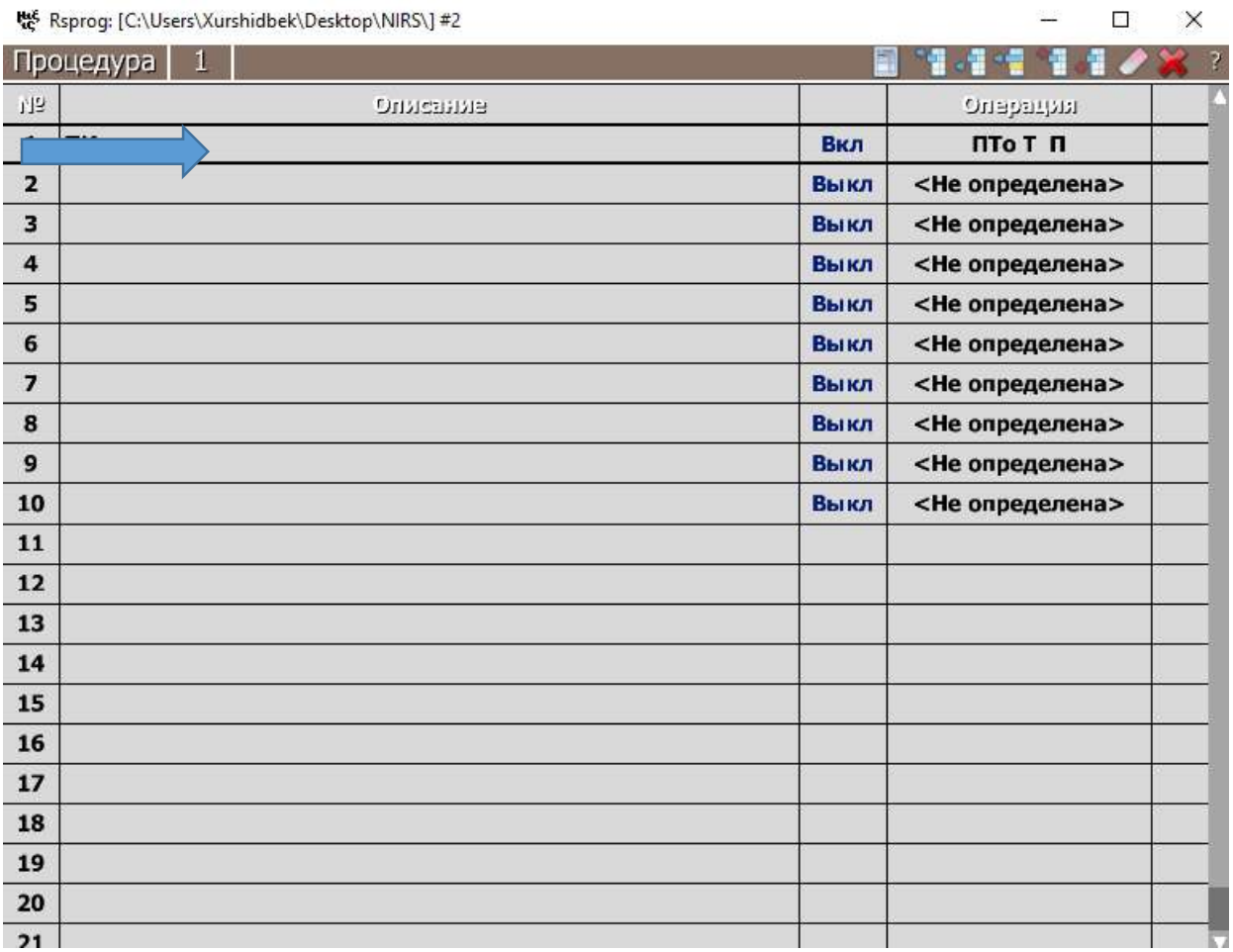


Рисунок 26 – Окно Rsprog2

Этот регулятор имеет выход на пропорциональный исполнительный механизм и следующие параметры:

- Параметр 1: пропорциональная составляющая.

- Параметр 2: постоянная времени объекта (в секундах).

- Параметр 3: вторая постоянная времени объекта (в секундах).

Он оперирует следующими операндами:

- Операнд 1: уставка.

- Операнд 2: регулируемая величина.

Условия операнда 1 включают:

- Режим работы регулятора (0 - ручной, 1 - автоматический).

- Флаг расчета такта регулирования по постоянному времени объекта.

- Управление идентификацией объекта (включение алгоритма идентификации, включение коррекции параметров регулятора, включение режима Пауза).

Условие операнда 2 включает:

- Режим безударного включения.

- Флаги учета возмущения.

Этот регулятор предназначен для использования в автоматических системах регулирования и обладает широким набором параметров для настройки и управления процессом.

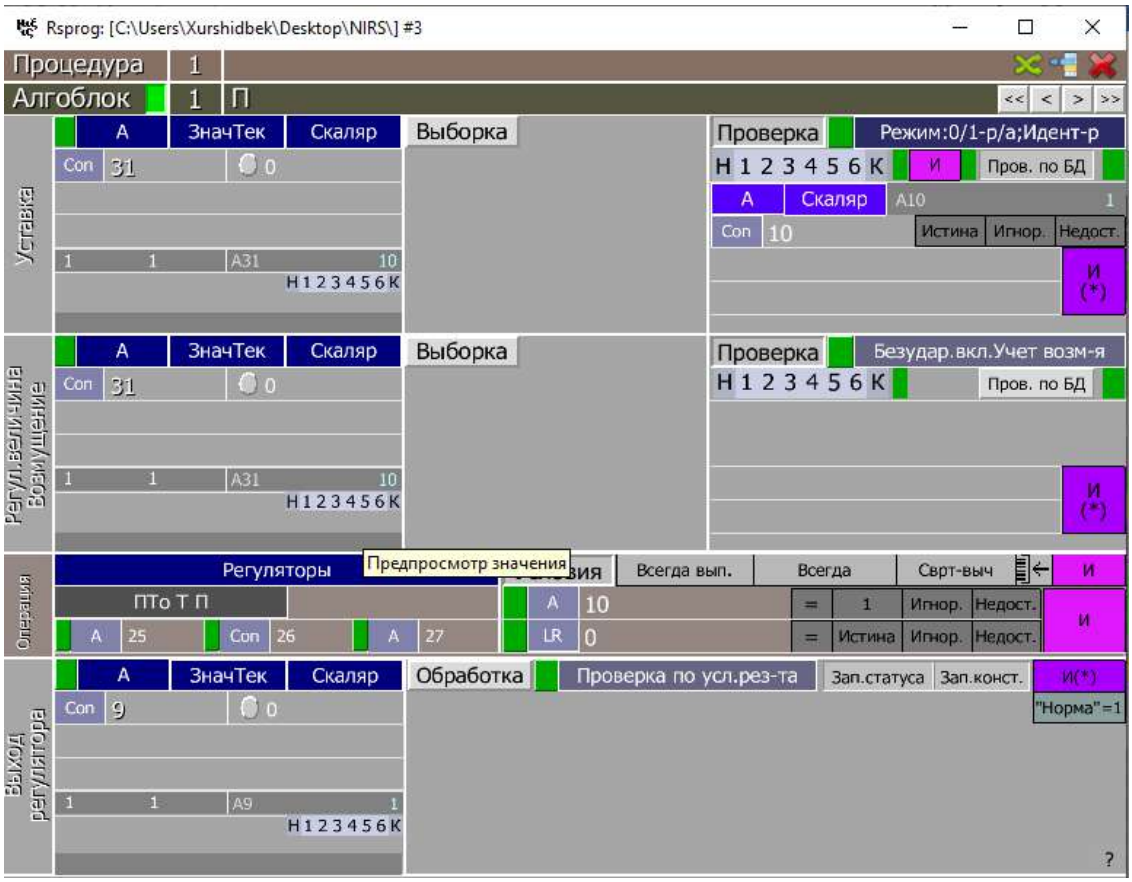


Рисунок 27 - Окно Алгоблока; регулятора

4.3 Настройка и исследование влияния регулятора на качество регулирования

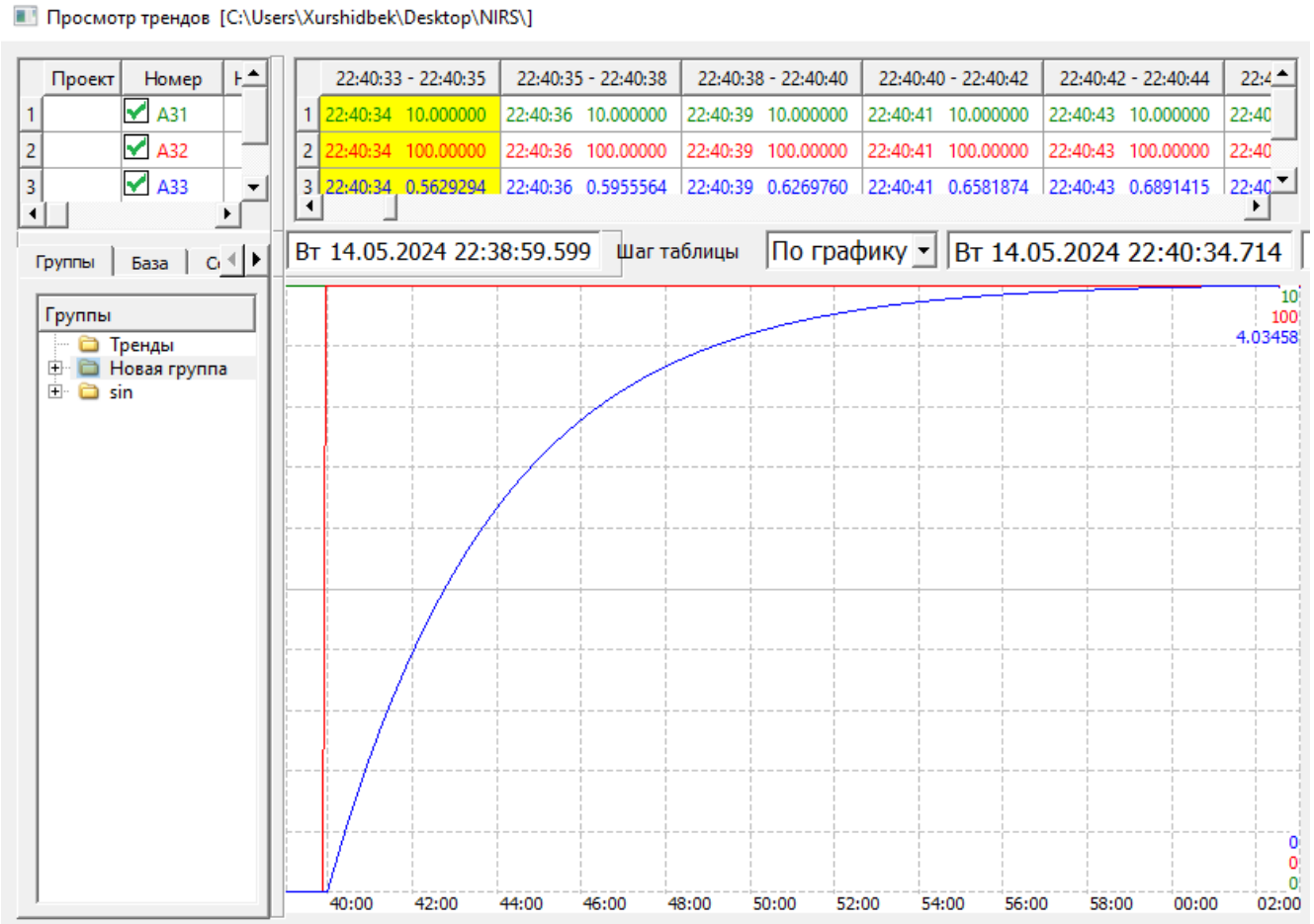


Рисунок 28 – Вид трендов в $K_{рег}$=10

В MWBridge как в Simulink получили график когда значения коэффициента регулирования равен 10. Это график похоже на график в Simulink. Только здесь все происходить в реальном времени. И форма графика похоже на то что была в Simulink. Это означает что правилно транслировали передаточную функцию в MikBASIC.

Попробуем в разных значениях $\mathbf{K_{рег}}$. И обращаем внимания на конечную значению выхода объекта управления.

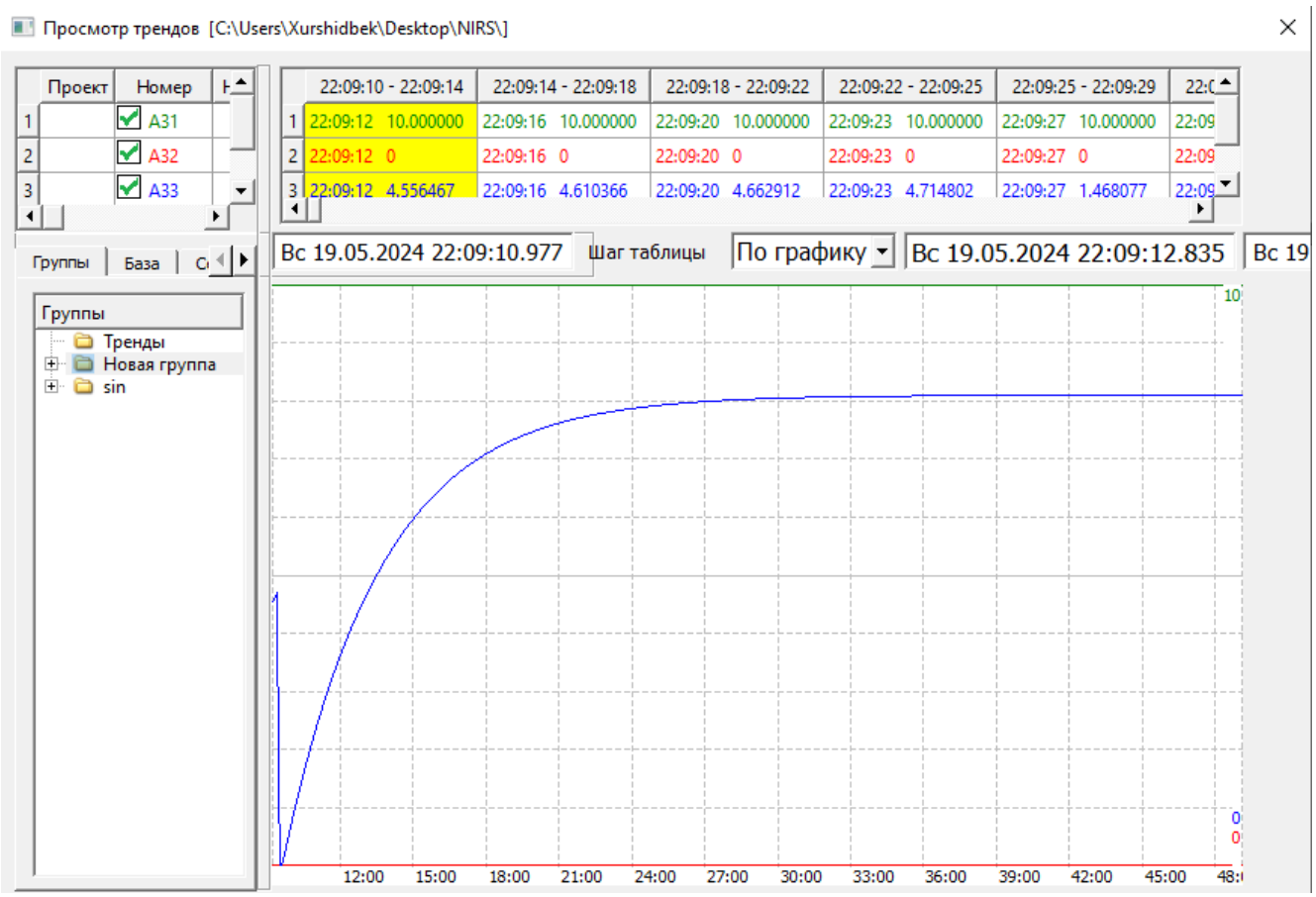


Рисунок 29 – Вид трендов в $K_{рег}$=20

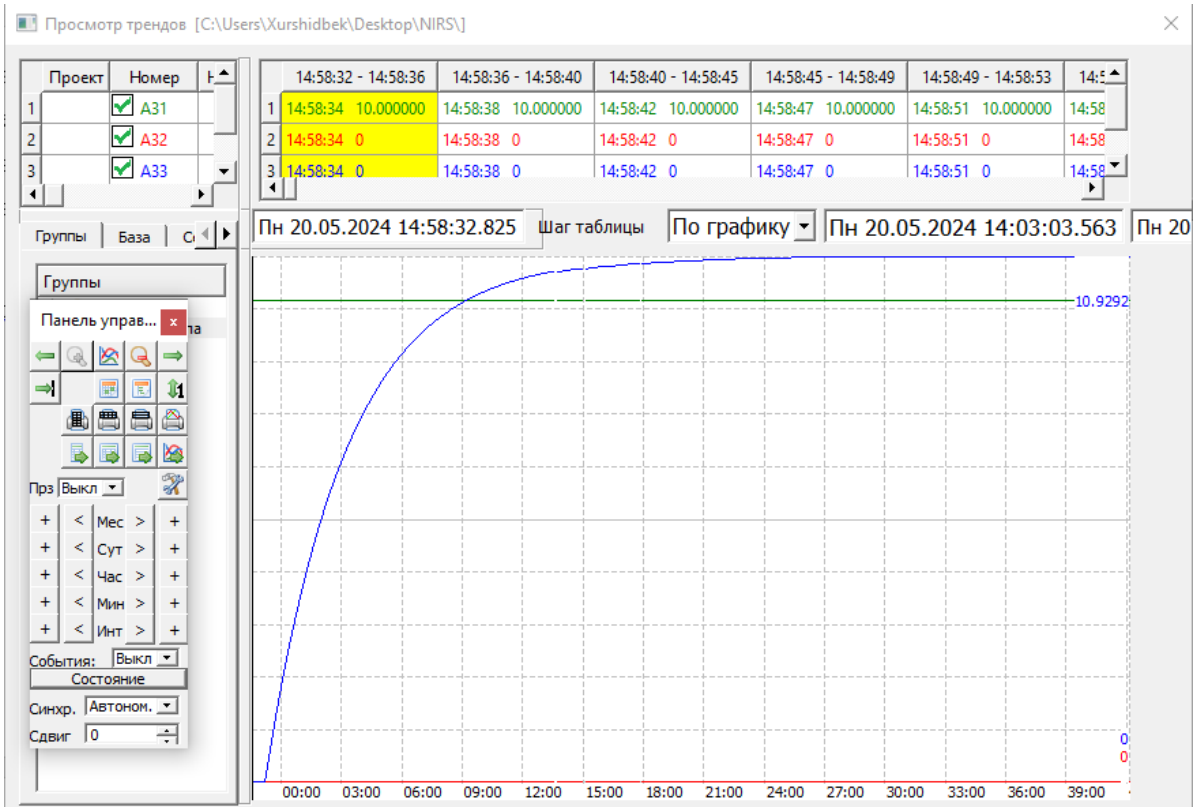


Рисунок 30 – Вид трендов в $K_{рег}$=27

Как видно из рисунков, в значении 27 конечная величина выходного сигнала объекта управления больше чем сигнал уставки. Повторили процесс ещё несколько раз чтобы убедиться.

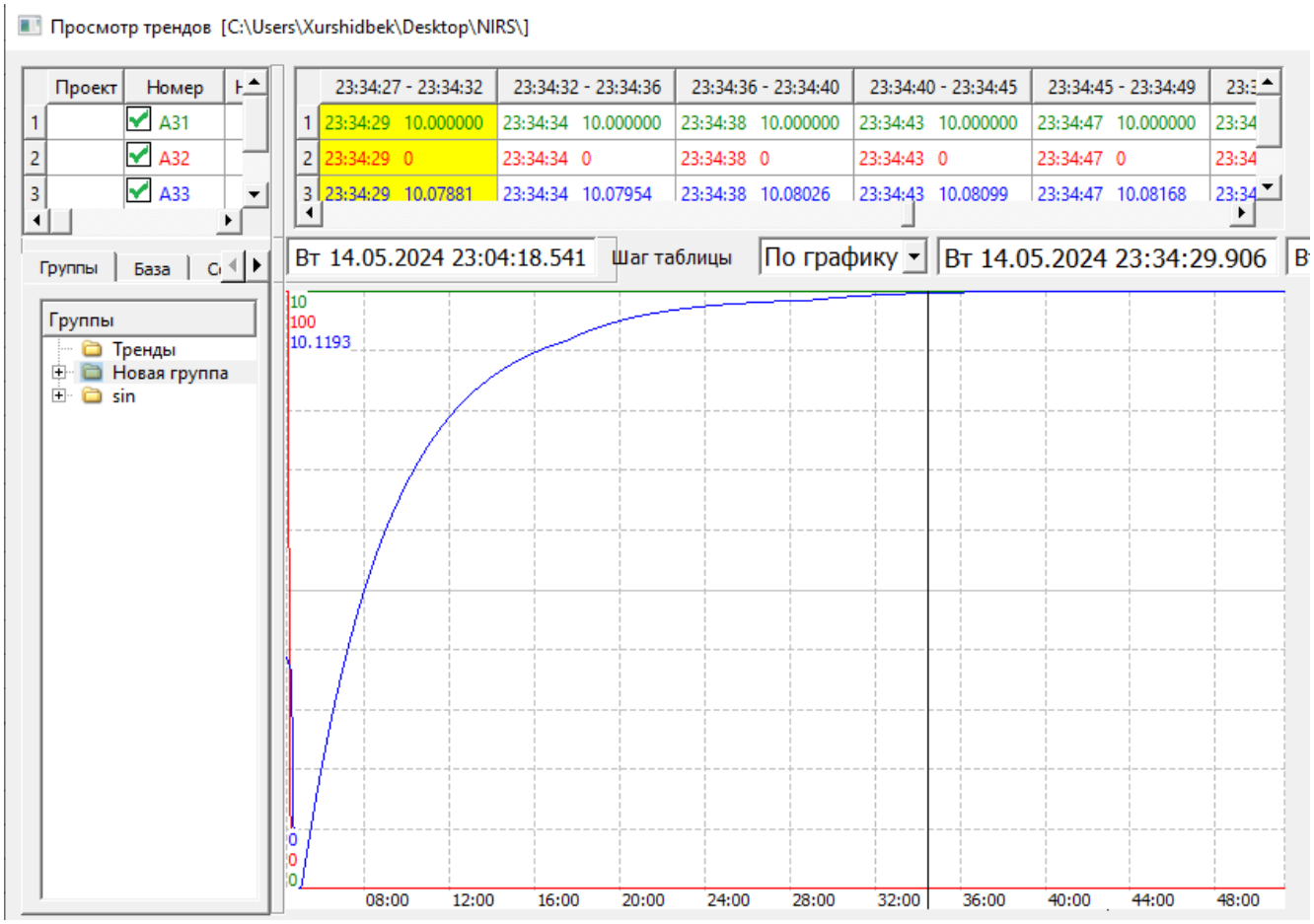


Рисунок 31 – Вид трендов в $K_{рег}$=24,705

Как видно в графике, конечная значения зелёной и голубой линий со временем уравняется и станет ближе к 10. Это означает что теперь в значении 24.7 регулятор правильно перерабатывает сигнал.

4.4 Человеко-машинный интерфейс

Для удобства использования системы разработан человеко-машинный интерфейс (ЧМИ).

Система отображения Display (далее – программа) предназначена для графического отображения технологических параметров, сигнальной и иной информации, осуществления контроля и управлениями.

Программа включает в себя следующие функциональные системы:

– графическое ядро;

– редактор мнемосхем и настроек;

– система безопасности.

Графическое ядро реализует функции отрисовки элементов отображения и мнемосхем. Графическое ядро работает, используя аппаратное ускорение посредством библиотеки OpenGL

На рисунке представлена привязка кнопки «ВКЛЮЧИТЬ – ОТКЛЮЧИТЬ» к БДРВ. Кнопке назначены действия: включение и отключение системы.

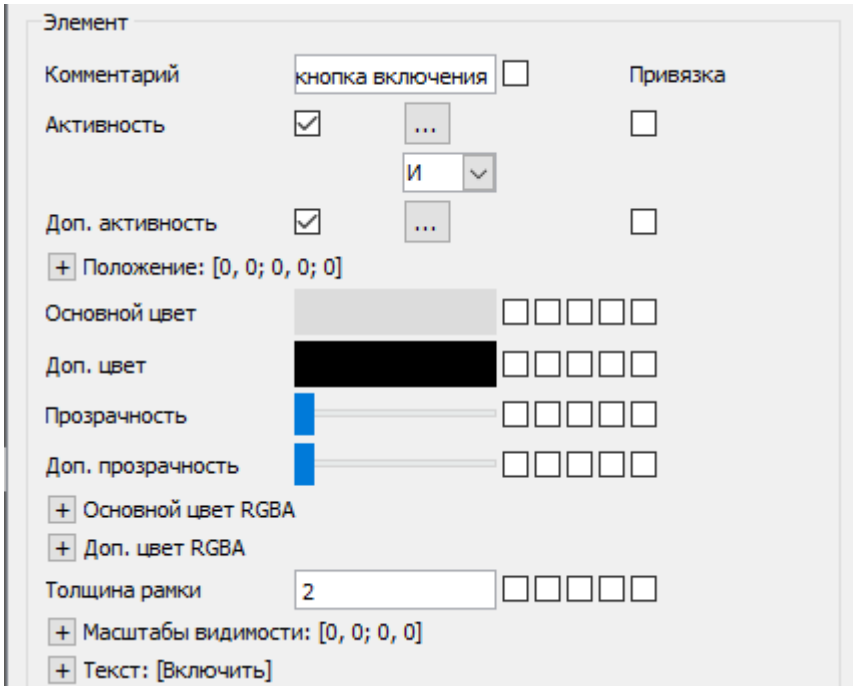


Рисунок 32 – Свойства кнопки “Включить” - 1

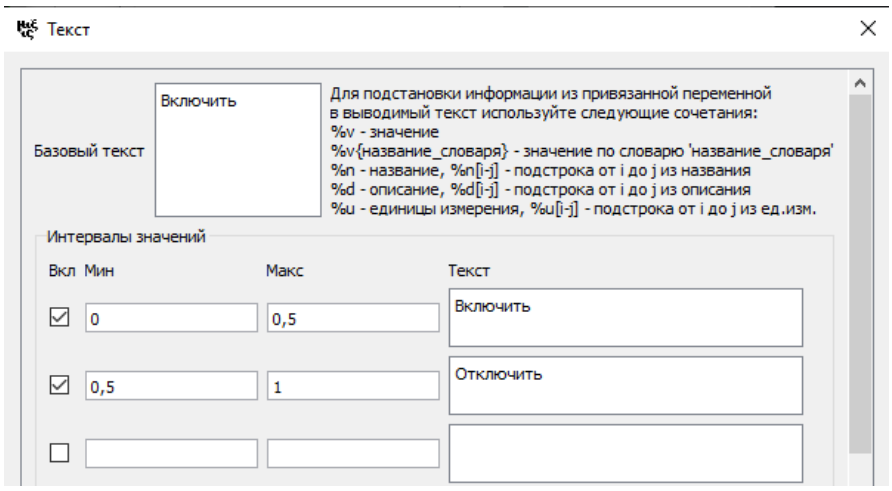


Рисунок 33 – Свойства кнопки “Включить” - 2

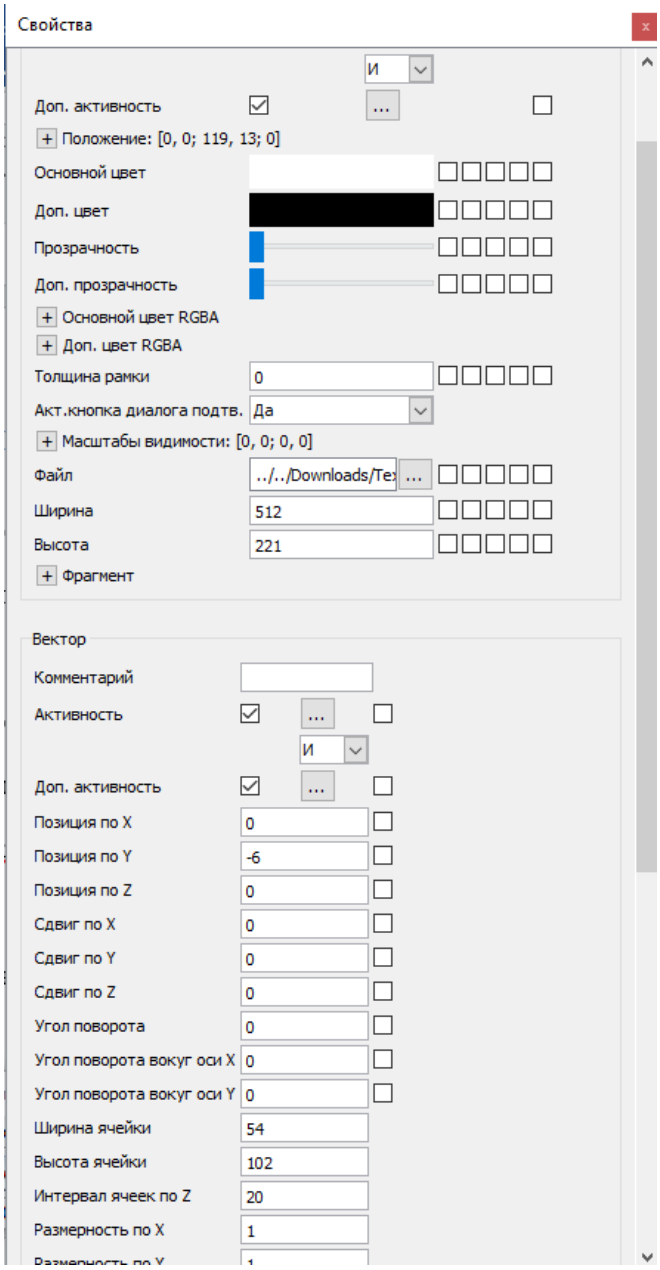


Рисунок 34 – Свойства рисунка насоса

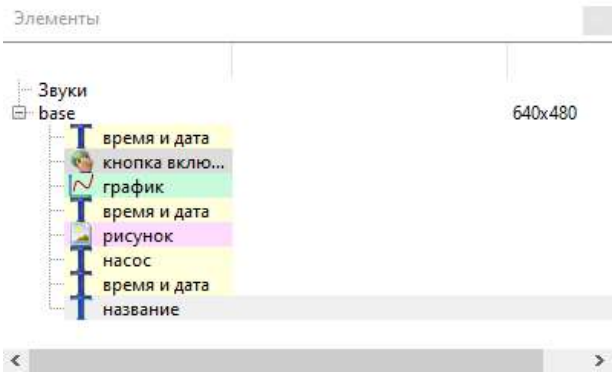


Рисунок 35 – Все объекты ЧМИ

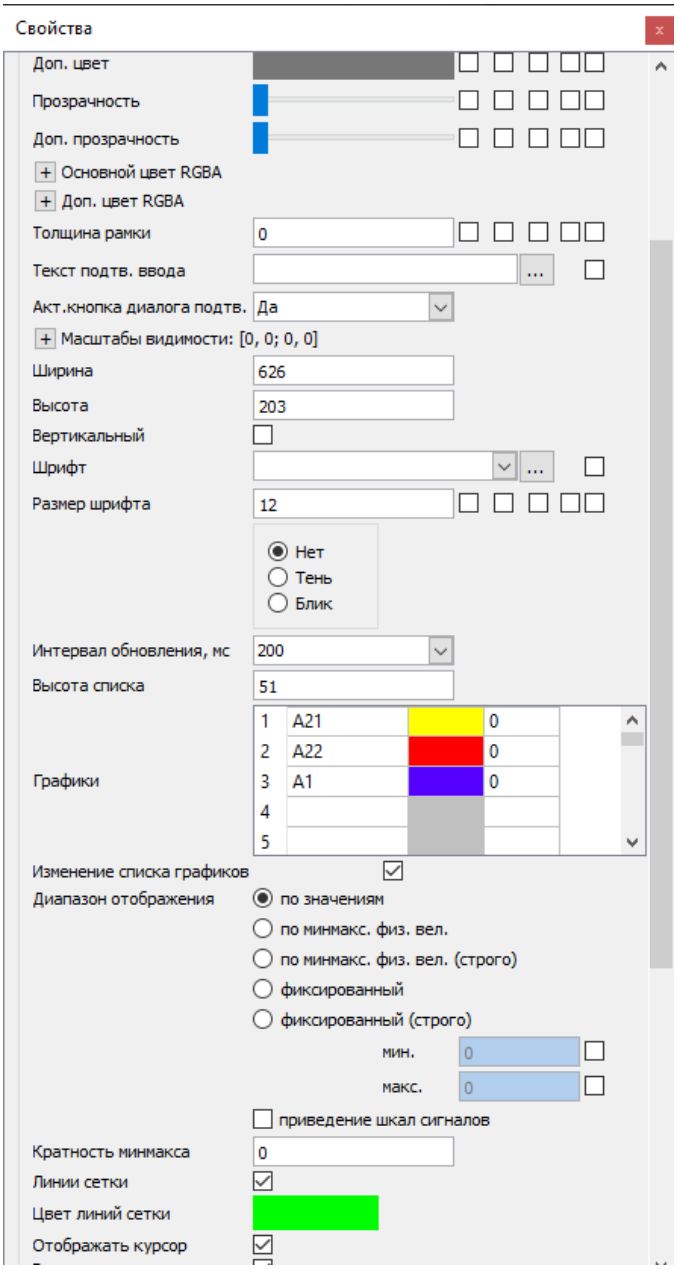


Рисунок 36 – Свойства Самописи

Рисунок 38

На рисунке 38 представлен график, который мы получили при k = 10 (коэффициент пропорциональности).

Рисунок 39

На рисунке 39 представлен график, который мы получили при k = 20 (коэффициент пропорциональности).

Рисунок 40

На рисунке 40 представлен график, который мы получили при k = 30 (коэффициент пропорциональности).

Рисунок 41

На рисунке 41 представлен график, который мы получили при k = 25 (коэффициент пропорциональности).

Рисунок 37

На рисунке 37 представлен график, который мы получили при k = 24,7 (коэффициент пропорциональности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования и моделирования системы управления регулятора ТВС-01 концентрации аммиака в теплоносителе ВВЭР-1000 была изучена техническая документация на систему, подобраны коэффициенты передаточной функции модели, необходимые для построения системы разностных уравнений, а также была изучена документация на программно-технический комплекс и систему реального времени для реализации результатов моделирования.

Для осуществления проверки правильности Наша система была реализована в Matlab, в MWBridge была сформирована база данных, а также написан алгоритм в MikBasic. После этого началось исследование регулирующей системы. Сначала было определено, где расположена исследуемая система, из каких частей состоит исполнительный механизм, регулирующий орган и с помощью изменения каких параметров возможно регулировать объект управления. В Р регуляторе, благодаря изменению коэффициента пропорциональности, мы пришли к идеальному режиму работы регулятора концентрации аммиака для поддержания требуемого уровня pH в теплоносителе. В программе Display были созданы системы и графики. Display был синхронизирован с MWBridge, поэтому были получены идентичные графики.

Рассмотрены графики для регулирования концентрации аммиака в теплоносителе при разных значениях коэффициента пропорциональности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.Б.М.Рощектаев Водно -Химический режим аэс с реакторами ввэр-1000 и рбмк-1000 / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Б.М.Рощектаев 2010 – 132с.

2. Б.М .ЛАРИН , Е.Н.БУШУЕВ Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС [Электронный ресурс] / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — 310с

3. MWBRIDGE / MLB. Руководство пользователя. – Москва :Умикон. – 246 с.

4. Зверков, В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС / В. Зверков. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2013. – 558 с.

5. Денисов В.П, Драгунов Ю.Г Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций 2002- 480 с.

6.И.Я. Емелянов, В.И.Михан, В.И.Солонин конструирование ядерных реакторов 1982. 400 с.

7. Кишкин, В. Л. Руководство пользователя САПР GET-TM. №142-08/63-02. / В. Л. Кишкин. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики. – 2008. – 151 с.

8. Аксенов, В. Автоматизированные системы управления технологическим процессом атомных электростанций / В. Аксенов, С. Батраков, В. Василенко. – Москва : Издательство Политехнического университета, – 2007. – 309 с.