ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Певчева Елена Викторовна

Повышение эффективности электротехнического комплекса тепличного комбината

Специальность: 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент
Доманов В.И.

Ульяновск 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЧНОГО КОМБИНАТА 12

1.1 Источники энергоресурсов 12

1.2 Потребители электроэнергии 17

1.3 Особенности работы когенераторного энергоцентра 26

Выводы по первой главе 35

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЦЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ 37

2.1 Сезонность 37

2.2 Структура энергоресурсов (электроэнергия, газ, вода) 39

2.3 Оценка долевой составляющей потребителей энергоресурсов 42

2.4 Оценка энергопотребления по группам оборудования (нагрев, освещение) 45

2.5 Система искусственного досвечивания 46

2.6 Возможные пути улучшения микроклимата теплицы 49

2.7 Компенсация инерционности нагрева теплицы 54

Выводы по второй главе 63

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 64

3.1 Анализ работы системы с форсированием нагрева 64

3.2 Синтез системы регулирования температуры 72

3.3 Анализ работы системы стабилизации температуры теплицы при действии случайных сигналов 82

3.4 Структура системы регулирования температуры теплицы при цифровой технической реализации 87

3.5 Дискретные передаточные функции непрерывной части системы регулирования температуры теплицы с учетом экстраполятора нулевого порядка 89

Выводы по третьей главе 95

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЧНОГО КОМБИНАТА 96

4.1 Практические аспекты внедрения 96

4.2 Анализ результатов натурных экспериментов 99

4.3 Анализ влияния дискретизации по времени на работу системы обогрева теплицы при случайных возмущениях 105

4.4 Анализ влияния дискретизации по времени и амплитуде на работу системы обогрева теплицы 108

4.5 Анализ работы схемы СТТ с различными схемами форсирования в реальных условиях 113

Выводы по четвертой главе 116

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 117

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 118

ПРИЛОЖЕНИЯ 133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В России стремительно развиваются инновационные технологичные автоматизированные тепличные комплексы защищенного грунта. В условиях средней полосы, холодного климатического периода года - зимой и весной, имеет большой спрос свежая сельскохозяйственная продукция. Современные теплицы возводятся большими площадями, высотой более 5м. Крупные объекты имеют значительные потребности в энергоресурсах. Отопление теплиц осуществляется от экономичных газовых котлов с высоким КПД. Имея большие объемы потребления энергоресурсов, возникает задача их уменьшения и рационального использования.

Функционирование тепличных комбинатов в условиях жесткой ценовой конкуренции сельскохозяйственной продукции обусловлено уменьшением удельного расхода затрат. Доля затрат предприятия на энергоресурсы в зимние месяцы достигают 60-70%. Высокая и постоянно растущая стоимость энергоресурсов также способствует повышению контроля и уменьшению потребления, планированию и проведению мероприятий по энергосбережению [4, 86, 113]. Контроль за снижением потребления закреплен и поддерживается федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» [129] и мировыми соглашениями по уменьшению энергопотребления для адаптации к климатическим изменениям [120].

Неотъемлемой частью технического оборудования современных теплиц защищенного грунта являются когенерационные энергоцентры. Собственный когенерационный источник позволяет получить электроэнергию по цене ниже рыночной, и попутно снять тепло для системы обогрева теплиц.

Придерживаясь действующий концепции «развития науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года» [110], в основу развития предприятия заложены высокое качество получаемой продукции, ресурсосбережение, экологическая безопасность, конкурентоспособность [136]. Таким образом, получение электро-

технического комплекса с большей эксплуатационной эффективностью востребовано как для рассматриваемого производства, так и идентичных тепличных комплексов защищенного грунта [17, 18, 31].

Степень разработанности проблемы

В последнее десятилетие в России, около сорока лет назад - в Голландии, Финляндии, Америке, Японии, получили распространение технологии выращивания овощей в защищенном грунте методом «гидропоники», с высокой интенсивностью освещения. Искусственное освещение натриевыми лампами высокого давления приближается по составу спектра и яркости к естественному солнечному освещению. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость урожайности от освещенности в пределах от 0 до 40 клк.

Российские конструкторы автоматизированных систем управления тепличных комплексов, беря за основу лучшие зарубежные наработки, адаптируют алгоритмы управления к местным климатическим особенностям. По возможности применяют отечественные электроаппараты построения автоматизированных технических систем. Так получена удобная и понятная эргономичная установка для отечественных пользователей.

Научные основы развития современных устройств автоматизации и систем управления электротехнических комплексов, ресурсосбережения заложены в трудах Артухова И.И., Безруких П.П., Бесекерского В.А., Беликова Ю.М., Боровикова М.А., Воротникова И.Л., Гольштейна В.Г., Грудинина В.С., Данилова Н.И., Пупкова К.А.

Наряду с отечественными работами значимы труды зарубежных авторов, разработавших теоретические и практические вопросы управления автоматизированными установками, тепличными производственными комплексами: Dagum E.B., Hendriks L., Lofqvist T., Shamshiri R.R., Rodriguez C.

Однако исследования вопросов повышения эксплуатационной эффективности электротехнического комплекса тепличного комбината и использования энергосберегающих технологий на сегодняшний день освещены недостаточно. При-

менение отдельных мероприятий осуществляется локально, без распространения опыта на аналогичные производства.

В связи с этим возрастает актуальность проведения исследований и разработки современных подходов к теории и практике оптимизации систем управления с позиции эксплуатационной эффективности в условиях увеличивающихся расходов на энергоресурсы.

Объект исследования – электротехнический комплекс тепличного комбината, имеющий собственную генерацию и потребителей электрической энергии с различным характером нагрузок. Электрооборудование автоматизированного энергоцентра, система управления, эксплуатационные режимы.

Предмет исследования – системные свойства и связи в электротехническом комплексе и системах в условиях воздействия внешних метеофакторов, модель системы автоматического управления. Вопросы электрогенерации, распределения и оптимизации потребления.

Цель исследований

Целью исследования является повышение эффективности электротехнического комплекса (ЭТК) тепличного комбината (ТК), за счет разработки и реализации системы автоматического управления параметрами микроклимата.

Задачи диссертационного исследования

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ проблемы обеспечения эффективности электротехнического комплекса тепличного хозяйства с позиции совершенствования его системы управления для улучшения показателей работы (на примере АО «Тепличное»).
2. Разработка электротехнической системы управления температурой теплицы для повышения эффективности и быстродействия.
3. Синтез электротехнического устройства, обеспечивающего комплексный контроль параметров микроклимата для теплиц защищенного грунта с повышенной точностью и быстродействием.

4. Разработка системы автоматического регулирования температуры, обеспечивающей требуемую точность и низкую чувствительность к изменениям параметров электротехнического комплекса в процессе роста растений.
5. Комплексная апробация и внедрение предложенных технических решений на производственном комплексе защищенного грунта АО «Тепличное» г.Ульяновск.

Методы исследования

В работе использованы методы теории электропривода, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления и оптимизации технических систем, преобразования Лапласа и D → Z - преобразования, статистической обработки данных, когнитивного анализа данных, численного моделирования в программном комплексе «Моделирование в технических устройствах (МВТУ)» и Matlab Simulink.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании систем автоматизации «Priva Connext».

Информационную базу составляют монографии, материалы научно-технических конференций, объекты интеллектуальной собственности, статьи в периодических изданиях и научных сборниках по исследуемой проблеме.

Научная новизна работы В диссертационной работе получены следующие результаты исследования, обладающие научной новизной:

1. Предложена методика синтеза системы управления температурой теплицы, позволяющая повысить быстродействие ЭТК ТК, отличающаяся от известных форсированием режима работы.
2. Разработано устройство комплексного контроля параметров микроклимата ТК, отличающееся от известных возможностью получения интегрального значения измеряемых параметров (температуры, влажности) с меньшей погрешностью и большим быстродействием.
3. Разработана система автоматического регулирования температуры теплицы, отличающаяся от известных низкой чувствительностью к параметрическим изменениям за счет применения упреждающей коррекции.

4. Разработана цифровая математическая модель ЭТК ТК, отличающаяся от известных возможностью учета изменения периода дискретизации датчика контроля микроклимата.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика синтеза системы управления температурой теплицы с учетом режимов форсирования электрооборудования.
2. Электротехническое устройство комплексного контроля параметров микроклимата теплицы, обладающее возможностью получения интегрального значения измеряемых параметров с меньшей погрешностью и более высоким быстродействием.
3. Система автоматического регулирования температуры теплицы с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.
4. Результаты комплексной апробации предложенных технических решений.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Полученное повышение эффективности работы электротехнического комплекса тепличного комбината позволяет снизить энергопотребление используемого оборудования - газа на 4%, электроэнергии на 2%.
2. Разработанное электротехническое устройство комплексного измерения параметров микроклимата увеличит точность и сократит время измерений, что даст точную интегральную оценку состояния теплицы. Позволит увеличить эффективность регулирования электротехнического комплекса, что улучшит качество продукции и снизит затраты на производство. Может быть использовано для получения параметров микроклимата помещений большого объема.
3. Практическая значимость заключается в применении разработанных технических решений в АО «Тепличное». Получен акт внедрения АО «Тепличное» г. Ульяновск.

Апробация работы. Результаты работы и основные положения были доложены и обсуждены на II Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (г. Казань, 2016г.), II Международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робо-

тотехника» (г. Новокузнецк, 2018г.), на II Международной научно-практической конференции «Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2019г.), на VIII Конгрессе молодых ученых Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург, 2019г.).

Степень достоверности результатов работы. Исходные данные для исследования и составления моделей отдельных элементов электротехнического комплекса получены на основе ретроспективных данных действующего оборудования. Достоверность обеспечивается проведением экспериментов с достаточной воспроизводимостью, статистической обработкой полученных данных с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний; сопоставлением результатов, полученных разными методами, а также сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами; положительными результатами промышленного внедрения энергоэффективной системы управления электротехническим комплексом тепличного комбината.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ (из них 5 в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работа в издании, входящем в международную систему цитирования SCOPUS), 1 патент на изобретение, 4 доклада на конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложение. Основной текст изложен на 134 страницах, содержит 80 рисунков, 11 таблиц и 1 приложение. Библиографический список состоит из 154 наименований на 14 страницах.

Соответствие научной специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Проводимая работа соответствует формуле специальности и областям исследования:

п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»;

п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность работы, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор объекта и предмета исследования, определяются методологические основания исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе диссертации выполнен обзор элементов электротехнического комплекса тепличного комбината. Рассмотрены источники энергоресурсов (электроэнергия, газ, вода). Определены основные электроприемники по объему потребления электроэнергии и величине установленной мощности, построены профили нагрузок. Исследованы особенности работы когенераторного энергоцентра.

Во второй главе выполнен анализ структуры энергопотребления тепличного комбината. Выявлена сезонность энергопотребления по группам технического оборудования. Проведена оценка эффективности мероприятий энергосбережения по группам потребителей. Выявлены возможные пути улучшения микроклимата теплицы. Рассмотрен электротехнический комплекс как система, состоящая из преобразовательного, технологического, передаточного, управляющего устройств и предназначенная для осуществления технологического процесса. Предложена схема, позволяющая снизить инерционность нагрева теплицы.

В третьей главе выполнен синтез системы регулирования температуры. Проведен анализ работы системы стабилизации температуры теплицы при действии случайных сигналов. Предложена схема с низкой чувствительностью к параметрическим возмущениям. Разработана структура системы регулирования температуры при цифровой технической реализации.

В четвертой главе разобраны практические аспекты внедрения предложенных технических решений. Выполнен сравнительный анализ результатов натур-

ных экспериментов и моделирования. Дано описание цифровой модели системы управления электротехническим комплексом. Приведены переходные процессы при различных режимах работы электротехнического комплекса. Проанализировано влияние дискретизации по времени на работу системы обогрева теплицы.

В приложении представлен акт об использовании результатов диссертационной работы в АО «Тепличное» г.Ульяновск.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЧНОГО КОМБИНАТА

1.1 Источники энергоресурсов

Современные тепличные комплексы круглогодичного выращивания сельскохозяйственных культур в климатических условиях средней полосы России сопоставимы с мировыми технологическими достижениям аналогичных искусственных производств, широко распространены и востребованы. Для возделывания овощных культур в искусственных условиях создается окружающая среда и питание, приближенные к естественным условиям. Для качественного и скорого вызревания плодов проводятся доработки, оптимизирование и улучшения технических систем в соответствие с новациями интенсивных агрономических технологий. Искусственная среда обусловлена бесперебойной подачей энергоресурсов, с выполнением автоматизированного контроля и мониторинга в динамике [27, 28, 98, 123].

Имеется потребность в воде, тепле, газо- воздушной среде, микроклимате, электроэнергии, световой энергии. Наибольший объем потребления энергоресурсов – электроэнергии, тепла, света наблюдается в холодные, темные пасмурные периоды [90]. Расход воды максимален в летние месяцы.

Рассмотрим структуру теплоснабжения тепличного комбината. Для обогрева большого объема теплиц имеется необходимость в значительном количестве теплоносителя. Система обогрева теплиц эволюционировала от дизельных печек в пленочных теплицах до автоматизированных газовых котельных в теплицах, конструктивно состоящих из алюминиевых профилей и двойных стеклопакетов или сотового поликарбоната.

Система теплоснабжения тепличного комплекса децентрализована. Источниками теплоты являются котельные и когенерационный энергоцентр, работающие на природном газе. Для удовлетворения технологической нагрузки отопления и горячего водоснабжения в качестве теплоносителя используется вода. Схема теплоснабжения теплицы выполнена закрытой системой с двухтрубным контуром, с

нерегулируемым теплоносителем. Подпитка контура осуществляется в тепловом пункте котельной.

Котельные рассчитаны на отпуск в наружные сети горячей воды по температурному графику для нужд отопления, вентиляции, хозяйственного горячего водоснабжения потребителей, а также приготовления воды для технологического водоснабжения теплиц (полива растений). В котельных установлены газовые автоматизированные водогрейные котлы. Диапазон регулирования нагрузок 30 – 100%, КПД котлов достигает 92%. Тепловая схема котельной имеет два зависимых контура циркуляции: котловой контур и циркуляционный контур тепловых сетей. В качестве теплоносителя в обоих контурах используется специально подготовленная горячая вода. Параметры теплоносителя котлового контура: горячая вода с постоянной температурой в подающем трубопроводе 92°С и 70°С – в циркуляционном трубопроводе. Приготовление горячей воды осуществляется в смесительных узлах, установленных в котельной на гидрораспределительных коллекторах. Гидрораспределительные коллекторы имеют большой диаметр, обеспечивающий стабильный гидравлический режим на входе в смесительные узлы транспортных линий. Система теплоснабжения потребителей – закрытая. Приготовление горячей воды с температурой 60°С для хозяйственных нужд осуществляется в водяных подогревателях, установленных в тепловых пунктах потребителей. В качестве греющего агента в подогревателях используется вода второго контура. Приготовление теплой воды для полива теплиц осуществляется в подогревателях с температурой 22°С, установленных в станции приготовления поливочной воды.

На котлах установлены насосы внутренней рециркуляции, обеспечивающие температуру воды на входе в котел не ниже 70°С при различных режимах работы котла и тепловых сетей. Для поддержания стабильного режима в каждом котловом контуре предусмотрена установка индивидуальных циркуляционных насосов.

Нагретый теплоноситель от всех теплоисточников поступает в теплоаккумулирующие емкости. Тепловые сети внутренние, короткие, с минимальными потерями. Транспорт теплоносителя по блокам теплиц производится от частотно регулируемых насосных.

Газовые котлы «Crone CLW 275» снабжены блочными автоматическими горелками, установкой для отбора из дымовых газов углекислого газа CO_2, состоящей из конденсора и вентиляционной установки газации. Конденсор выполняет функцию подогревателя циркуляционной сетевой воды за счет охлаждения дымовых газов ниже точки росы (55 - 60°С). При снятия этого тепла происходит повышение коэффициента использования топлива на 2-3%, частичная осушка и обеспыливание дымовых газов, повышение качества отводимого углекислого газа (рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 — Установка газации теплицы

Полученный углекислый газ подается в теплицы для усвоения растениями. Концентрация и температура углекислого газа в теплицах контролируется автоматической установкой. Для подмеса к дымовым газам подается воздух. Также ведется контроль за концентрацией в дымовых газах окиси углерода CO. Технико-экономические показатели котельной теплиц площадью 6 га приведен в таблице 1.1. Показатель ТУТ –-тонна условного топлива [9, 13, 71, 89].

Таблица 1.1 — Технико-экономические показатели котельной блока теплиц

№ п/п	Наименование	Един. измерения	Показатель
1	Газопотребляющий котел	3 комплекта	Crone CLW 275
2	Установленная теплопроизводительность котельной	Гкал/час	32,13

№ п/п	Наименование	Един. измерения	Показатель
3	Основное топливо		Природный газ
4	Расчетная нагрузка котельной	Гкал/час	31,662
5	Годовая выработка тепла	Гкал	55840
5	Часовой расход условного топлива	ТУТ/час	4,193
6	Часовой расход натурального топлива	н*м^3/час	3646
7	Годовой расход натурального топлива	млн.н*м^3	7,58
8	Годовой расход условного топлива	ТУТ	8663
9	Число часов использования установленной мощности	Час	1738
10	Расчетный КПД котельной	%	92
11	Удельный расход условного топлива	ТУТ/Гкал	0,1553

Тепловая энергия расходуется на поддержание заданного микроклимата в теплице. Температура внутреннего воздуха теплиц в ночное время задается не менее 18°С, в дневное до 26°С. Запрос на разбор теплоносителя поступает от центрального процессора автоматизации высшего уровня технологии «Priva Connext».

Для увеличения надежности системы теплоснабжения, большей энергоэффективности тепловых процессов, регулирования, сброс выработанного тепла производится в теплоаккумулирующие емкости, рисунок 1.2 [125, 140].

Рисунок 1.2 — Теплоаккумулирующие емкости системы отопления теплиц

Важной энергией в теплице для фотосинтеза растений является световая. Из-за недостаточной естественной освещенности в короткие световые дни создана автоматизированная искусственная система досвечивания растений, максимально приближенному к солнечному свету по интенсивности и цветовому спектру, дневной яркий период и ночное темное пятно, выполнено диммирование с системой рассвета и заката. В современном развитии светотехнического оборудования, наиболее эффективнным является натриевый фитосветильник. С сентября по май выращивание растений происходит под ассимиляционным досвечиванием продолжительностью до 20 часов в сутки, световой мощностью около 200Вт/м^2. На один гектар системы досвечивания теплиц установленная электрическая мощность составляет до 2,4 МВт, с уточнением по светотехническому расчету.

Основным источником электроэнергии для светотехнической установки является когенерационный энергоцентр. Электроэнергия производится когенерирующими установками с газопоршневыми двигателями. Тепло, снимаемое в теплообменниках с контуров охлаждения двигателей, транспортируется в теплоаккумулирующие емкости. В качестве резервного источника возможно использование электроснабжения от промышленной сети. Промышленная электроэнергия имеет высокую стоимость, что в совокупности с большими объемами потребления и производственными затратами делает выращивание растений нецелесообразным.

Эффективность работы когенерационного энергоцентра заключается в полезном использовании тепловых потоков, образующихся при генерации электроэнергии. При сжигании 100 условных единиц топлива получаем 43 условных единицы в виде электроэнергии. Остальные 57 единиц — это выделяемая тепловая энергия, утилизация которой поступает на отопление теплиц и неизбежные потери. Для насыщенного энергетического комплекса тепличного комбината данное распределение энергетических ресурсов повышает энергоэффективность производства, позволяет обеспечить бесперебойным электро- и теплоснабжением при снижении затрат на энергоресурсы.

Таким образом, электротехнический комплекс тепличного комбината потребляет первичные источники энергоресурсов: промышленную электроэнергию,

природный магистральный газ, сетевое централизованное водоснабжение. А также в своем составе имеет когенерационные установки, вырабатывающие из первичного источника энергии газа, вторичные – электроэнергию и тепло.

1.2 Потребители электроэнергии

Состав потребителей электроэнергии имеет широкий диапазон мощностей и продолжительность включения [48]. Рассмотрим потребителей электроэнергии в соответствии с категориями надежности электроснабжения по классификации правил устройства электроустановок [109]. Технологическое оборудование и автоматизированные котельные установки относятся ко II категории, система управления технологических узлов и котельных к I, светотехническая ассимиляционная установка электродосвечивания растений относится к III.

Основным приёмником по объему потребления электроэнергии и величине установленной агрегатной мощности является светотехническая установка, затем насосное оборудование, технологические приемники, бытовая нагрузка, наружное освещение и вспомогательные электротехнические системы [47, 51].

Рассмотрим наибольший электропотребляющий приемник, светотехническую установку. Интенсивность ассимиляционного освещения растений обуславливает прямо пропорциональную зависимость урожайности продукции в интервале освещенности 10-40 клк. Наиболее эффективно искусственное освещение в среднем диапазоне интенсивности - около 20 клк. Светильники для теплиц используются преимущественно натриевые. Газоразрядные натриевые лампы со специальным спектром излучения оптимальны для фотосинтеза и получения наименьших сроков созревания плодов. Соотношение спектра цветов по настоящее время изучают, комбинируют, дорабатывают. Пусковые разжигающие устройствами светильников до 2016г. преимущественно применялись электромагнитные, в настоящее время широкое применение получили электронные пусковые разжигающие устройства. Технические характеристики светильника ЖСП 64-600-002 приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Технические характеристики светильника ЖСП 64-600-002

Тип лампы	Дназ, натриевый
Тип пускорегулирующего устройства	электронное
Номинальное напряжение	320-430 В
Активная мощность светильника	665 Вт
Мощность лампы	600 Вт
Коэффициент мощности, cosφ, не менее	0,98
IP	23

Анализ нагрузки типового блока теплиц площадью 1,5 га по составу электроприемников приведен в таблице 1.3 [24, 56].

Таблица 1.3 — Характеристика электроприемников

№ п/п	Наименование электрооборудования	Тип приемника	Установленная мощность, кВт	cosφ	Средняя продолжительность включения в сутки	Сезонная востребованность
1	2	3	4	5	6	7
1.	Светотехническая установка электродосвечивания растений	Газоразрядные лампы, электронное ПРА	3600	0,99	0,46	Сентябрь-май
2.	Котельное оборудование	Асинхронные электродвигатели с частотным регулированием	78	0,83	0,32	Круглогодично
3.	Технологические приемники	Асинхронные электродвигатели	18	0,92	0,9	Круглогодично
4.	Системы управления и сигнализации	Низковольтные с ИБП	3,4	0,92	1	Круглогодично
5.	Хозяйственно-бытовые приемники, системы наружного и технологического освещения	Люминисцентные и светодиодные светильники	11,8	0,92	0,3	Круглогодично

Из таблицы видно, что основными потребителями являются светотехническая установка и насосное оборудование. Диаграмма распределения по величине электропотребления приведена на рисунке 1.3.

Рисунок 1.3 − Диаграмма распределения по величине электропотребления

Светотехническая установка представляет собой автоматизированную интегрированную систему с общим технологическим процессом управления. Конструктивно обеспечивает высокоэффективное преобразование электроэнергии в фотосинтетический поток, сбалансированные спектральные составляющие для фотосинтеза, стабильность излучения светового потока. На рис. 1.4 представлен общий вид светотехнической установки.

Рисунок 1.4 — Светотехническая установка теплицы

Для компенсации наружного климатического воздействия, дополнительно к остеклению имеется система зашторивания. Материал штор выполняет функции энергосбережения и светоотражения. Автоматизированные системы зашторивания установлены на боковых и верхних поверхностях теплицы. Для быстрого сброса температуры внутри теплицы и воздухообмена предусмотрена автоматизированная система управления фрамуг (рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 — Автоматизированная система управления фрамуг

Рассмотрим работу потребителей электроэнергии тепличного комбината. Выполним измерения параметров электроситемы на питающем вводе. Получаем векторную диаграмму электроприемников на рисунке 1.6 с суммарным cosφ нагрузки 0,82 [101].

Параметр	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Трехфазная сеть
P, кВт	31,97	30,99	30,98	93,94
Q, квар	22,08	22,58	21,21	65,86
S, кВА	38,87	38,42	37,48	114,75
Cos	0,82	0,81	0,82	0,82
Угол, град.	34,63	36,08	34,39	35,04
F, Гц		50,00		
Fу, Гц		50,00		
t, °C		3 °C		

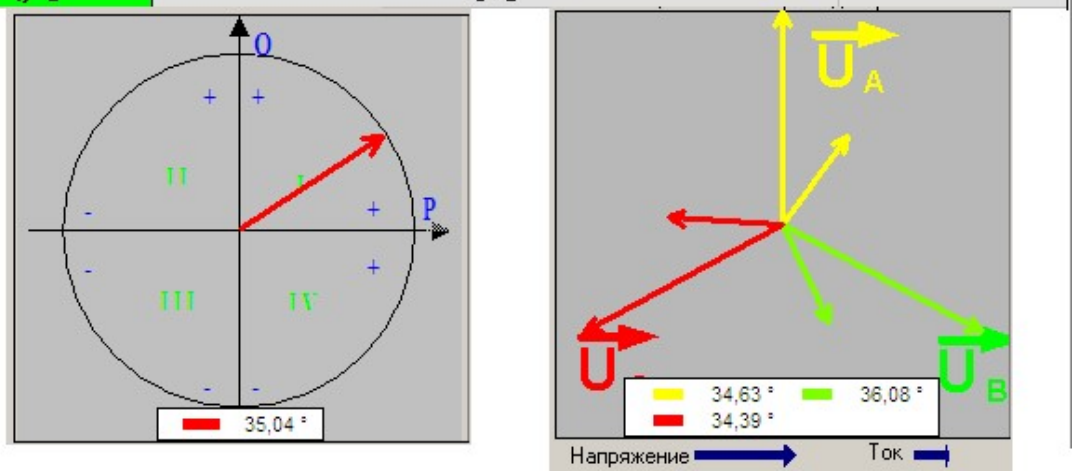


Рисунок 1.6 — Векторная диаграмма электроприемников тепличного комбината

Для оценки характеристик потребителей разделим на светотехническую установку досвечивания и технологическое оборудование. При запущенной системе досвечивания на питающем вводе электроснабжения получен результирующий cosφ=0,98. Таким образом выполняется компенсация реактивной мощности и улучшение коэффициента мощности, которую дают электроприемники светотехнической установки.

Светильник для досвечивания растений оснащен современным электронным пускорозжигающим устройством для натриевой лампы. Наиболее широкое применение получили светильники мощностью лампы 600 Вт. Собственное потребление мощности ПРА светильника до 65 Вт. Светильники имеют схемы с входным напряжением ~380 В, двухфазные. Пусковые токи импульсные, не оказывающие существенного влияния на качество электроэнергии в сети.

Каждый светильник подключен к двухфазной силовой цепи и управления. Для равномерной загрузки электросети, подключение гирлянд светильников выполнено пофазно, рисунок 1.7.

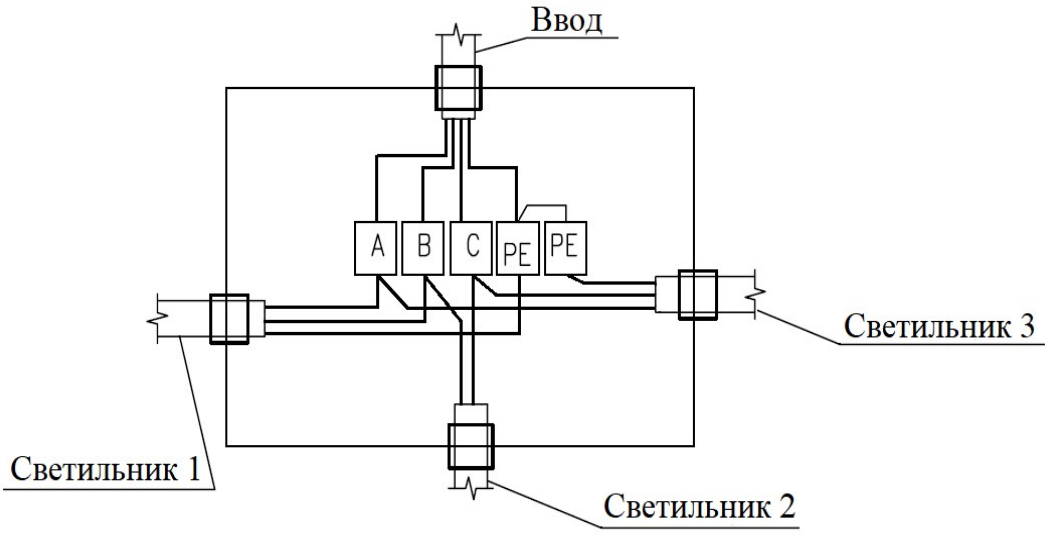


Рисунок 1.7 — Схема подключения светильников с равномерным распределением фаз

Светильники при работе излучают световую энергию и сопутствующий тепловой нагрев [49, 50]. Запуск светотехнической установки в теплице сопровождается поднятием температуры помещения и осушением воздуха теплицы. Для компенсации параметров окружающего микроклимата выполнена корректирующая

подготовка автоматического управления электротехническим комплексом теплицы. Снижается подача теплоносителя, регулируется воздухообмен изменением скорости вентиляторов и открытием фрамуг.

Режим работы электрооборудования системы досвечивания определен как продолжительный, номинальной мощности. Технологическое и вспомогательное оборудование имеют повторно - кратковременные режимы включения. Для рационального электропотребления и равномерной загрузки элементов энергосистемы потребители, работа системы электродосвечивания растений регламентирована графиками включения.

Проведем анализ структуры светотехнической установки ассимиляционного досвечивания. Силовая часть состоит из распределительных устройств, трансформаторных подстанций, коммутационной аппаратуры, распределительных и групповых кабельных линиях. Включение светильников выполняется по цепям управления через командоаппараты, пускатели. Автоматизированная система плавного пуска и сброса нагрузки освещения имеет сгруппированную дискретную разбивку по управлению. Каждая гирлянда светильников оснащена управляющим реле. Подача команды на включение идет от центрального процессора «Priva Connext» по временному алгоритму, с коррекцией по освещенности.

Вторым потребителем по величине установленной электрической мощности являются насосные агрегаты. Электрооборудование технологической и котельной группы теплиц представлены консольными насосами с трехфазными асинхронными двигателями. На один гектар теплиц имеется до 58 кВт электрической мощности насосного оборудования. На рисунке 1.8 представлен общий вид оборудования автоматизированного поливочного узла теплицы. Имеется узел автоматизированного микропроцессорного управления, определяющий работу электроподогрева, насосной группы дозированной подачи раствора, системы обеззараживания.

Рисунок 1.8 — Автоматизированный поливочный узел теплицы

Система электроснабжения тепличного комбината выполнена по закольцованной схеме, средним напряжением 10кВ. Приемники питаются от понижающих подстанций 10/ 0,4кВ.

Полученный объем потребления электроэнергии оборудованием подтверждается накопленными данными по показаниям приборов учета. На рассматриваемый блок теплиц 1,5 га - светотехническая установка имеет потребление до 9000 МВт*ч/год, прочее электрооборудование 416 МВт*ч/год.

Рассмотрим почасовое потребление электроэнергии электротехнического комплекса в период максимальных нагрузок, в зимний месяц, приведен в таблице 1.4. Имеется характерная зависимость потребления в течении суток, недельная, зависимость потребления от состояния наружного климата [44, 45, 63, 142].

Таблица 1.4 — Почасовое потребление электроэнергии января, кВт*ч

День / Час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
00-01	1612	1459	1459	1414	1409	1509	1708	1833	1779	1847	1849	1747	1777	1807	1712	1723	1819	1666	1611	1704	1876	1889	1730	1805	1775	1775	1782	1627	1696	1412	1534
01-02	1711	1455	1493	1451	1452	1514	1734	1814	1800	1859	1872	1758	1778	1805	1740	1741	1836	1687	1628	1738	1888	1985	1776	1785	1805	1814	1826	1693	1692	1532	1467
02-03	1670	1801	1717	1594	1768	1577	1616	1852	1540	1992	1899	1871	1889	1908	1827	1840	1757	2013	1694	1845	2031	1486	1305	1887	1841	1906	1894	1550	1730	1544	1442
03-04	1755	1916	1908	1810	1856	1843	2073	2140	2023	2088	1961	1953	1967	1943	1902	1901	2439	2692	2434	2408	2113	1449	1301	1953	1940	1951	1964	1737	1791	1531	1464
04-05	1831	2245	2096	2142	2121	2027	2187	2281	2160	2229	2097	2046	2072	2183	2075	2042	2567	2856	2570	2730	2281	1584	1426	2090	2118	2123	2149	1839	1935	1730	1642
05-06	2294	2757	2747	2748	2675	2235	2411	2508	2540	2353	2332	2087	2576	2715	2397	2653	2551	2855	2569	2749	2950	2192	2064	2683	2761	2818	2791	2488	2590	2384	2378
06-07	2734	2788	2755	2684	2723	2299	2398	2506	2518	2386	2268	2099	2628	2715	2446	2691	2515	2790	2567	2708	2911	2211	2031	2710	2669	2779	2716	2543	2662	2452	2436
07-08	2893	2807	2929	2728	2852	2345	2405	2464	2586	2400	2318	2131	2669	2735	2697	2803	2539	2832	2597	2724	2972	2244	2072	2744	2687	2763	2766	2585	2722	2466	2427
08-09	3063	2902	2922	2876	2727	2266	2395	2413	2486	2420	2333	2175	3007	3108	3031	3176	2838	3161	2619	3129	3204	2413	2309	2741	2733	2792	2754	2573	2711	2435	2423
09-10	3135	2690	2620	2745	2065	2169	2418	2422	2329	2380	2322	2141	3050	3091	3055	3262	2876	3312	2944	3164	2806	2393	2587	2626	2707	2687	2694	2638	2636	2312	2408
10-11	3122	2425	2371	2425	2042	2143	2398	2388	2391	2244	2195	2210	2962	2534	3123	3241	2750	3250	3012	3175	2337	1873	2633	2323	2708	2526	2582	2579	2633	2214	2328
11-12	2983	2651	2471	2672	1959	2082	2259	2242	2359	1919	2133	2085	2999	2397	3143	3199	2239	2617	2656	2589	1546	1415	1932	1693	2639	1957	1565	2623	2629	1507	2337
12-13	2685	2682	2446	2680	1937	2076	2210	2015	2283	2066	2095	1917	3116	2584	3148	3315	2248	2386	2371	2528	1268	1435	1216	1765	2647	1777	1540	2565	2538	1671	2274
13-14	2947	2761	2488	2661	1932	2086	2182	2127	2149	2116	2047	2068	3048	2108	2751	3254	2237	2409	2330	2330	1392	1213	820	1832	1795	1884	1888	1847	1896	1943	2013
14-15	2969	2748	2571	2753	1978	1963	2001	1972	2104	2081	2034	2358	2978	2309	2663	3537	2322	2515	2289	2271	1737	1725	1176	1856	1769	1761	1877	1796	1770	1834	1324
15-16	3025	2956	2690	2783	2070	2280	2301	2278	2314	2330	2170	2492	2632	2420	2742	2872	2560	2347	2459	2431	1830	1887	1911	1971	1946	1955	2005	1862	1701	1843	1089
16-17	2923	3007	2756	2750	2170	2161	2276	2282	2327	2379	2185	2482	2229	2055	2717	2370	2265	1899	2044	2022	1959	2008	1914	2005	1941	1956	1877	1842	1966	1688	1088
17-18	2116	2309	1958	1972	1558	1930	2005	1894	2004	2089	1961	1896	1941	1900	1964	1895	1857	1814	1721	1769	1166	1830	1699	1851	1783	1718	1693	1676	1946	1546	1375
18-19	1721	1762	1547	1829	1583	1758	1864	1761	1870	1907	1810	1780	1820	1766	1736	1783	1688	1689	1417	1732	1574	1712	1777	1757	1750	1745	1590	1518	1749	1397	1343
19-20	1716	1797	1529	1786	1641	1769	1846	1791	1850	1907	1826	1773	1858	1753	1744	1798	1658	1670	1511	1854	1510	1721	1838	1761	1767	1766	1583	1566	1792	1357	1547
20-21	1743	1786	1538	1527	1626	1784	1833	1791	1840	1932	1891	1770	1893	1755	1736	1801	1604	1666	1741	1875	1646	1726	1828	1753	1748	1831	1587	1531	1790	1357	1583
21-22	1453	1734	1526	1551	1570	1769	1811	1764	1852	1913	1858	1777	1838	1779	1738	1815	1630	1719	1751	1881	1936	1713	1815	1767	1781	1831	1595	1517	1786	1400	1373
22-23	1462	1732	1509	1551	1556	1746	1851	1767	1859	1897	1810	1759	1830	1742	1703	1810	1628	1676	1727	1902	1889	1720	1848	1791	1759	1812	1644	1549	1657	1326	1533
23-24	1456	1462	1397	1426	1550	1736	1833	1727	1867	1856	1789	1769	1851	1735	1715	1827	1627	1623	1707	1887	1894	1715	1794	1763	1732	1783	1638	1653	1441	1202	1436
Итого за сутки	55019	54632	51443	52558	46820	47067	50015	50032	50830	50590	49055	48144	56408	52847	55505	58349	52050	55144	51969	55145	48716	43539	42802	48912	50801	49710	48000	47397	49459	42083	42264

1.3 Особенности работы когенераторного энергоцентра

Наиболее приемлемым по технико-экономическим показателям и дешевым альтернативным источником электроэнергии для тепличного комбината является когенераторный энергоцентр [5, 8, 11, 41, 58, 64, 75, 122]. Когенерацией является выработка электроэнергии и тепла при сгорании газа. Удачными по техническим характеристикам и эксплуатационным качествам, в настоящее время являются газопоршневые агрегаты, рисунок 1.9 [16, 35, 124, 128, 141, 144] .

Рисунок 1.9 — Машинный зал энергоцентра с газопоршневыми агрегатами

Газопоршневой агрегат состоит из двигателя внутреннего сгорания, муфты сцепления, синхронного генератора, диодного токосъемника, газовой линии, масляной системы, системы охлаждения, системы частотно управляемых электроприводов, системы выхлопных газов, и др.

Теплогенерирующая часть энергоцентра состоит из системы утилизации тепла – теплообменника от охлаждения двигателя, теплообменника выбрасываемых отработавших газов, трубопроводной обвязки и арматуры. Нагретый теплоноситель подается насосной группой в теплоаккумулирующую емкость [7, 132, 135, 141]. Принципиальная схема энергоцентра с газопоршневыми агрегатами показана на рисунке 1.10.

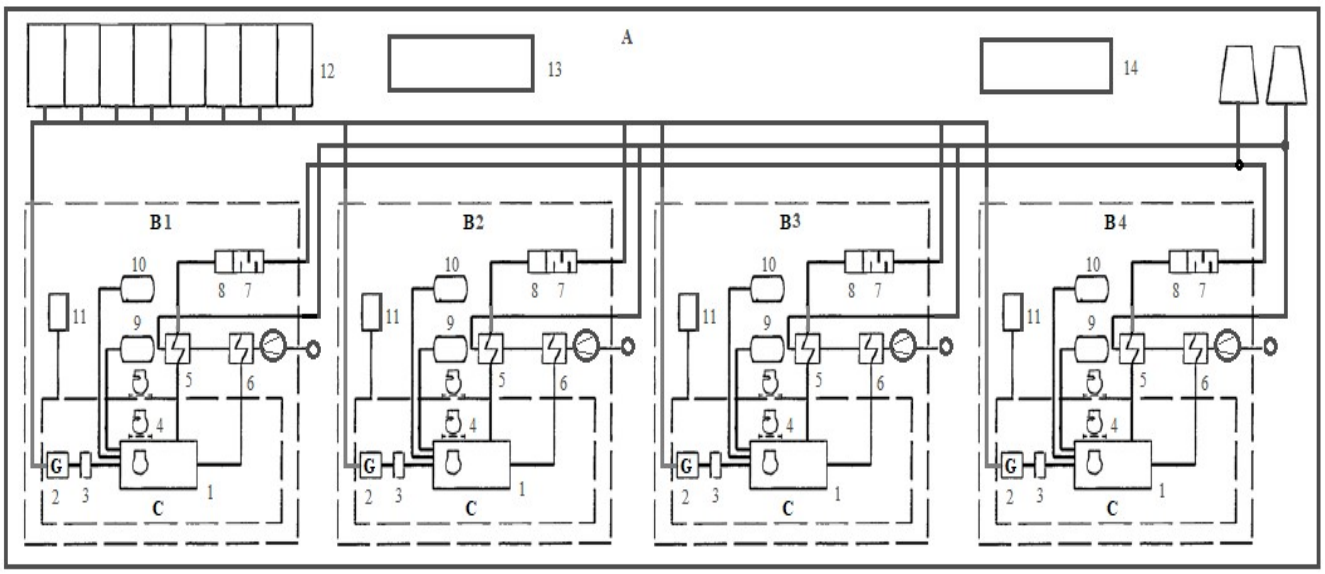


Рисунок 1.10 — Принципиальная схема энергоцентра с газопоршневыми агрегатами,

где А – энергоцентр, В1,В2, В3, В4 контуры когенераторных агрегатов, С-агрегаты, 1 – газопоршневые двигатели, 2 – синхронные генераторы, 3 – муфта сцепления, 4 – воздушные фильтры, 5 – теплообменники отработанных газов, 6 – теплообменники контура охлаждения двигателя, 7 – глушитель шума, 8 – фильтр отработанных гаазов, 9 – система газоснабжения, 10 – бак чистого масоа, 11 – шкаф системы контроля агрегата, 12 – распределительное устройство электроэнергии среднего напряжения, 13 – приточная система вентиляции, 14 – вытяжная система вентиляции машинного зала

С генератора снимается электроэнергия напряжением 10 кВ, номинальной частотой 50 Гц. Выработанный ток от генераторов по кабельным системам подается на единую силовую шину распределительного устройства энергоцентра. Потребители также подключены к единой шине, откуда и производится разбор электрической мощности. Коммутация электрических нагрузок и генераторов выполнена на быстродействующих вакуумных автоматических выключателях. Автоматическое управление выполнено по согласованному алгоритму от центрального процессора. Каждый агрегат имеет отдельную линию управления с монитором, может работать отдельно. Совместное управление работой выполнено блоком с выводом текущей мнемосхемы. Панель автоматизированного управления энергоцентром показана на рисунке 1.11.

Рисунок 1.11 — Панель управления энергоцентра

Энергоцентр имеет возможность работы в «островном» и параллельносетевом режимах электрогенерации. В случае работы в островном режиме, энергоцентр вырабатывает электрическую мощность на нужды потребителей и обеспечения собственных нужд [87, 88]. Параллельно сетевой режим позволяет синхронизировать работу электрогенераторов совместно с общепромышленной электрической сетью. Все генераторы синхронизируются на сетевой ввод и подключаются к шине электрического распределительного устройства.

В рабочем режиме энергоцентр работает параллельно с промышленной электрической сетью. Осуществляет электороснабжение потребителей до достижения номинальной электрической мощности генератора. Дополнительная мощность покрывается промышленной электросетью. Промышленная сеть для синхронизации рассматривается как система с высокой инертностью. При этом режиме синхронизация производится на внешнюю сеть, и все агрегаты синхронизируются и на сеть, и между собой. Текущую мощность агрегаты делят пропорционально между собой, с выводом информации по процентам загрузки на монитор. При аварийных помехах внешней сети, или при нарушении условий синхронизации,

система верхней автоматизации переводит работу энергоцентра в островной режим.

В островном режиме энергоцентр работает автономно, без внешнего источника электроэнергии, с отключенным вводом промышленной сети. Возможен и набор, и сброс электрической нагрузки с шагом не более 5% от значения текущей мощности включения, согласно нагрузочной диаграммы рисунке 1.12.

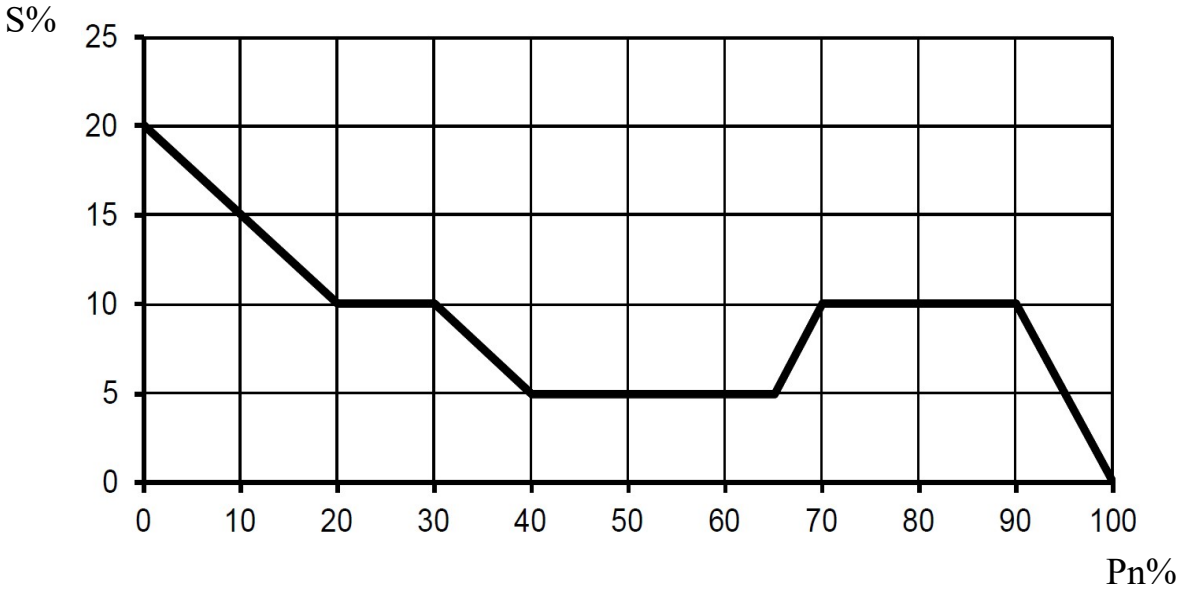


Рисунок 1.12 — Нагрузочная диаграмма, где S% - шаг нагрузки, Pn% текущая мощность

При этом учитывается мощность, на которую производится наброс нагрузки, а не номинальная мощность агрегата. Островной режим рассматривается как менее надежный, резервный, при отсутствии возможности работы в параллельно-сетевом режиме. Предусмотрена система аварийного сброса нагрузки с мгновенным ограничением электроснабжения потребителей.

Переход из параллельно-сетевого режима в островной при нарушении условий синхронизации с промышленной сетью выполнен в автоматическом режиме. При этом электрическая нагрузка мгновенно возрастает на величину мощности собственных нужд энергоцентра. Обратная синхронизация возможна после проверки исправности оборудования и систем, состояния электротехнических параметров внешней электрической сети. На рис. 1.13 представлена осциллограмма динамической отработки изменения нагрузки когенератором [102].

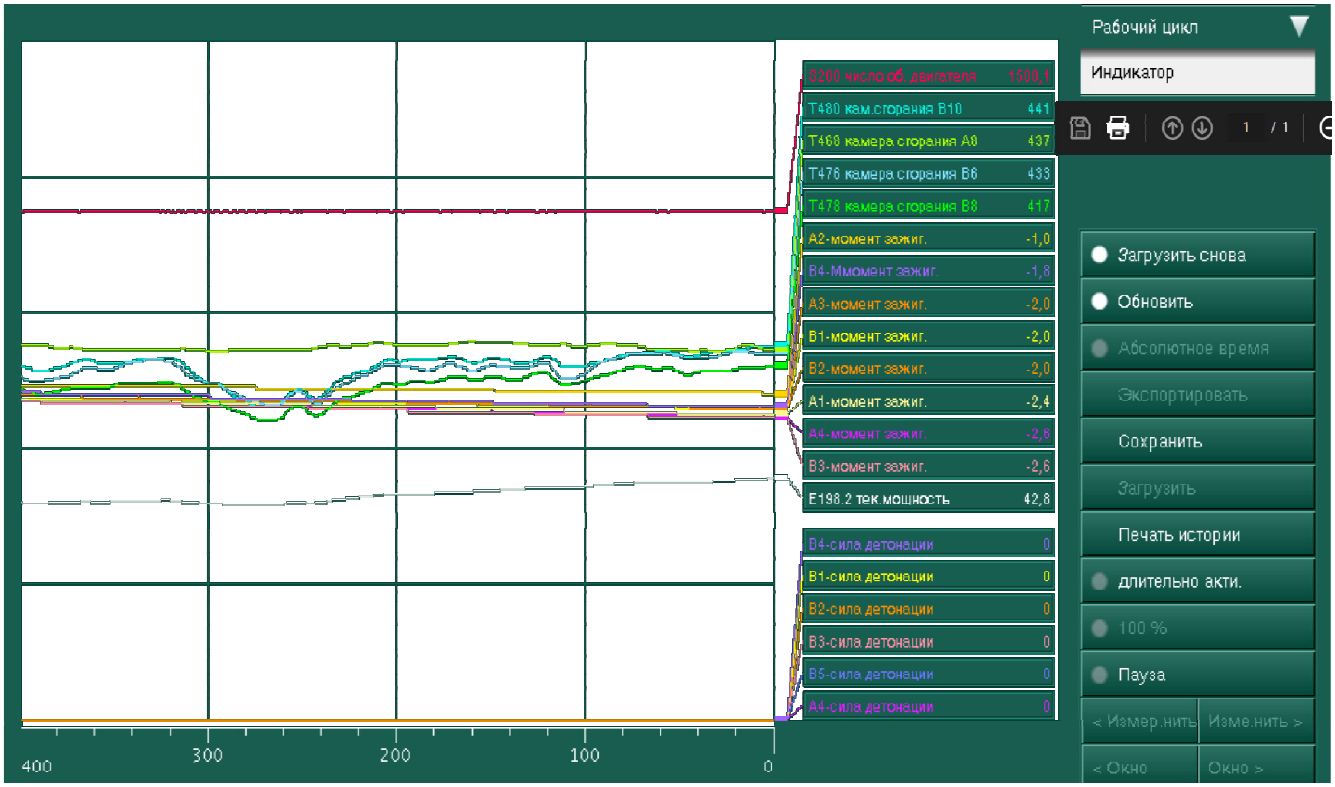


Рисунок 1.13 — Осциллограмма нагрузки когенератора

Принцип регулирования генератора в параллельно сетевом режиме заключается в следующем: регулятор напряжения служит для синхронизации с напряжением внешней электрической сети. Вспомогательный возбудитель генератора подает напряжение на обмотку возбуждения бесщеточного возбудителя. В обмотке ротора трехфазное напряжение выпрямляется по диодной мостовой схеме и в виде постоянного тока подается на индуктор генератора. Стабилизация напряжения генератора выполняется путем изменения тока возбуждения. Регулятор напряжения получает номинальное значение напряжения от задатчика и фактическое значение напряжения на силовых клеммах статора генератора. Разность между номинальным и фактическим значением напряжения сети определяет изменение тока возбуждения. Диапазон изменения задатчика номинального напряжения, по результату отработки параметров внешней сети, составляет ±10% номинального значения напряжения генератора 10 кВ. Схема регулятора напряжения представлена на рис. 1.14.

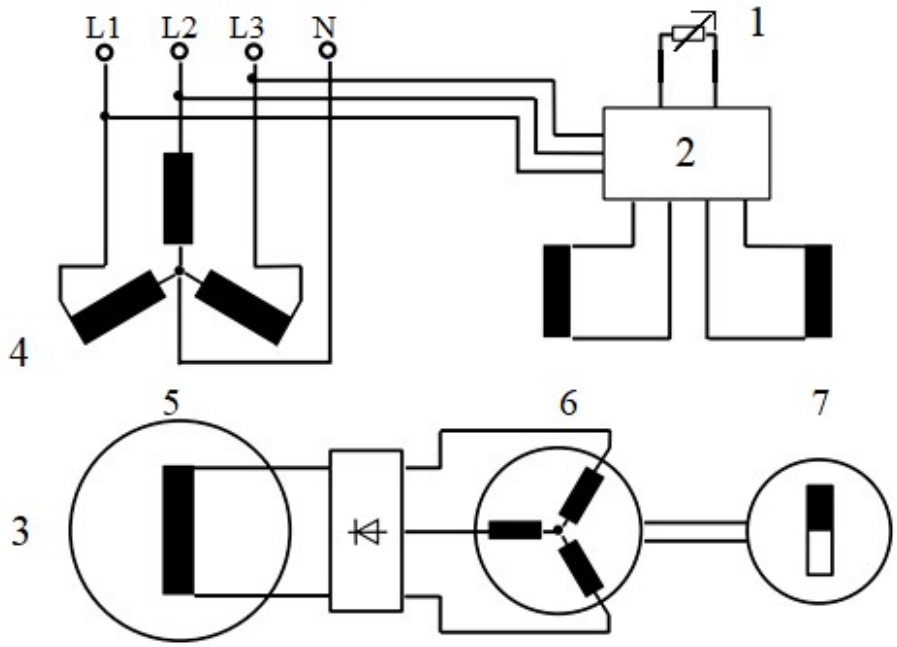


Рисунок 1.14 — Схема регулирования напряжения генератора

1 Задатчик номинального значения, 2 Регулятор напряжения, 3 Ротор, 4 Статор, 5 Главная машина трехфазного тока, 6 Возбудитель трехфазного тока, 7 Вспомогательный возбудитель

Для агрегатов выполнены электрические защиты от перегрузки, от перепада напряжения, от тока обратной мощности, защита от перегрева силовых обмоток, развязка силовых цепей, ограничение реактивного тока, защита от дифференциального тока, защита системы от замыкания на землю, защита статора от замыкания на землю, защита от несимметричной нагрузки.

Особенности работы генератора на сеть большой мощности [29, 30, 38]. В энергоцентре установлено четыре синхронных генератора для параллельной работы как между собой, так и с общепромышленной городской электросетью. Это обеспечивает универсальность работы агрегатов, требуемую выработку мощности по заданию технологической загрузки в разные периоды – от максимальной 6,4 МВт - с возможностью добора из сети, до минимальной – 40% мощности малого агрегата - 480 кВт. Диапазон вырабатываемых мощностей позволяет обеспечить покрытие максимумов и минимумов нагрузок. На рис. 1.15 представлена однолинейная схема энергоцентра.

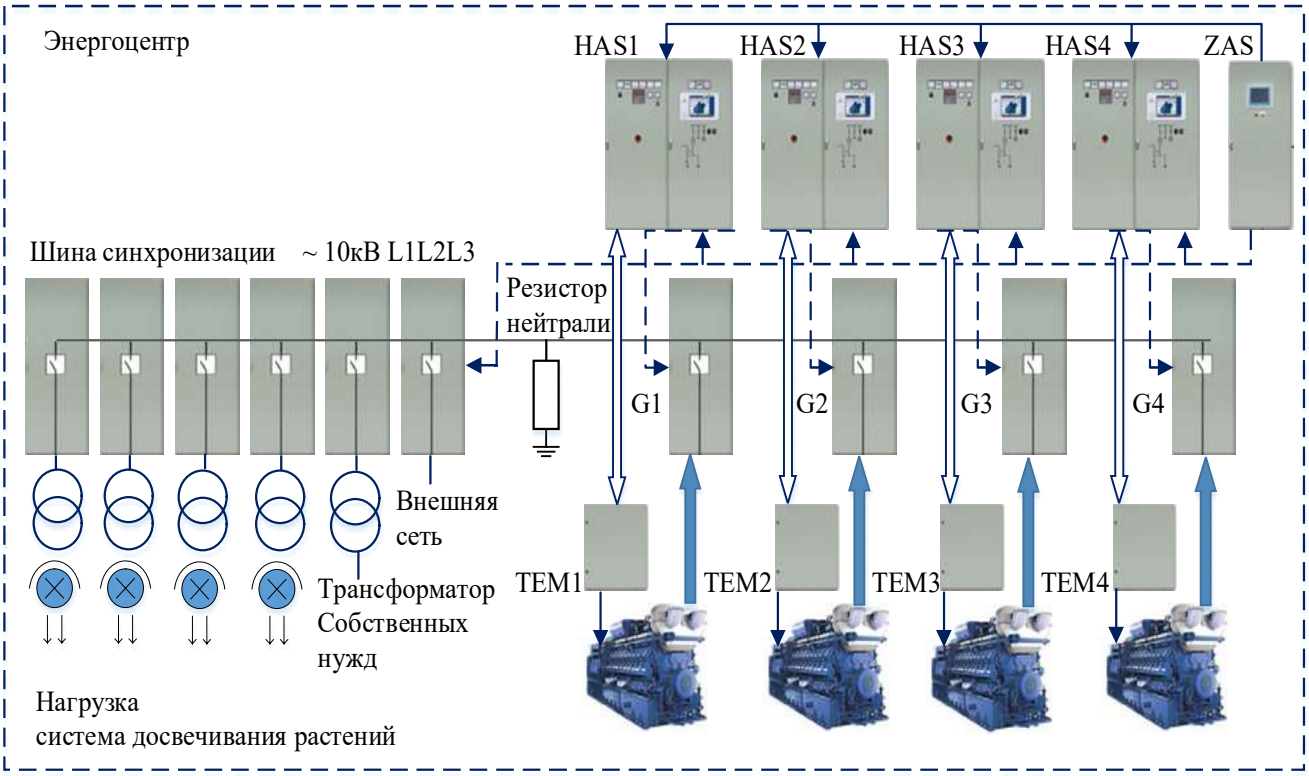


Рисунок — 1.15 Однолинейная схема энергоцентра,

где G1-G4 генераторы, TEM1-TEM4 шкафы защиты, HAS1-HAS4 шкафы управления

Преимущества когенерации по сравнению с обычными процессами выработки электроэнергии и тепла - эффективность использования топлива, автономность, минимальный уровень потерь мощности, в связи с близостью энергоцентра к потребителю. Собственная когенерация, совместная выработка полезной электрической и тепловой энергии позволяет значительно уменьшить затраты на электроэнергию, при идентичном потреблении газа. Эффективность подтверждается анализом структуры выработки энергоцентра и сведением энергетического баланса, рисунок 1.16 [100, 118, 148].

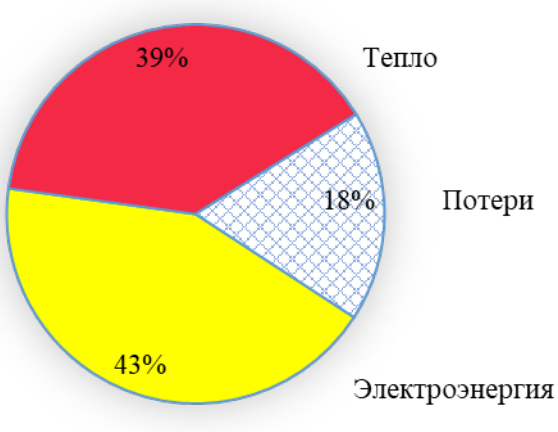


Рисунок 1.16 — Энергетический баланс когенерационного энергоцентра

Таким образом, при преобразовании первичной энергии газ, вырабатывается электрическая с КПД порядка 43%. Оставшаяся энергия снимается теплом, которое утилизируется, и потери.

В АО «Тепличное» г. Ульяновск эксплуатируется энергоцентр установленной электрической мощностью 6,4 МВт, на базе четырех агрегатов Caterpillar 2xCG170-20, 2xCG170-12 с газопоршневыми двигателями. Количество машин в работе, время ввода и вывода в работу задается автоматически системой управления технологией «Priva Connext». Приведем энергетические показатели работы энергоцентра. По имеющимся ретроспективным данным возможно определить практическое распределение потребленных и выработанных энергоресурсов. В таблице 1.5 приведены величины потребленных и выработанных энергоресурсов.

Таблица 1.5 — Показатели работы энергоцентра

Год	Выработка электроэнергии, тыс. кВт*ч	Объем потребленного газа, тыс. н*м^3	Выработка тепла, Гкал	Потребление электроэнергии на собственные нужды, тыс. кВт*ч
2016	11 374	2 826	11 080	389
2017	16 698	4 138	11 802	449
2018	20 708	4 922	13 199	508
2019	18 018	4 565	11 056	536
Всего	66 798	16 451	47 137	1 882

Энергоцентр имеет удельное соотношение потребления первичного источника и выработки вторичных источников энергии: - потребляет 1м^3 газа, вырабатывает 4 кВт*ч электроэнергии и 0,35 Гкал тепла. При сопоставимой стоимости энергоресурсов 1 м^3 газа и 1 кВт*ч электроэнергии, рациональность работы энергоцентра и эффективность распределения энергоресурсов очевидна. Стоимость собственной выработанной электроэнергии меньше промышленной сетевой электроэнергии.

Управление и контроль параметров работы энергоблока, а также мониторинг работы установок, системы утилизации тепла и других инженерных систем осуществляется с автоматизированного рабочего места оператора станции с использованием программного аппаратного комплекса SCADA. (Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных). Автоматизированная система позволяет получать и обрабатывать десятки тысяч цифровых и аналоговых сигналов, значительно облегчают оптимизацию эксплуатационных режимов систем, выполняют мониторинг технологических параметров, архивирование и хранение информации [82, 83, 111, 115]. SCADA – система автоматизации верхнего уровня выполняет – управление посредством задачи с рабочего места оператора, на нижнем уровне – локальных систем управления для отдельных технологических систем. Оператор оповещается об авариях и критических ситуациях технических систем с помощью сборного сигнала аварии визуального ряда и звукового оповещения.

Представленный ниже расчет показывает соотношение, вырабатываемых энергоресурсов на базе когенераторных агрегатов. Получаем экономическое обоснование объекта малой генерации и срок окупаемости проекта, таблица 1.6 [114, 120].

Таблица 1.6 — Расчет срока окупаемости газопоршневого энергоцентра

№ п/п	Наименование	Стоимость
1.	Газ, м^3	5,69 руб.
2.	Электроэнергия, кВт*ч	4,72 руб.
3.	Масло, литр	424,04 руб.

№ п/п	Наименование	Стоимость
4.	Антифриз, литр	129,09 руб.
5.	Расходы на обслуживающий персонал в месяц	150 000 руб.
6.	Расход масла на угар	0,2 г*кВт/ч
7.	Объем масла для замены	1200 л
8.	Объем системы охлаждения	1900 л
9.	Мощность электрической выработки	6,4 МВт
10.	Мощность тепловой выработки	5 МВт
11.	Расход газа номинальный	1574 м3/ч
12.	Электропотребление собственных нужд	120 кВт*ч
13.	Периодичность ТО	4000 моточасов
14.	Калорийность газа	8000 ккал/нм^3
15.	Электрический КПД установки	43,7%
16.	Тепловой КПД установки	43,3%
17.	Потери тепла при транспортировке	8%
18.	Потери электроэнергии при транспортировке	6%
19.	Стоимость электроэнергии за первый год	1,86 руб.*кВт/ч
20.	Стоимость электроэнергии за 2-10 год	2,02 руб.*кВт/ч
21.	Срок окупаемости	3,6 лет

Из проведенного технико-экономического анализа видно, что внедрение объекта собственной генерации имеет целесообразные затраты и низкую цену основного выходного продукта – электроэнергии.

Выводы по первой главе

Проведенный обзор элементов электротехнического комплекса показал, что основные источники первичных энергоресурсов по объему и значимости – газ, электроэнергия, вода. Вторичными энергоресурсами является тепло и электроэнергия. Тепло вырабатывается котельными и когенераторным энергоцентром. Собственная сгенерированная электроэнергия идет на систему довечивания. Потребителями электроэнергии являются система досвечивания, насосное и технологическое оборудование. Структура энергоресурсов имеет выраженную сезон-

ность потребления с максимумом потребления в зимний период, видна явная корреляция потребления энергоресурсов от наружных температур. Доля электроэнергии в ТУТ изменяется от 6 до 17%. Анализ показал, что наибольшая эффективность технических мероприятий по энергосбережению будет наблюдаться при улучшении динамических характеристик электротехнического комплекса тепличного комбината.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЦЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ

2.1 Сезонность

Потребление энергоресурсов зависит от многих внешних и внутренних возмущающих факторов и имеет цикличность. Оказывает влияние наружный климат, технологический температурный режим, время суток, световой период времени года, режим работы персонала, стадия роста растений.

Для энергопотребления характерно наличие циклических колебаний, а также влияние случайных факторов. Наличие данных потребления и способ моделирования позволяет выполнить прогнозирование и выбрать оптимальные режимы работы оборудования электротехнического комплекса. На основании суточных данных профилей потребления энергоресурсов построен график, рисунок 2.1.

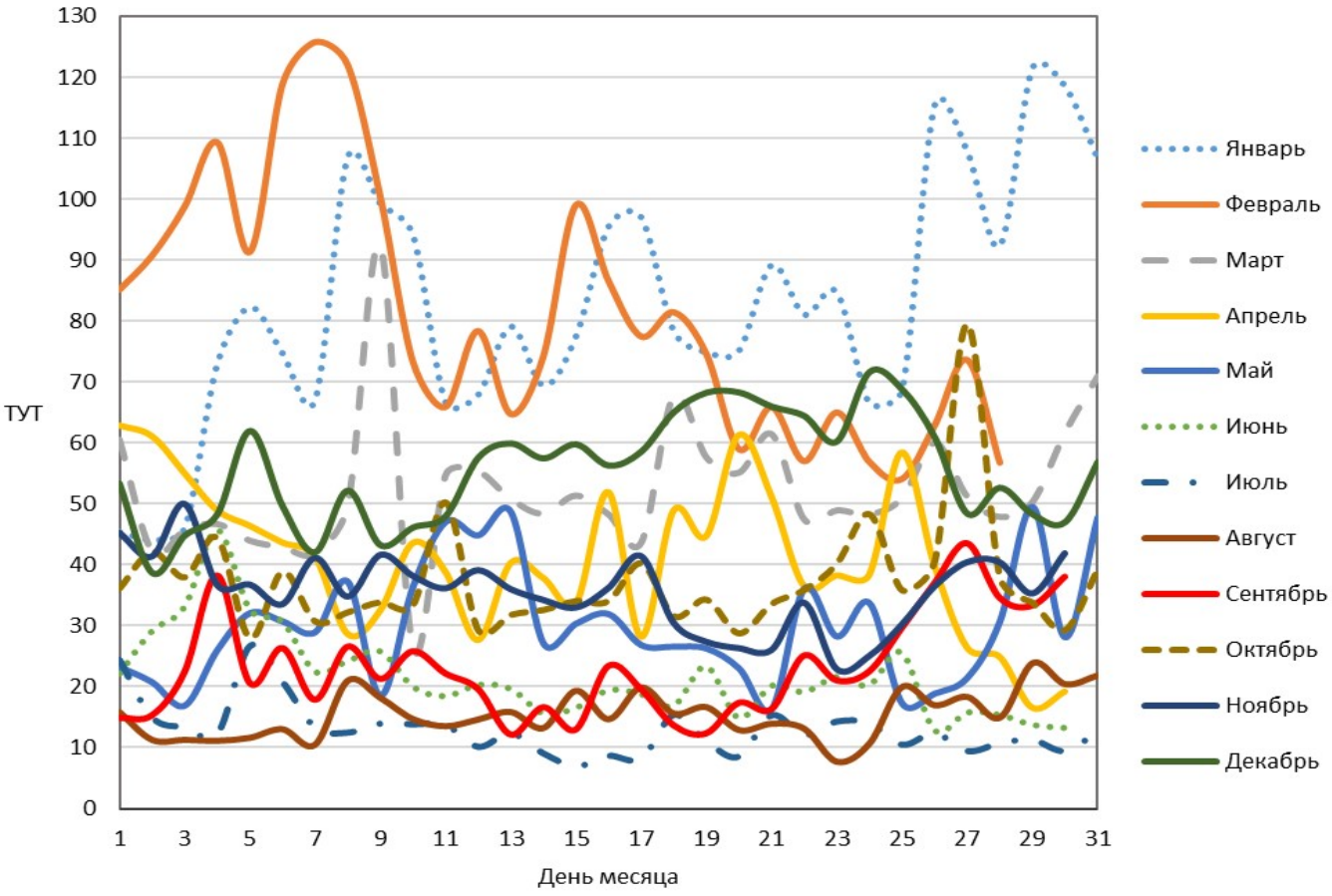


Рисунок 2.1 — График потребления энергоресурсов по месяцам

По профилю фактического потребления и динамическим изменениям нагрузок на суточном интервале наблюдается значительный разброс объема энергоресурсов. Неравномерность суточных объемов объясняется отработкой оборудования внешних изменений наружной климатической обстановки, температуры, ветра, влажности, солнечной радиации. Характер энергопотребления тепличного комбината затрудняет краткосрочное прогнозирование, усложняет применение и проведение корректирующих энергосберегающих мероприятий.

Исследование объемов потребления энергоресурсов, опираясь на ретроспективные данные почасового потребления, показало, что в рассматриваемом случае имеется явная сезонная цикличность и цикличность технологических процессов, на пример включение энергоемкой системы досвечивания растений. Сезонность потребления главным образом обусловлена температурным фактором. Существенная доля потребления приходится на зимние месяцы. В качестве обобщенного показателя анализа энергоресурсов используем ТУТ (тонна условного топлива) [4]. Потребление объема энергоресурсов по сезонам года распределяется следующим образом, рисунок 2.2 [103, 140].

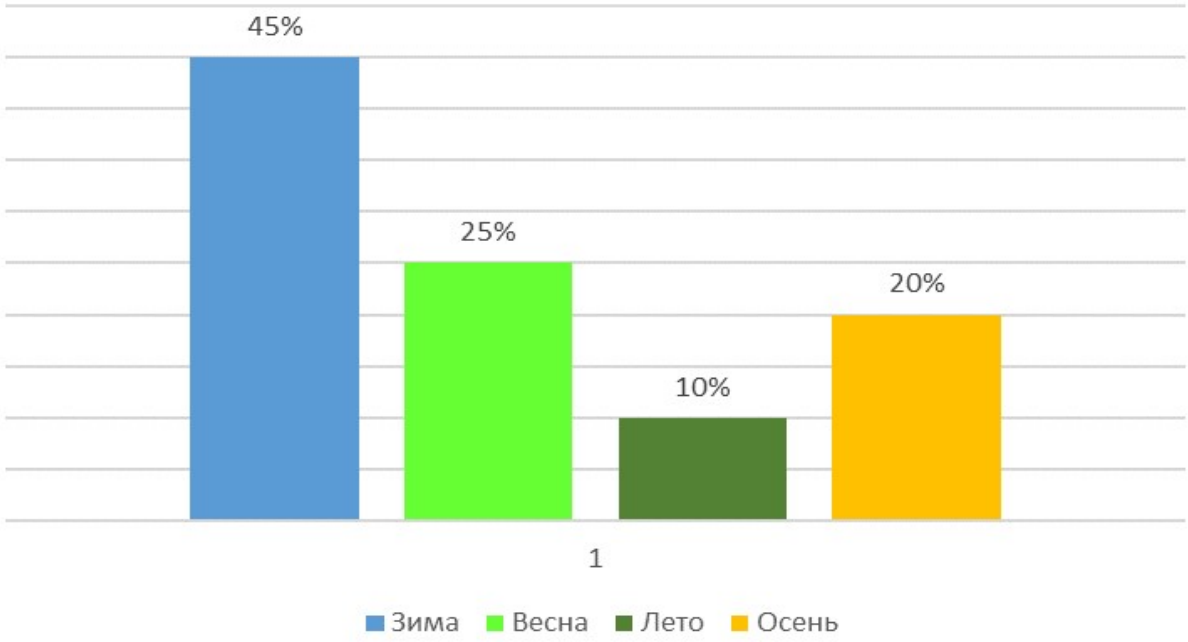


Рисунок 2.2 — Годовое распределение объема потребления энергоресурсов

Максимум потребления энергоресурсов и затрат приходится на зимний период. Объем потребления в весенние месяцы сопоставим с низкими наружными

температурами, но высокой интенсивностью солнечного освещения и большим количеством солнечных дней, чем в осенний период. Меньшее потребление в осенний период объясняется технологической загрузкой оборудования и имеющейся временной паузой. Летнее потребление энергоносителей затрачивается на обеспечение подогрева технологической воды, технологического энергооборудования и административно - бытовой нагрузки. Отопление теплиц в летний период ограничивается по наружной температуре.

Из проведенного первичного анализа тренда потребления энергоресурсов следует, что наибольшая эффективность технических мероприятий энергосбережения реализуется в зимние месяцы. Потребление электроэнергии подвержено влиянию внешних и внутренних факторов и имеет явную сезонную структуру.

2.2 Структура энергоресурсов (электроэнергия, газ, вода)

Для унификации расчета и учета энергоресурсов применяем показатель ТУТ – условное топливо по угольному эквиваленту, к чему с коэффициентами пересчета приводим потребляемые энергоресурсы. Получен годовой график потребления энергоресурсов на рисунок 2.3.

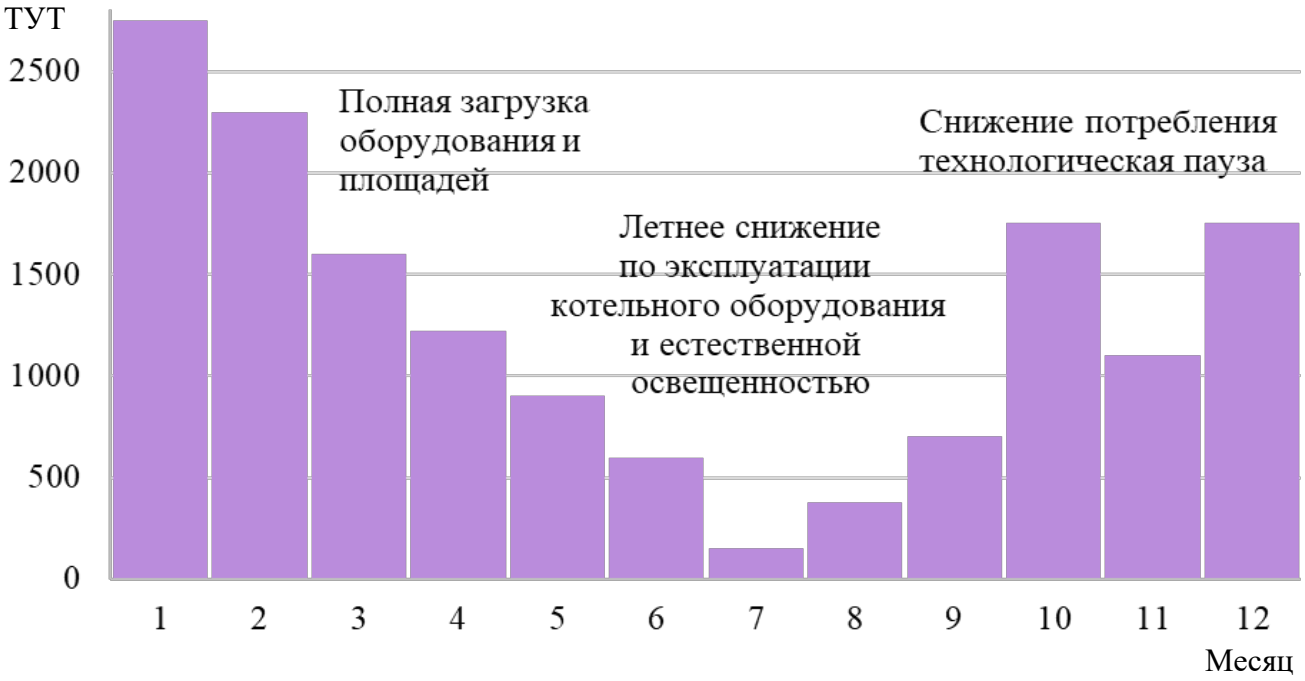


Рисунок 2.3 — График распределения потребления энергоресурсов по месяцам

Основным возмущающим фактором влияния на потребление энергоресурсов является наружная климатическая обстановка. При рассмотрении технологии работы предприятия по месяцам имеются повторяющиеся, но различные по составу и мощности нагрузки энергетического оборудования [10]. Суточные объемы потребления энергоресурсов могут отличаться до 18 раз. Такое влияние оказывают изменения наружной солнечной радиации (ясно или пасмурно), температуры воздуха, скорости ветра, влажности воздуха. Потребление энергоресурсов по сезонам года распределяется следующим образом: -зимой 45%, - весной 25%, - летом 10%, - осенью 20%. Меньшее потребление в осенний период объясняется технологической паузой.

Рассмотрим потребление комбината в типовой зимний и летний день. Суточный профиль электроэнергии, газа, температуры в теплице, наружной солнечной радиации, наружной температуры, скорости ветра представлен на рисунках 2.4, 2.5. По графикам наблюдается повышение температуры в теплице при увеличении солнечной радиации. Потребление электроэнергии имеет увеличение по часам загрузки оборудования и котельных, увеличении работы оборудования в часы рабочего времени. Потребление газа увеличивается в часы рабочего дня - при длительном открытии дверей в теплицах, в зависимости от наружной климатической обстановки, солнечной радиации, температуры, скорости ветра. Потребление электроэнергии в летний день идет на нагрузку котельных. Поэтому имеется явная корреляция потребления между потребленной электроэнергией и газом.

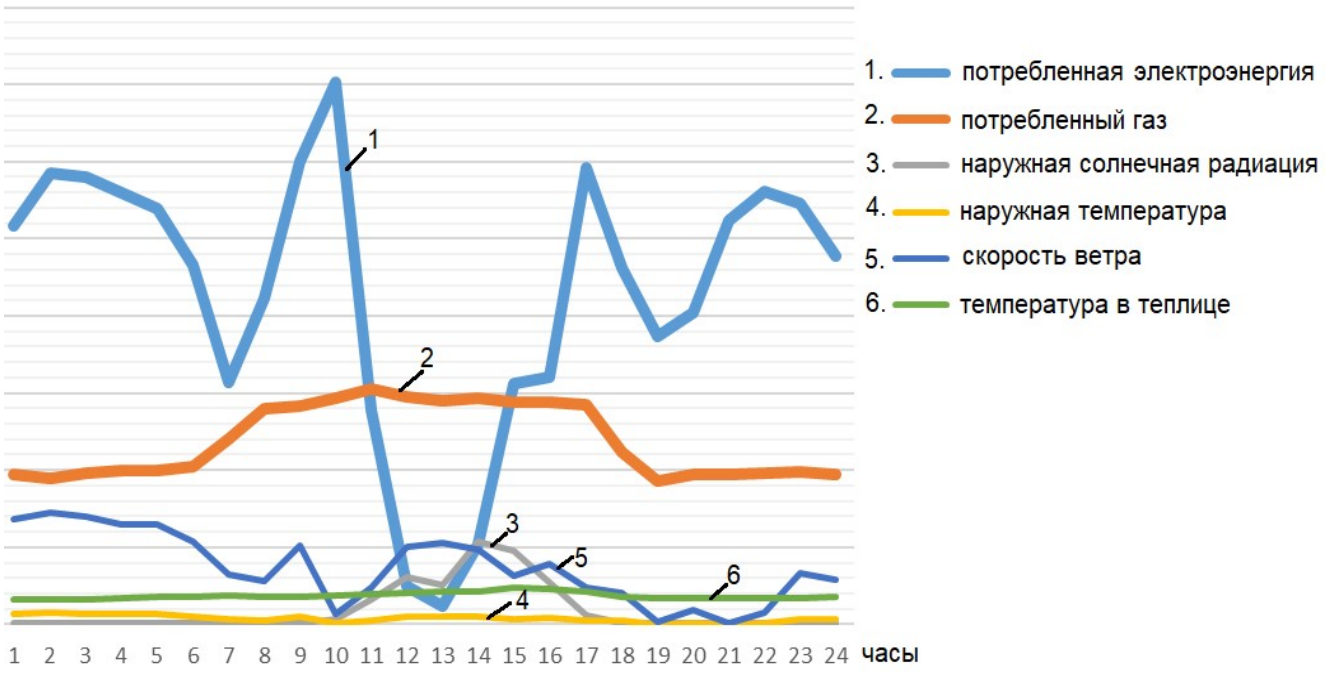


Рисунок 2.4 — Профиль энергопотребления тепличного комплекса в зимние сутки

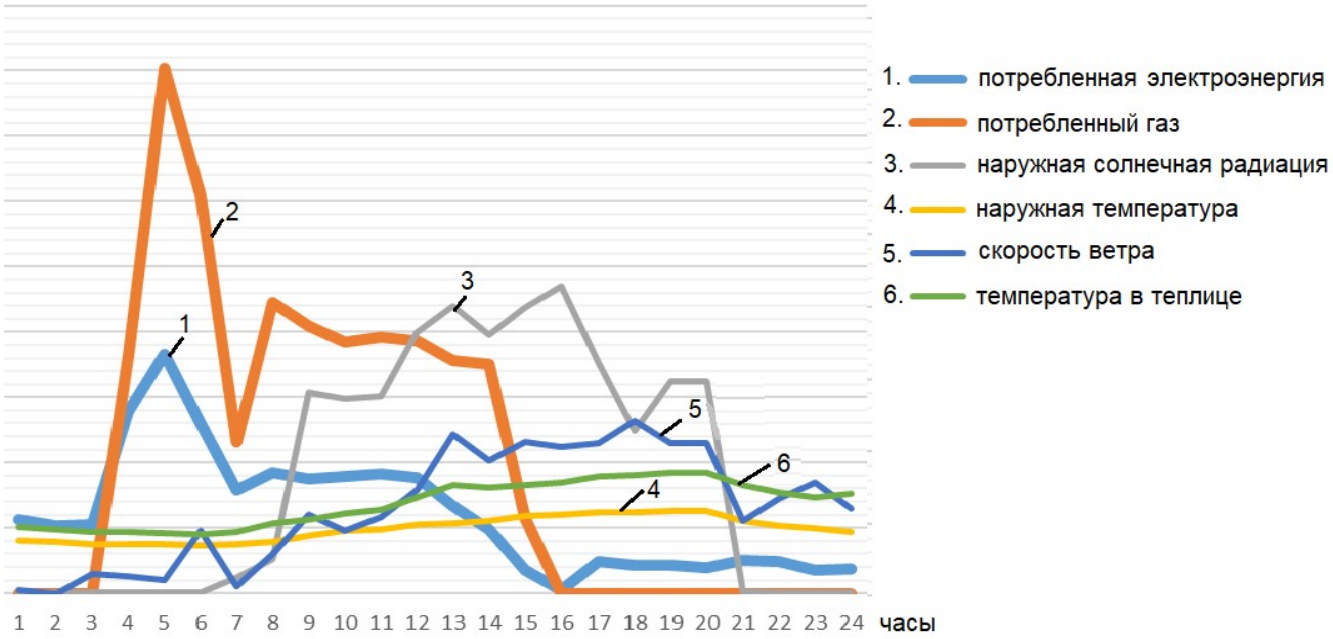


Рисунок 2.5 — Профиль энергопотребления тепличного комплекса в летние сутки

В зимний день, при увеличении солнечной наружной радиации отключается система искусственного досвечивания и потребление электроэнергии снижается. Изменение расхода газа происходит по потреблению тепла из теплоаккумулирующих емкостей.

При анализе количественного соотношения годового потребления газа и электроэнергии наблюдается преобладание объема потребления энергии на отоп-

ление. Диаграмма объемов потребления энергоресурсов в процентном соотношении представлена на рисунке 2.6.

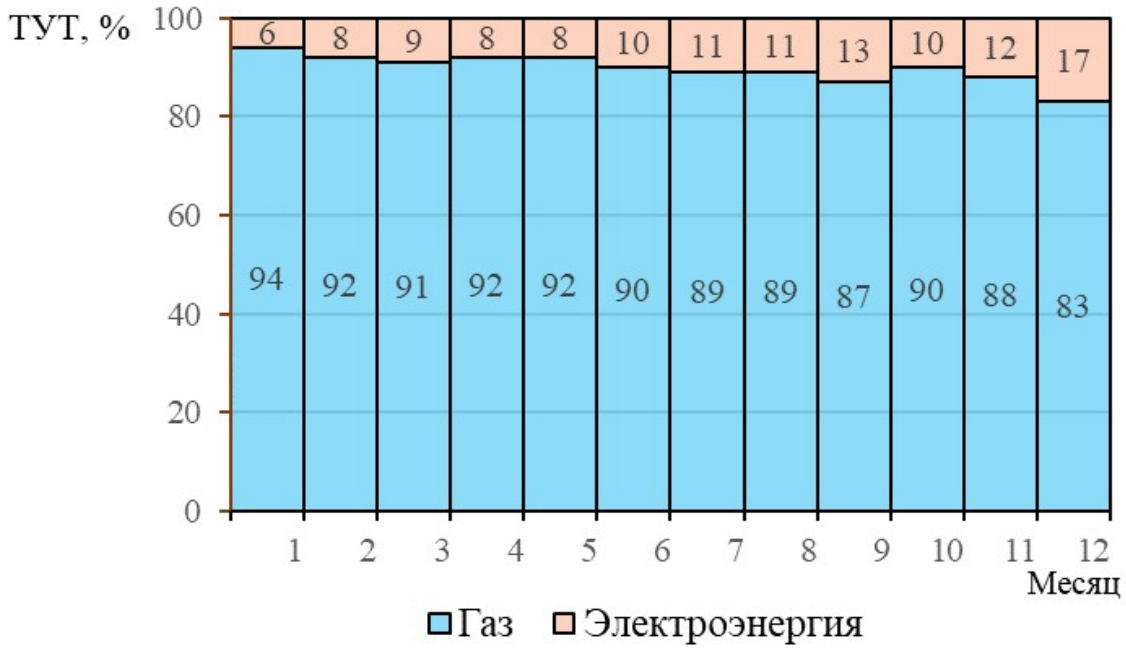


Рисунок 2.6 — Диаграмма объемов потребления энергоресурсов

2.3 Оценка долевой составляющей потребителей энергоресурсов

Для определения и оценки распределения долевой составляющей потребителей энергоресурсов рассмотрим структуру электротехнического комплекса. Электротехнический комплекс тепличного комбината представим системой, состоящей из преобразовательного, технологического, передаточного, управляющего устройств и предназначенной для осуществления технологического процесса [34, 94-96, 149]. Подвод энергетических ресурсов осуществлен промышленной сетевой электроэнергией и магистральным природным газом. Структурная схема представлена на рисунке 2.7.

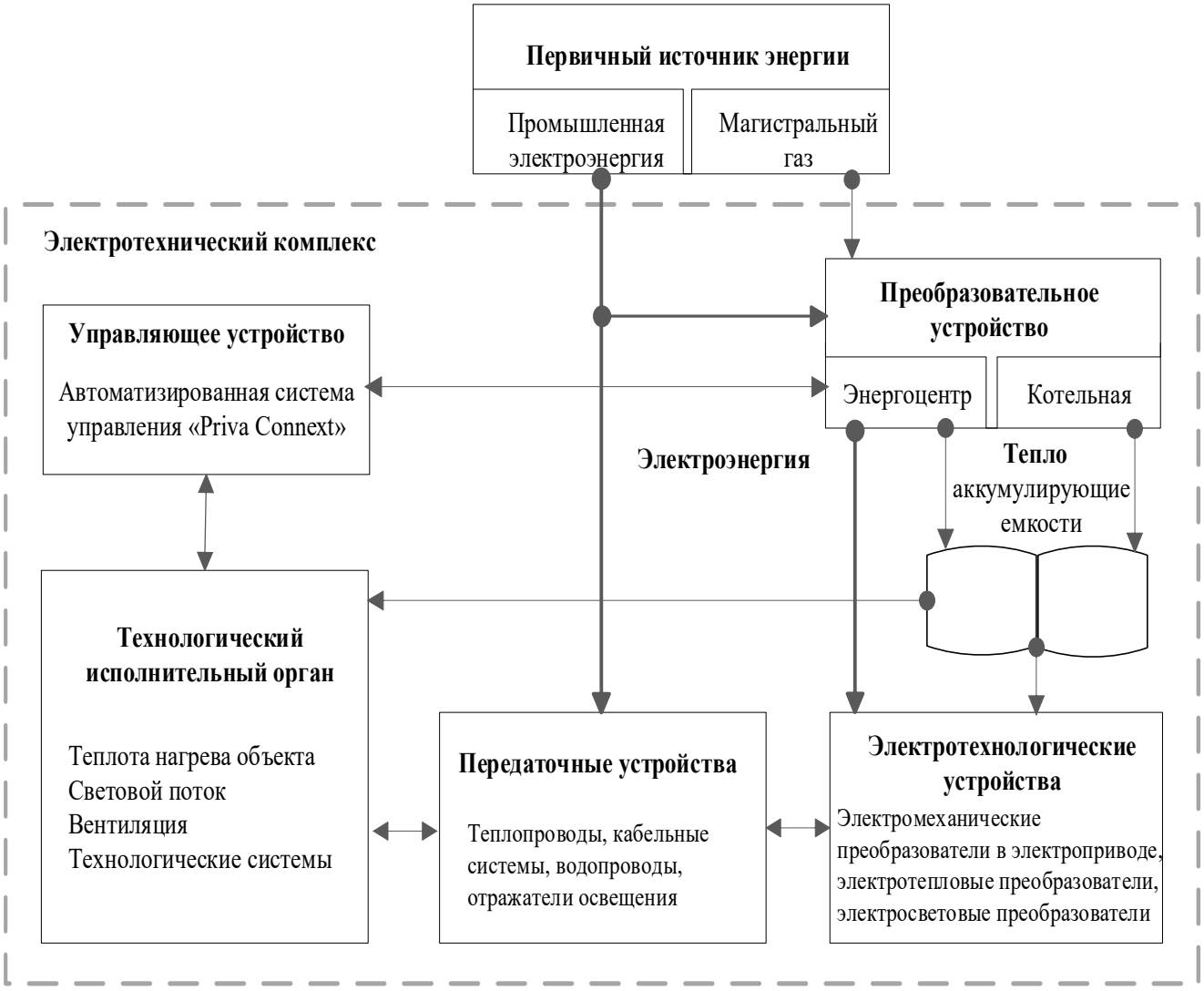


Рисунок 2.7 — Структурная схема электротехнического комплекса

Первичный источник промышленной сетевой электрической энергии расходуется на технологические нужды энергоцентра и электроснабжение технологических устройств. Первичный источник магистрального газа снабжает энергоцентр и котельные. Преобразовательные устройства – электротехнические устройства, обеспечивающие согласование первичных источников энергии и электротехнических устройств. Электротехнологические устройства - электромеханические преобразователи электроприводов, электротепловые преобразователи, светотехнические преобразователи, осуществляющие процесс преобразования электроэнергии. Передаточные устройства – механические преобразователи электроприводов, теплообменники, трубопроводы, рефлекторы, отражатели в светильниках. Технологический исполнительный орган – тепловая энергия нагрева,

световой поток светотехнической установки. Управляющее устройство электротехнического комплекса – автоматизированная система управления высшего уровня автоматизации «Priva Connext».

Электротехнический комплекс в своем составе имеет оборудование, потребляющее первичные энергоресурсы – электроэнергию и газ. По ретроспективным данным годового объема потребления проводим оценку долевой составляющей затрат по видам ресурсов. На рисунке 2.8 приведен график годовых затрат тепличного комбината на газ и электроэнергию.

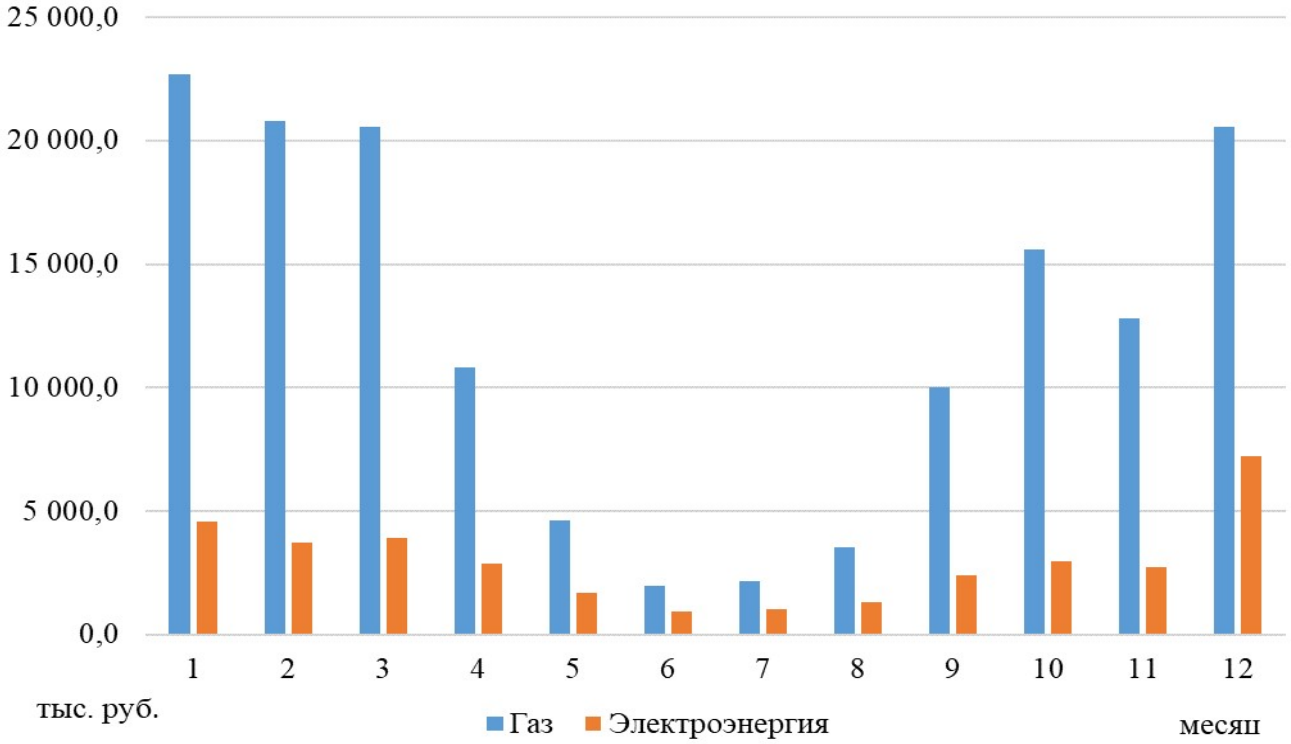


Рисунок 2.8 — График годовых затраты на энергоресурсы

При визуальном анализе графика годовых затрат, значительно выражено превышение затрат на энергоресурс газ. Долевая составляющая годовых затрат потребления электроэнергии электротехническим комплексом тепличного комбината составляет 24% от энергоресурса газа. Структура и объем годового потребления и распределения по видам энергоресурсов сохраняется. Таким образом, достижение оптимизации эффективной работы электротехнического комплекса с большим результатом возможно при рассмотрении работы газопотребляющего оборудования, т.к. основные затраты приходятся на создание внутреннего микроклимата и обеспечение тепловых режимов теплиц [112].

2.4 Оценка энергопотребления по группам оборудования (нагрев, освещение)

Промышленный тепличный комплекс, предназначенный для круглогодичного выращивания сельскохозяйственной продукции, обеспечивается следующей установленной мощностью источников энергии:

- тепловая мощность для создания микроклимата и обогрева 3 МВт/га;
- электрическая мощность светотехнической установки досвечивания 2,4 МВт/га;
- электрическая мощность технологического оборудования 0,1 МВт/га.

Важным резервом снижения энергоемкости тепличной продукции и повышения урожая тепличных культур является применение систем согласованного управления и регулирования микроклимата в теплицах. Научная разработка таких систем была начата в конце 60-х гг. прошлого столетия. Сущность его в том, что при управлении сложной, многофакторной системой управления из всех переменных параметров выбирается основная, наиболее быстро меняющаяся. Основными контролируемыми параметрами микроклимата внутри теплицы являются температура воздуха и влажность. Производственная агротехника предписывает точность поддержания температуры +/-1°С. Влажность воздуха также является задающим условием, которое варьируется в солнечные дни 85-90%, в пасмурные 75-85% [146]. Получаем техническую систему с большим количеством динамических параметров: внешних – температура, солнечная радиация, ветер, направление ветра, влажность, облачность; внутренних – нагрев системы искусственного освещения, влажность от испарения растениями, поливами, перепадами температур, концентрация углекислого газа, система принудительной вентиляции, фрамужная вентиляция, энергосберегающее экранирование.

Для обеспечения поддержания заданного микроклимата в теплице необходимы точные сведения о состоянии окружающей среды. Необходимая информация поступает от стационарной метеостанции, которая работает в автоматическом режиме. Ее датчики измеряют наружную температуру воздуха, интенсивность солнечной радиации, величину выпавших осадков, скорость и направление ветра.

Это позволяет при изменении погодных условий своевременно скомпенсировать негативное воздействие атмосферы.

Рассмотрим суточный режим работы теплицы. Примем к рассмотрению сутки с минимальными внешними колебаниями – перепад температуры наружного воздуха 4° С, ветер до 2,8 м/с, низкая солнечная радиация. Внутри наполнение теплицы - растения средней стадии роста, типовые режимы поливов без дополнительных обработок. Температура внутри теплицы в течение суток задана в пределах ночных температур от 18,5°С и дневных до 21°С, поддержание влажности на уровне 75%. Данные получены от центрального процессора технологии «Priva Connext». Графики изменения показывают, что значения контролируемых параметров микроклимата теплицы, значительно отличаются от заданных (рисунок 2.5, 2.6). Наблюдаются перегрев теплицы, избыточная влажность воздуха [151].

2.5 Система искусственного досвечивания

Использование технологий искусственного ассимиляционного досвечивания растений позволяет значительно повысить урожайность, продлить сезон плодоношения. Светотехническая установка обеспечивает требуемый уровень освещенности, оптимизированный в соответствии со временем года и продолжительностью светового дня. Управление осуществляется по датчику освещенности, с возможностью регулирования включения мощности ламп по ступеням 50, 60, 70, 80, 90, 100%. от номинального уровня световой освещенности.

Система освещения выбрана исходя из критерия обеспеченности наилучшего фотосинтеза и плодоношения растений, экономической эффективности, эксплуатационной пригодности. Особое влияние на энергосистему предприятия оказывает пусковой режим системы досвечивания. Большие мощности и пусковые токи розжига ламп оказывают влияние на качество электроэнергии и загрузку энергосистемы. Электрическая мощность светотехнической установки для культуры огурца составляет 2,4 МВт на один гектар теплиц. Для снижения пиковой нагрузки применен режим запуска световых гирлянд с выдержкой времени и заложены коммутационные электроаппараты с дугогасящими контактами [65].

Одновременно со световым потоком лампа излучает значительный тепловой поток. При включении системы досвечивания, температура в теплице возрастает на 4°С. Поэтому система автоматизации "Priva Connext " отслеживает сигнал запроса на освещение, дает команду на готовность энергоцентра выдачи электрической мощности, предупредительно снижает подачу теплоносителя. После выдержки температуры и подготовки систем, запускает плавное включение гирлянд светильников с прописанным алгоритмом очередности, имитируя режим "рассвет - закат". Преимущество установки автоматизированной системы управления – повышение стабильности работы и эффективность использования тепловой и электрической энергии [25, 57, 137]. Сбор и анализ информации и наличие ретроспективных данных позволяет выполнять прогнозирование энергопотребления и корректировку режимов

В автоматическом режиме выполнено управление включения пультов досвечивания по отдельности и регулирование освещенности от сигнала верхней системы управления. Очередность включения пультов уточняется по технологической стратегии. В ручном режиме управления оперирование выполнено от пультов управления. Одним из мероприятий по энергосбережению является применение конструктивно энергоэффективного оборудования.

Таким образом, рассмотренная система искусственного освещения оказывает влияние на определение режимов и регулирование подачи теплоносителя [67, 68, 91, 92]. Использование энергии происходит при постоянной передаваемой электрической мощности. Система первичного энергопреобразования лучистой энергии подается в воспринимаемую растениями световую и выделяемую тепловую, существенную дополнительную систему нагрева теплиц. Наглядное представление влияния температурного нагрева от искусственного и естественного освещения на микроклимат в теплице представлено на рисунках 2.9, 2.10.

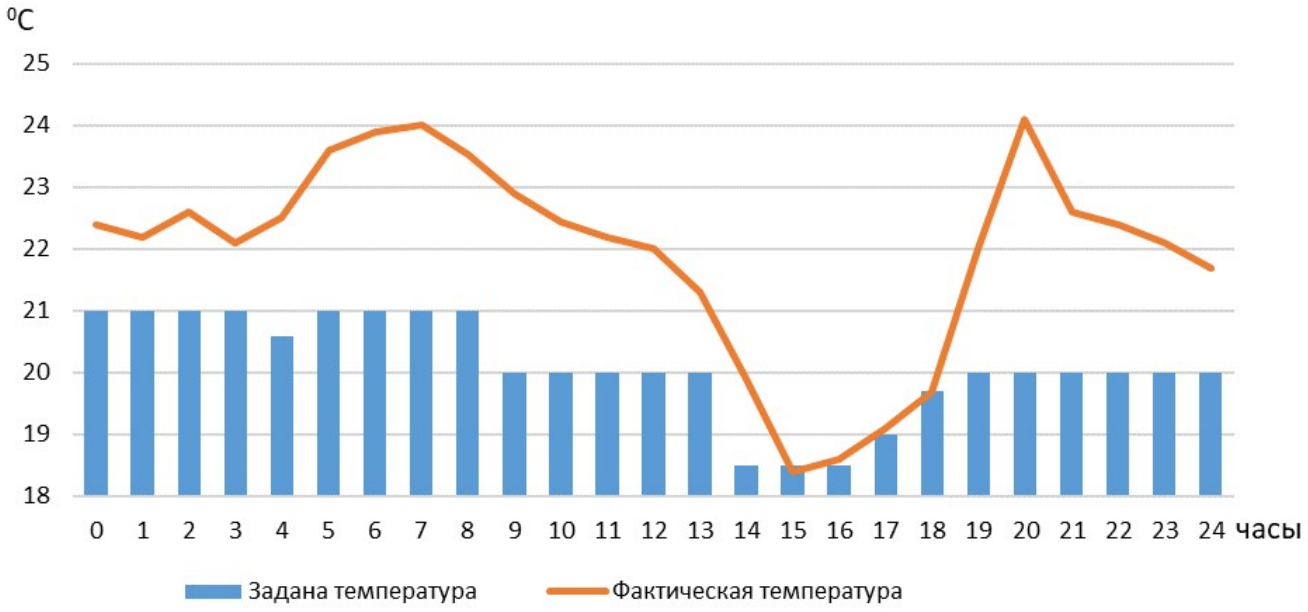


Рисунок 2.9 — Суточный график температуры в теплице

Рисунок 2.10 — Суточный график влажности в теплице

Профиль графика температуры теплицы имеет значительное превышение температуры во временные периоды включения системы досвечивания. Гирлянды светильников системы досвечивания, при облучении растений, попутно выделяют значительное количество теплоты, приводящее к наблюдаемому перегреву. Для уменьшения колебаний температуры в теплице выполнена плавная система запуска светильников по процентам включения мощности с выдержкой времени 60%, 70%, 80%, 90%, 100% P_n. Одновременно выполнена предупредительная

коррекция системой автоматизации для компенсации нагрева. Отработка существующей корректировки электротехнического комплекса не обеспечивает требуемого регулирования температуры теплицы.

Таким образом, автоматизированная система управления микроклиматом теплицы, имеет отклонение параметров микроклимата по температуре до 4,1 °С, накопительно до 9%, и по влажности до 7%. Имеется резерв энергосбережения по потреблению тепла и утилизации нагрева от системы досвечивания.

2.6 Возможные пути улучшения микроклимата теплицы

Для контроля параметров микроклимата в теплице устанавливаются соответствующие устройства традиционного типа, которые контролируют конкретный параметр в конкретной точке теплицы. В зависимости от площади блока теплицы и используемой схемы автоматизации, может устанавливаться от 2 до 8 датчиков. В среднем на 1 га приходится 2 - 4 датчика, рисунок 2.11.

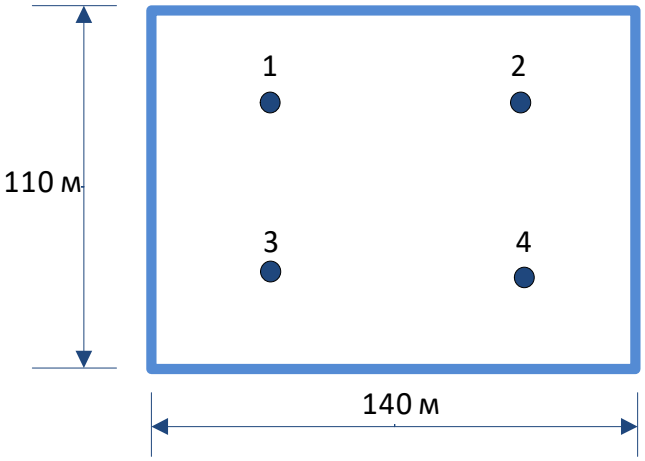


Рисунок 2.11 — Схема расположения датчиков параметров микроклимата в теплице

При рассмотрении аппаратной реализации системы автоматического регулирования микроклимата, выявлена неоднозначность измерения контролируемых параметров различными типами приборов. Заданная температура внутри теплицы +22 ºС. Имеются расхождения значений по датчикам контролируемых параметров, таблица 2.1.

Таблица 2.1 — Результаты измерения температуры

Тип датчика	Датчик				Средняя температура/4, °С	Δ, %
	№1	№2	№3	№4		
Штатный	22,4	21,6	22,6	21,9	22,1	0,5
Термометр	23,2	24,2	24,9	22,2	23,6	7,4
Тепловизор	25,0	26,0	26,0	24,0	25,3	15,0
Средняя температура/3, °С	23,5	23,9	24,5	22,7	23,7	7,4
Δ, %	6,8	8,6	11,4	3,2	-	-

Средняя ошибка измерения Δ, % показывает, что наименьшее значение соответствует штатному датчику. У штатного датчика имеется разброс значений в пределах от -2 до +3%.

По усредненным показателям на отопление природным газом 1 га крытых теплиц в зимний день со среднесуточной температурой -25°С, по тарифам 2019г., потребуется около 60 тыс.руб./сутки. Можно оценить перегрев в 1°С теплицы площадью 1 га за одни сутки обойдется стоимостью в 2,7 тс. руб. Отсюда следует, что перегрев теплицы дает значительный перерасход энергоресурсов, повышенный износ энергоагрегатов, и неблагоприятно сказывается на агротехнологии. Полная информация о параметрах в различных зонах теплицы большой площади отсутствует, имеется отклонение от нормируемых заданных характеристик температуры, влажности, газации CO_2. Имеется необходимость повысить точность измерений за счет получения достоверной информации, характеризующей параметры микроклимата теплицы для зонального регулирования.

Для решения этой задачи предлагается устройство контроля параметров микроклимата в теплице с интегрированным измерением температуры, влажности, газовым составом воздушной среды по всему объему помещения [52].

Измерения заданных величин производятся посредством контроля затухания звуковых колебаний. Полученные значения затухания звуковых колебаний

переводятся с помощью табличного вычислителя в соответствующие значения напряжения U_t, U_φ, U_{CO2}, пропорциональные температуре, влажности, газации CO_2. Таким образом находится интегрированная оценка микроклимата по теплице.

Известно [33, 36, 37, 104, 143, 147, 153], что скорость распространения и коэффициент затухания акустических колебаний звука напрямую зависят от многих параметров, основным из которых являются температура и влажность. Выражение для вычисления скорости звука C в воздухе имеет вид [126, 138]:

$$C = \alpha\sqrt{T} \qquad (2.1),$$

где T – абсолютная температура в градусах Кельвина.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R}{M}} \qquad (2.2);$$

$\gamma = 1{,}4$, зависит от числа степеней свободы молекул газа, для двухатомных молекул, из которых преимущественно состоит атмосфера.

$\gamma = 1{,}33$, для трехатомных молекул воды, с наличием паров в атмосфере.

R=8,31446 Дж/(моль·К)– универсальная газовая постоянная;

M – молярная масса.

Измерение скорости распространения звука в пределах теплицы позволит получить интегральное значение, в котором заложена информация о температуре (t°C) и влажности (концентрация водяных паров h). Для получения конкретных значений температуры и влажности необходимо иметь второе уравнение, которое может снижать зависимость, характеризующее коэффициент затухания звука (α). Сравнение двух зависимостей показывает, что коэффициент затухания звука (α) позволяет получить больше информации, так как в отличие от скорости звука, коэффициент затухания зависит еще и от частоты (f). Поэтому, для единообразия вычислений можно использовать измерение коэффициента α на различных частотах f.

Известно [1, 73, 84], что при прохождении звука чистого тона вследствие звукопоглощения, расстояние S, начальное звуковое давление P_0 спадает по экспоненте до значения P_s. На основании этого можно записать уравнение

$$P_s=P_o-0,1151\alpha S \quad (2.3).$$

В процессе измерения известными величинами будут P_o, P_s, S, f. Коэффициент затухания α является функцией нескольких переменных

$$\alpha=F(t_o, h, f, x_1 \ldots x_n) \quad (2.4),$$

где $x_1 \ldots x_n$ - величины, мало влияющие на α, или являются неизменными в рассматриваемой задаче.

Процесс вычисления значений температуры и влажности происходит на основе двух вычислений для различных значений частот f в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунок 2.12 .

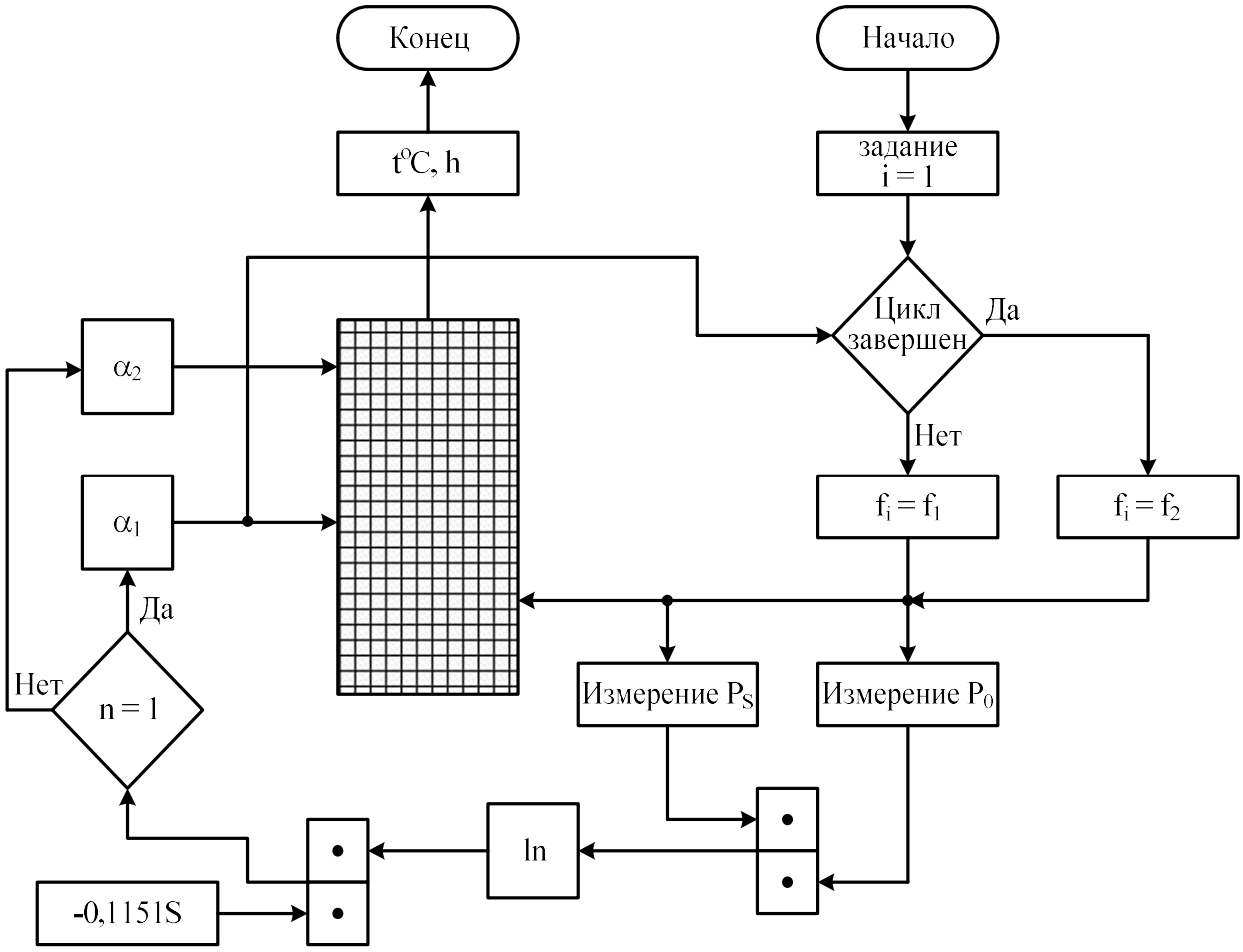


Рисунок 2.12 — Алгоритм вычисления t° C, h

Исходя из формулы (2.1), необходимо выбрать значение частоты (диаграмма частот) таким образом, чтобы чувствительность P_s к изменениям α была максимальной:

$$S_{Ps}{}^{\alpha} = \frac{dP_S}{d\alpha} \cdot \frac{\alpha}{P_S} \quad (2.5).$$

Расчеты на основании формулы (2.5) показывают, что максимум чувствительности достигается при условии:

$$0{,}1151\ \alpha = 1\ ,$$

$$\text{или} \qquad \alpha = \frac{1}{0{,}1151S} \quad (2.6),$$

с учетом размеров теплицы, расстояние S=0,14 км, получаем α = 62,06.

В таблице 2.2 представлены выборочные значения частоты звука из Межгосударственного стандарта [36].

Таблица 2.2 — Значения частоты звука

t°C	f_{rs}	h=10%	h =100%
20	1600	31,3	7,68
20	4000	109,0	19,4
25	1600	24,5	9,61
25	4000	110,0	20,6

Из таблици видно, что для влажности h наибольший коэффициент передачи достигается при частоте звука 4000 Гц. Очевидно, что для других значений S диапазон частот будет другим.

Коэффициент передачи для влажности

$$K = \frac{\Delta\alpha}{\Delta h} \approx 1\ . \quad (2.7)$$

Для температуры наибольший коэффициент передачи достигается при низкой частоте звука (4000 Гц)

$$K = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \approx 0{,}5...1{,}5\ . \quad (2.8)$$

Для обеспечения высокой точности работы системы управления необходимо измерять параметры микроклимата с низкой погрешностью. Одним из возможных путей является увеличение количества измерений. В соответствии с известным выражением [4], получаем

$$r_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})}{N-1}} \qquad (2.9),$$

где r_x – среднеквадратичное отклонение;

x_i – измеренное значение;

x – среднее измеренное значение.

С учетом того, что значение контролируемой координаты изменяются медленно (несколько минут), а процедура измерения на несколько порядков быстрее, число их измерений может быть ~ 50-100.

2.7 Компенсация инерционности нагрева теплицы

В рассматриваемом тепличном комплексе и на аналогичных объектах процессы теплового нагрева и охлаждения представляют системы с большими инерционностями по временному периоду [6, 32, 42, 43, 66, 99]. На рисунке 2.13 приведена функциональная схема электротехнического комплекса управления температурой теплицы.

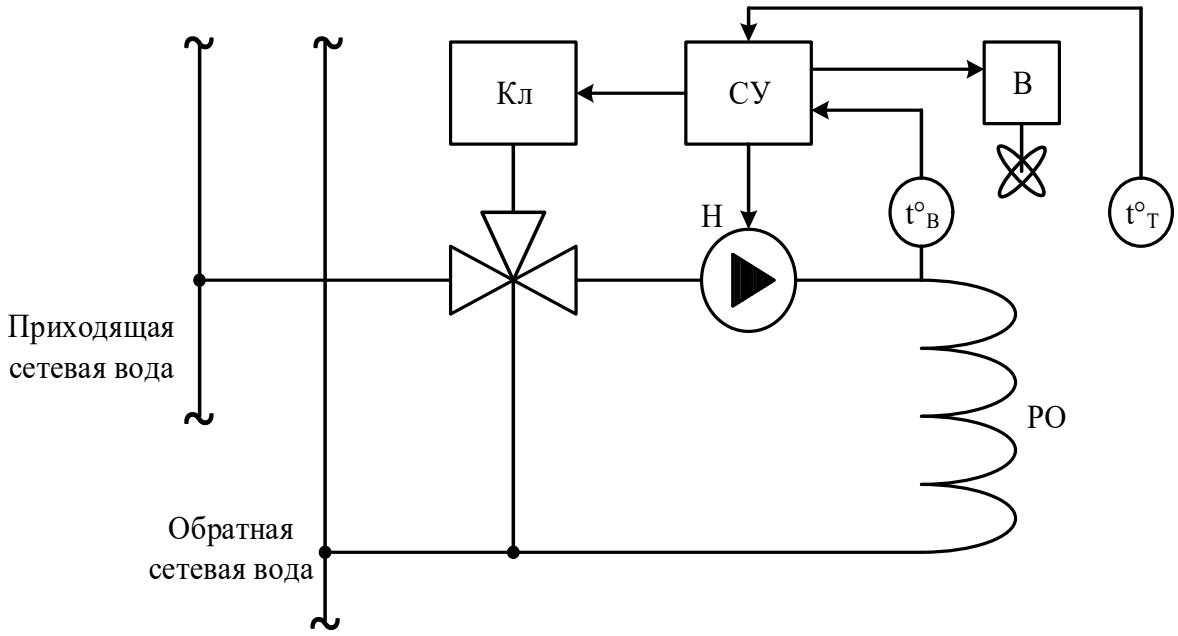


Рисунок 2.13 — Функциональная схема электротехнического комплекса управления температурой теплицы

Насос (Н) обеспечивает циркуляцию воды в конуре регистров отопления (РО). При необходимости увеличения температуры система управления (СУ) подает команду на открытие клапана (Кл) и более горячая вода из приходящей сети подмешивается в контур циркуляции. (рисунок 2.14). Для регулирования скорости теплопередачи РО можно изменять частоту вращения двигателя вентилятора В (рисунок 2.15).

Рисунок 2.14 — Электрооборудование системы управления циркуляцией воды в конурах регистров отопления

Рисунок 2.15 — Вентилятор теплицы

Как отмечается [2, 60, 69, 130], регулирование подачи насосов применяют при необходимости изменения количества теплоносителя, подаваемой насосом, в связи с требованиями технологического процесса или изменением потребности. Поэтому подачу теплоносителя циркуляционным насосом системы отопления требуется регулировать в зависимости от необходимого запроса количества теплоты.

Рассмотрим переходный процесс нагрева теплицы [3, 59, 70, 117, 121]. При медленных изменениях в качестве тепловой модели для оценки температуры оказывается приемлемым представление элементов тепличного комплекса инерционными звеньями с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{1/A}{TP + 1}, \qquad (2.10)$$

где A – теплоотдача,

T=c/A – тепловая постоянная времени,

с – теплоемкость.

На рисунке 2.16 представлена модель этого звена.

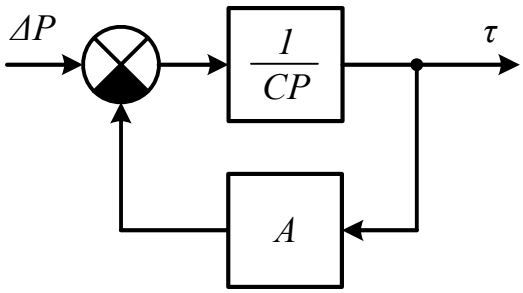


Рисунок 2.16 — Модель звена теплового нагрева теплицы

Для реализации модели инерционного звена с форсированием (снижением постоянной времени Т) можно использовать схему, приведенную на рисунке 2.17.

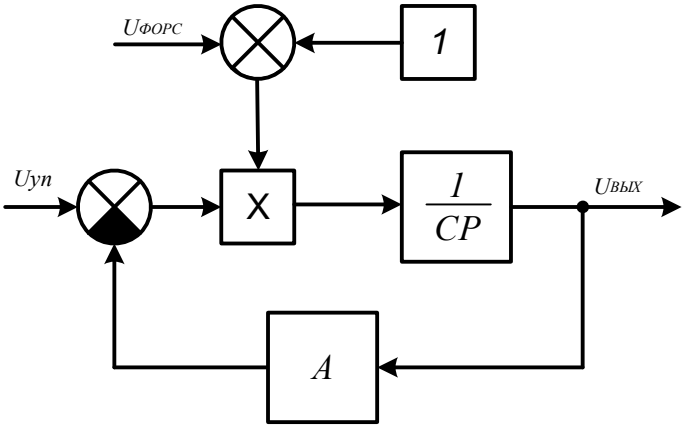


Рисунок 2.17 — Модель звена теплового нагрева теплицы с форсированием

Если $U_{форс.}$=0, то множительное звено будет иметь единичный коэффициент и передаточная функция будет соответствовать выражению (2.10). По алгоритму работы $U_{форс.}\geq 0$, поэтому в режиме форсирования множительное звено будет иметь коэффициент передачи

$$K_ф = 1 + U_{форс.}$$

В соответствии с формулой (2.10) получаем

$$W(p) = \frac{1/A}{\frac{c}{AK_ф}P + 1} \qquad (2.11)$$

При этом постоянная времени инерционного звена снижается в (1+ $U_{форс}$) раз. Кроме того, в цепи сигнала $U_{форс}$ необходимо установить нелинейное звено с характеристикой (рисунок 2.18)

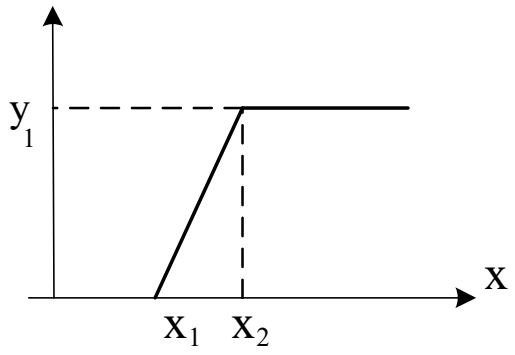


Рисунок 2.18 — Нелинейное звено в цепи форсирования

Зона нечувствительности (0 -X_1) позволяет выбрать уровень сигнала, при котором наступает режим форсирования. Величина $У_1$ определяет кратность форсирования (У= $U_{форс}$). Значение $\Delta=X_2-X_1$ позволяет формировать процесс перехода в режим форсирования.

С учетом множительного звена и действия сигнала $U_{ФОРС}$ получаем передаточную функцию перестраиваемого интегрирующего звена

$$W_{ИП}(P)=\frac{U_1(p)}{cp}=K_1U_{ФОРС}(p)/p, \qquad (2.12)$$

где $K_1=1/c$.

Рассмотрим влияние сигнала $U_{ФОРС}$ на характеристику звена. Стационарные логарифмические амплитудные характеристики будут иметь вид (рисунок 2.19) при условии $U_{ФОРС}$= const>0.

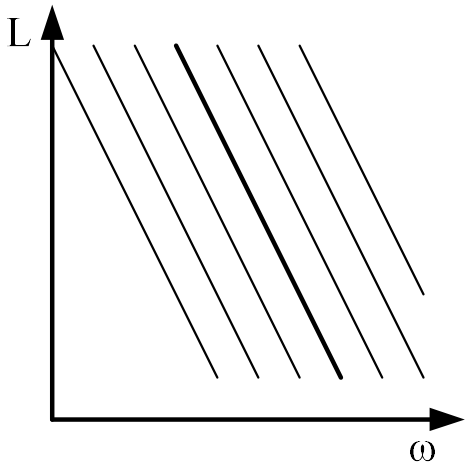


Рисунок 2.19 — ЛАХ для $W_{ИП}(p)$

В процессе эксплуатации сигнал $U_{ФОРС}$ изменяется. Предположим, что

$$U_{ФОРС}(t) = a + b\sin\omega_1 t\,. \qquad (2.13)$$

После операторного преобразования выражение (2.13) принимает вид [20, 121]

$$U_{ФОРС}(p) = a + \frac{bT_1}{T_1^2 p^2 + 1}, \qquad (2.14)$$

где $T_1 = \dfrac{1}{\omega_1}$.

С учетом этого передаточная функция перестраиваемого интегрирующего звена для нестационарного режима с учетом выражения (2.14) записывается в следующем виде

$$W(p) = \frac{K_3}{p}\left(a + \frac{bT_1}{T_1^2 p^2 + 1}\right). \qquad (2.15)$$

Для построения логарифмических характеристик звена преобразуем выражение (2.14)

$$a + \frac{bT_1}{T_1^2 p^2 + 1} = \frac{aT_1^2 p^2 + a + bT_1}{T_1^2 p^2 + 1} = (a + bT_1)\frac{T_2^2 p^2 + 1}{T_1^2 p^2 + 1}, \qquad (2.16)$$

где $T_2 = T_1\sqrt{\dfrac{a}{a + bT_1}}$.

Выражение (2.14) можно представить в виде последовательного соединения трех звеньев

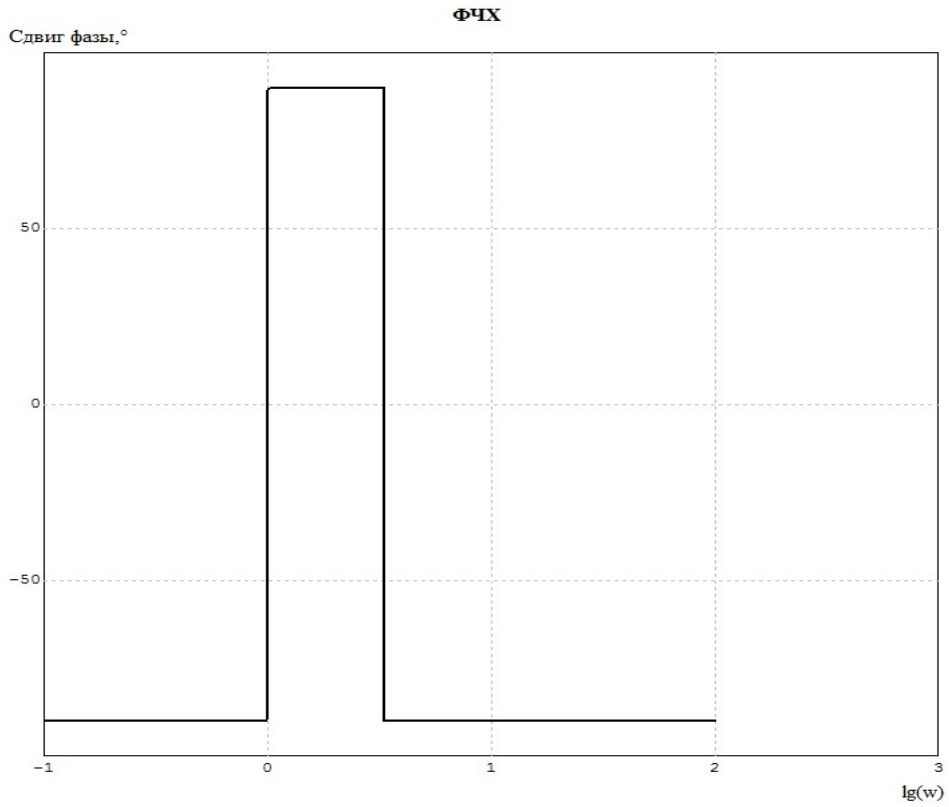
$$W_1(p) = (a + bT_1) = K$$
$$W_2(p) = T_2^2 p^2 + 1 \quad , (2.17)$$
$$W_3(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 1}$$

Для звеньев $W_2(p)$ и $W_3(p)$ можно записать частотные характеристики [121]:

$$W_2(j\omega) = (1 - T_2^2\omega^2) \cdot e^{j arctg \frac{1}{1 - T_2^2\omega^2}}, \quad (2.18)$$

$$W_3(j\omega) = \frac{1}{(1 - T_1^2\omega^2)} e^{-j arctg \frac{1}{1 - T_1^2\omega^2}}. \quad (2.19)$$

Передаточная функция $W_3(p)$ соответствует консервативному звену, а $W_2(p)$ - дифференцирующее звено второго порядка, для которых ЛАХ и ЛФХ известны. Было выполнено моделирование звена (2.15) и получены его логарифмические характеристики (рисунок 2.20).



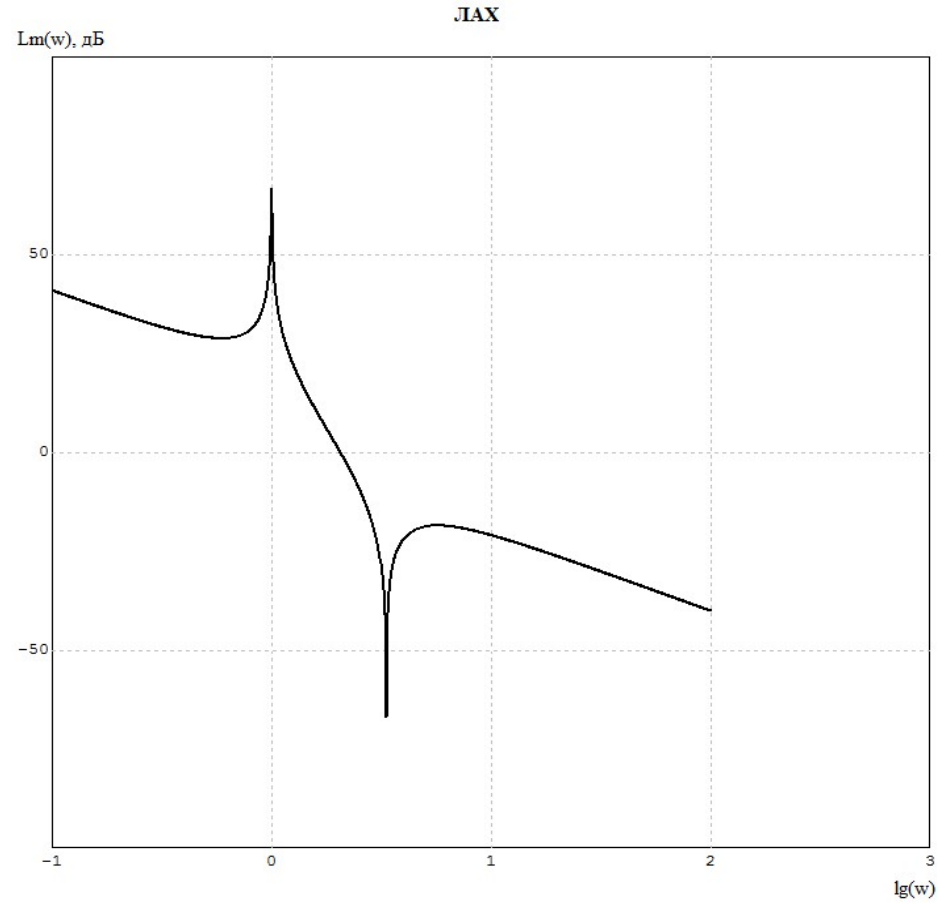


Рисунок 2.20 — ФЧХ и ЛАХ звена $W_{ИП}(p)$

Аналогичным образом рассмотрим работу интегрирующего звена с обратной

связью (рисунок 2.21). С учетом множительного звена для этой схемы были построены логарифмические характеристики.

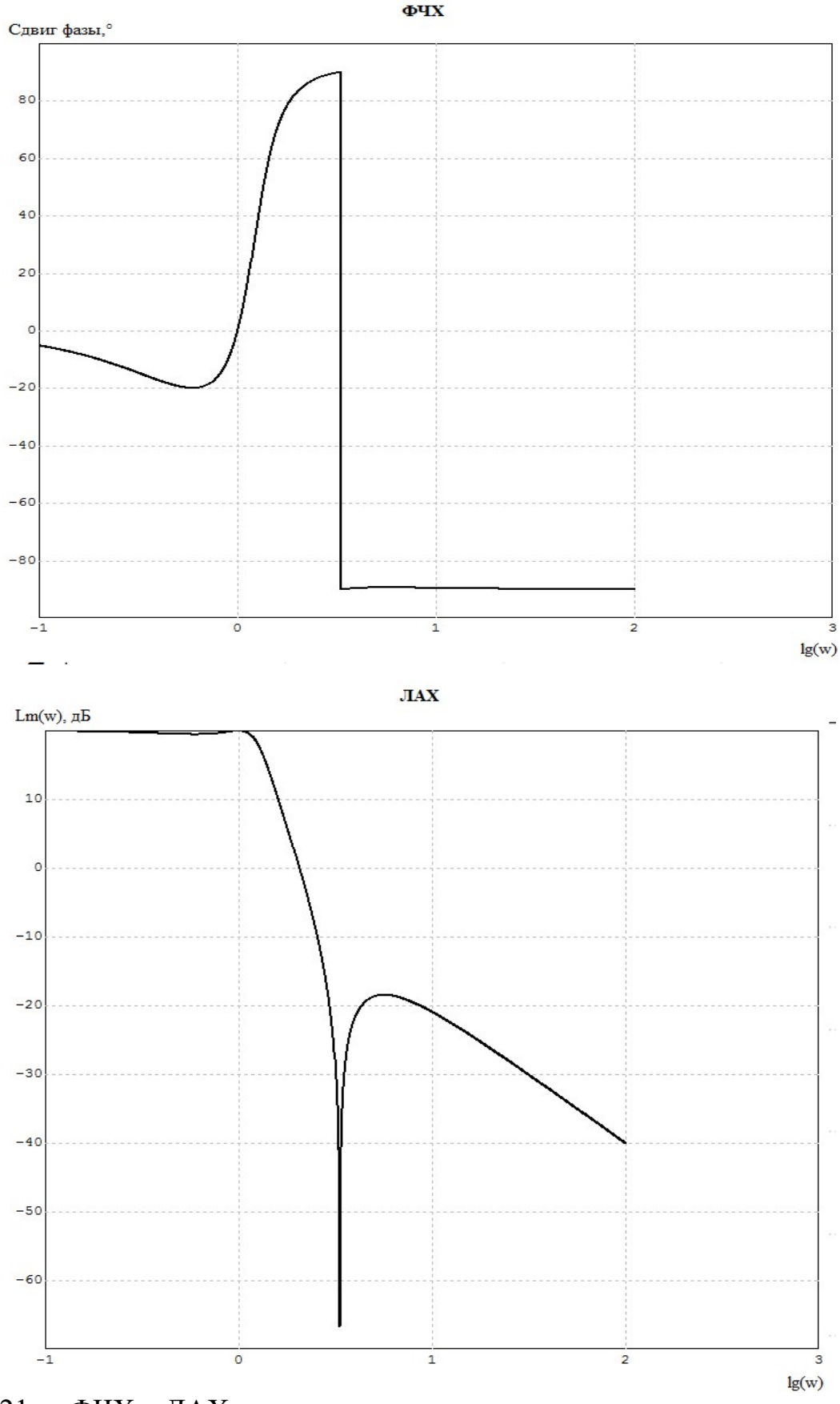


Рисунок 2.21 — ФЧХ и ЛАХ звена

Из соотношения T_1 и T_2 можно получить условие

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} < \omega_1 = \frac{1}{T_1}.$$

Поэтому в ФЧХ рассматриваемых звеньев происходит сначала смещение фазы на $+180^0(\omega_2)$, а затем возврат ее к прежнему уровню (ω_1). Такие фазовые изменения отрицательного сказываются на качественных показателях системы в частности на устойчивости [59].

Выводы по второй главе

Проведен анализ потребления энергоресурсов тепличного комбината. Выявлена сезонная цикличность с максимумом потребления в зимние месяцы. Выполнена оценка долевой составляющей затрат на энергоресурсы. Получено значительное преобладание потребления ресурса газа. Оценка эффективности энергосбережения по группам потребителей показала наибольший резерв в устранении перегрева теплиц, отработки параметров заданного микроклимата.

Применение нескольких традиционных датчиков для измерения параметров микроклимата приводит к неоднозначности результата измерений, что снижает качественные показатели системы управления и значительно увеличивает расход энергоресурсов из-за перегрева теплицы. Использование предлагаемого интегрального датчика, работа которого основана на использовании зависимости коэффициента затухания звука от температуры и влажности, позволяет устранить указанные недостатки и улучшать работу системы управления. Применение предлагаемого интегрального датчика, за счет рационального использования оборудования и энергоресурсов, является одним из возможных способов увеличения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат электротехнического комплекса.

Предложено компенсировать инерционность нагрева теплицы с помощью форсирования режимов работы электрооборудования. Определено влияние форсирования на динамические характеристики системы и ограничения, накладываемые требованиями устойчивости на цепи и сигналы форсирования.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

3.1 Анализ работы системы с форсированием нагрева

Рассмотрим схему контура управления температурой теплицы. Контур управления нагревателем содержит регулятор $W_{РН}(p)$, блок нагревателя, *РО* (апериодическое звено $W_{ОБ}(p)$) и обратную связь по температуре *РО* с коэффициентом $K_{ОН}$.

Блок нагревателя включает в себя:

- клапан (нелинейное звено – усилитель с насыщением),

- трубопроводную систему – апериодическое звено с большой постоянной времени (на схеме интегрирующее звено с обратной связью),

- регулируемый насос (множительное звено в контуре с интегрирующим звеном).

Задающий сигнал поступает с регулятора температуры теплицы $W_{Рt}(p)$. Возмущением является температура наружного воздуха, которая воздействует через звено $W_{ОХ}(p)$, рисунок 3.1.

Основным недостатком рассматриваемого контура является его большая инерционность. В [62, 97] предлагается использовать упредитель Смита, который позволяет достичь устойчивости системы без изменения быстродействия в рассматриваемом контуре. В то же время возможно форсировать переходный процесс в этом контуре за счет кратковременного увеличения частоты вращения двигателя насоса. Возрастание скорости протекания теплоносителя в этом случае даст эффект увеличения теплоемкости, что обеспечит снижение инерционности в этой структуре. Такое решение позволяет снизить динамическую ошибку и улучшить качество переходного процесса.

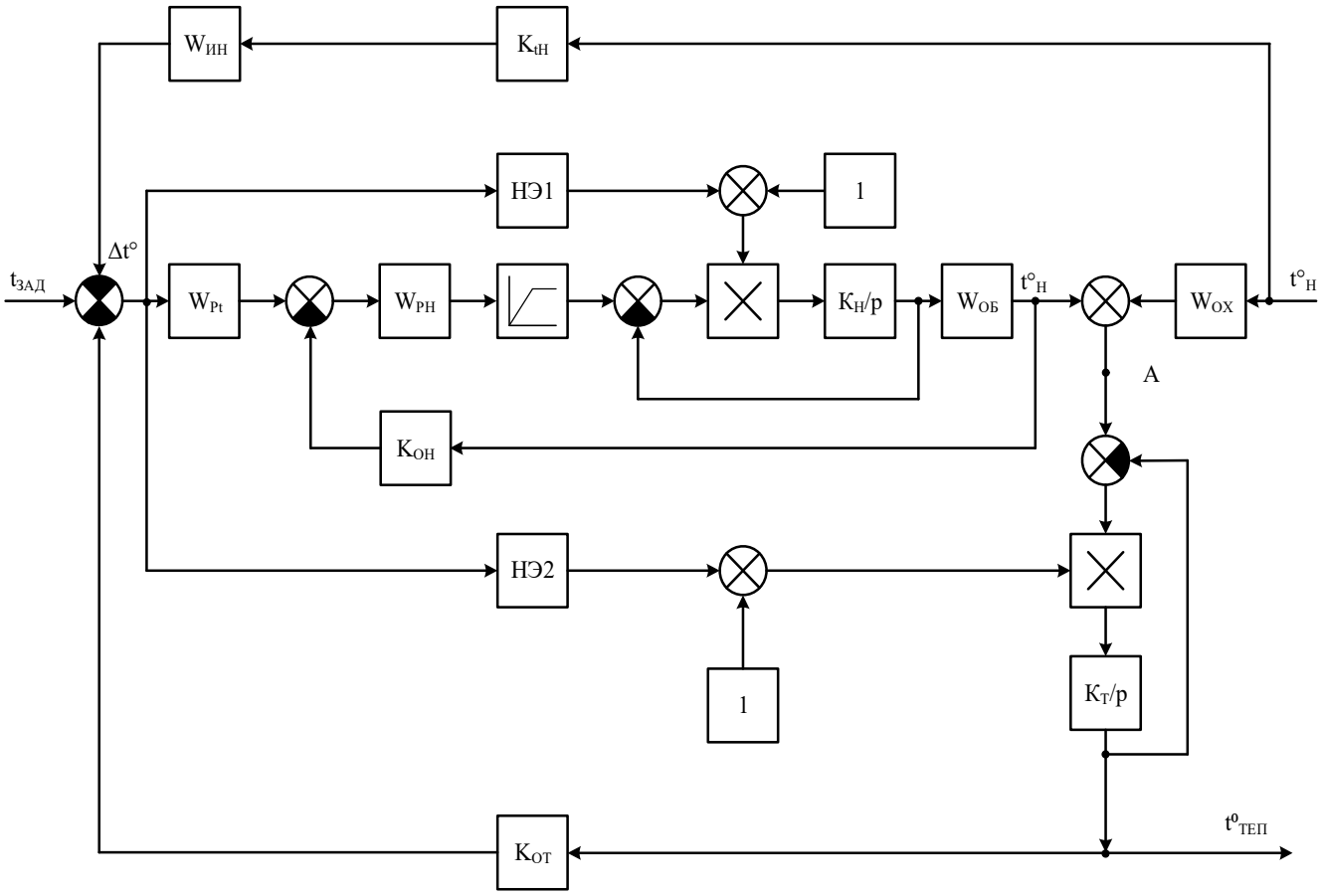


Рисунок 3.1 — Структурная схема системы управления электротехническим комплексом,

где W_{Pt} – передаточная функция регулятора температуры теплицы;

$W_{РН}$ – передаточная функция регулятора нагревателя;

$W_{Н}$ – передаточная функция нагревателя;

$W_{ОХ}$ – передаточная функция элементов охлаждения;

$K_{ОН}$ – коэффициент передачи датчика температуры обогревателя;

$K_{tН}$ – коэффициент передачи датчика температуры наружного воздуха

Следует отметить, что в установившемся режиме и небольших рассогласованиях не требуется форсирование процесса. Сигналом, управляющим цепью форсирования, может служить ошибка контура регулирования температурой теплицы $\Delta t_{Т.}$ Для настройки на технический оптимум этот сигнал поступает на нелинейное звено НЭ1, что позволяет управлять процессом форсирования.

Был проведен анализ работы контуров системы в режиме форсирования и сравнение результатов с режимом стандартной настройки. На рисунке 3.3 приведена схема моделей системы управления электротехническим комплексом при форсировании работы насоса. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.2.

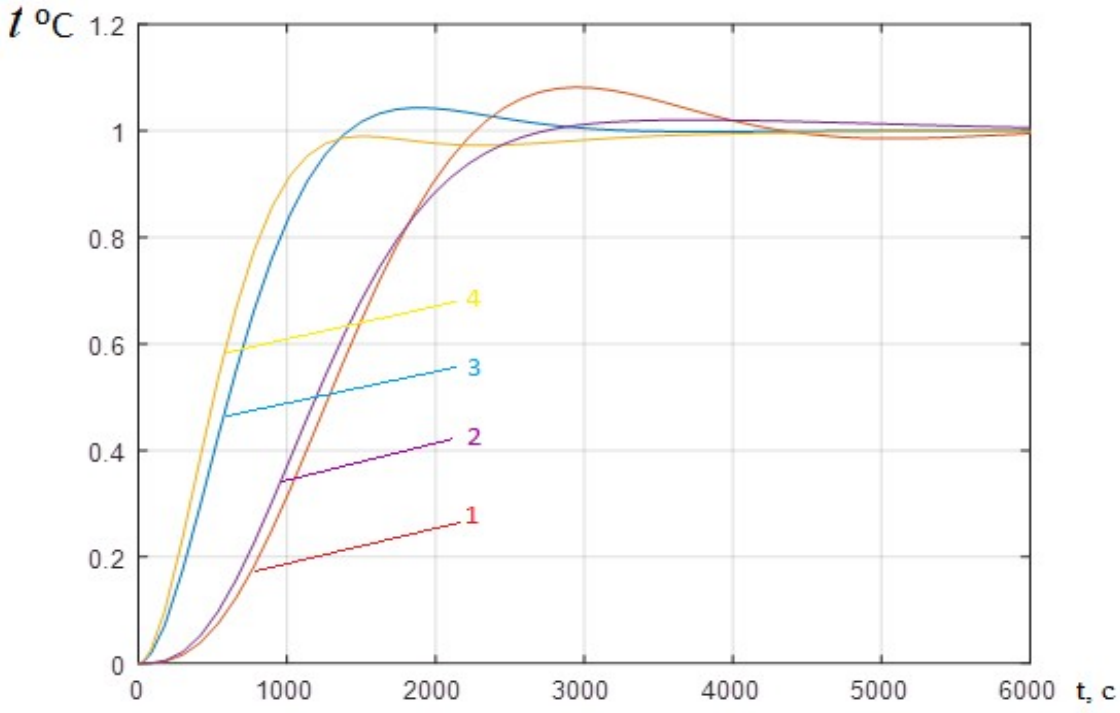


Рисунок 3.2 — Переходные процессы в системе управления температурой теплицы (форсирование насоса), где 1 – нагрев РО без форсирования, 2 – нагрев РО с форсированием, 3 – нагрев теплицы без форсирования, 4 - нагрев теплицы с форсированием

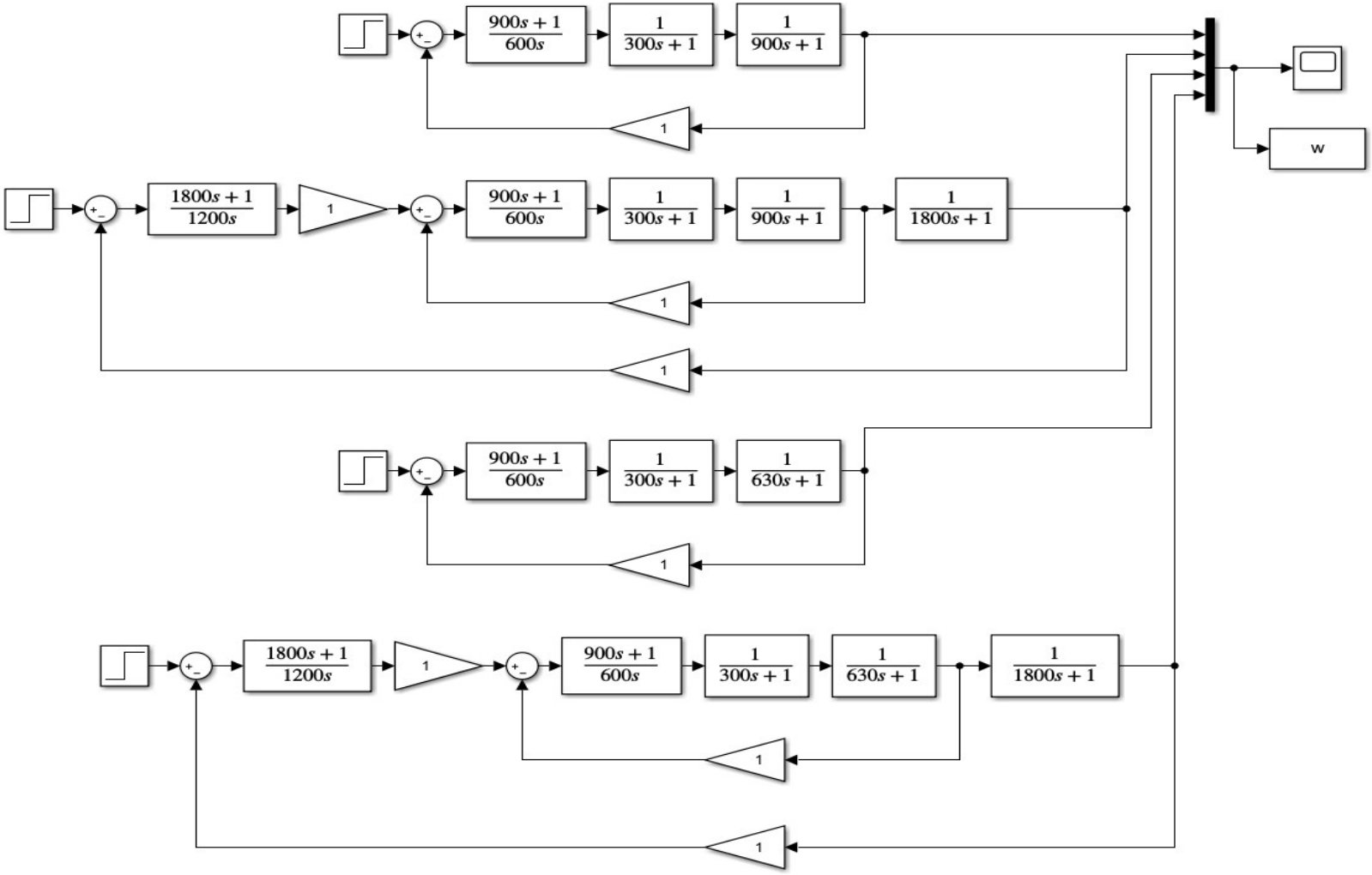


Рисунок 3.3 — Модели контуров регулирования исходной схемы и при форсировании насоса

Контур управления температурой теплицы включает в себя регулятор $W_{Pt}(p)$, скорректированный контур управления нагревателем, узел, характеризующий тепловую инерционность теплицы и обратную связь с коэффициентом K_{OT}. Как и в предыдущем контуре, используем форсирование для повышения быстродействия системы. Для этого необходимо увеличить частоту вращения вентилятора обдува *РО*. Это позволит увеличить теплоотдачу и ускорит нагревание теплицы. Управление цепью форсирования целесообразно выполнять, как и в предыдущем случае. Возможно согласовать по времени режимы работы в первом и втором контурах регулирования в процессе форсирования.

На рисунке 3.5 приведена схема моделей при форсировании в двух контурах управления. На рисунке 3.4 приведены результаты моделирования этих схем.

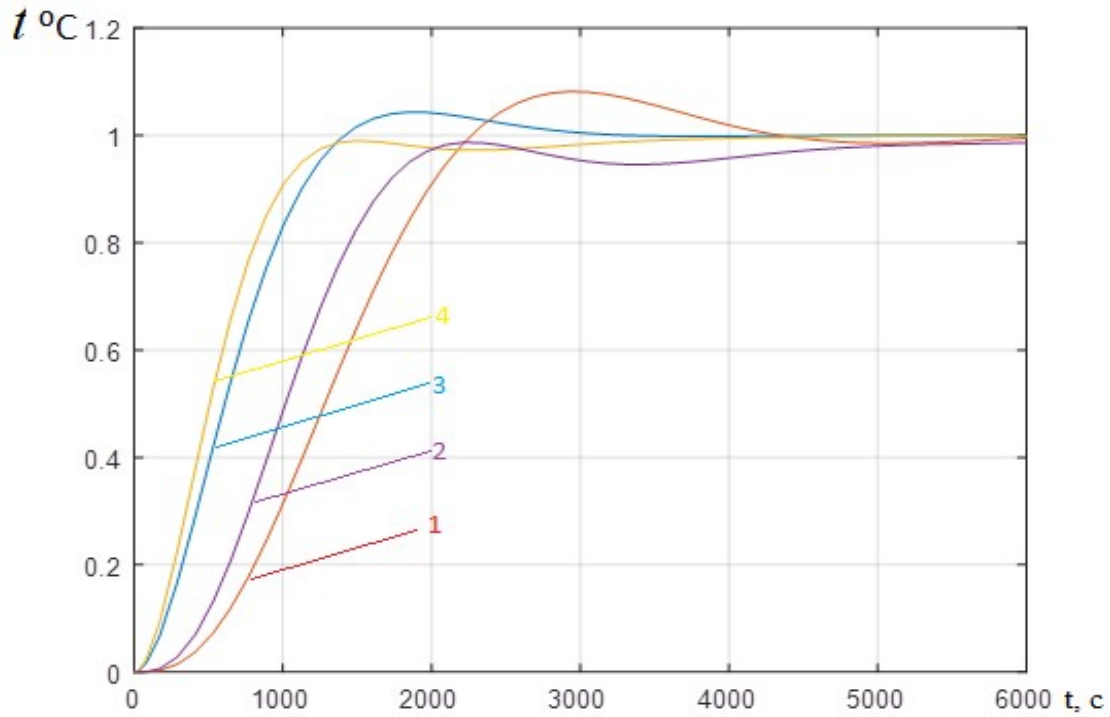


Рисунок 3.4 — Переходные процессы в системе управления температурой теплицы (форсирование насоса и вентилятора), где 1 – нагрев теплицы без форсирования, 2 –нагрев РО с форсированием насоса и вентилятора, 3 – нагрев теплицы при форсировании насоса и вентилятора, 4 – нагрев РО без форсирования

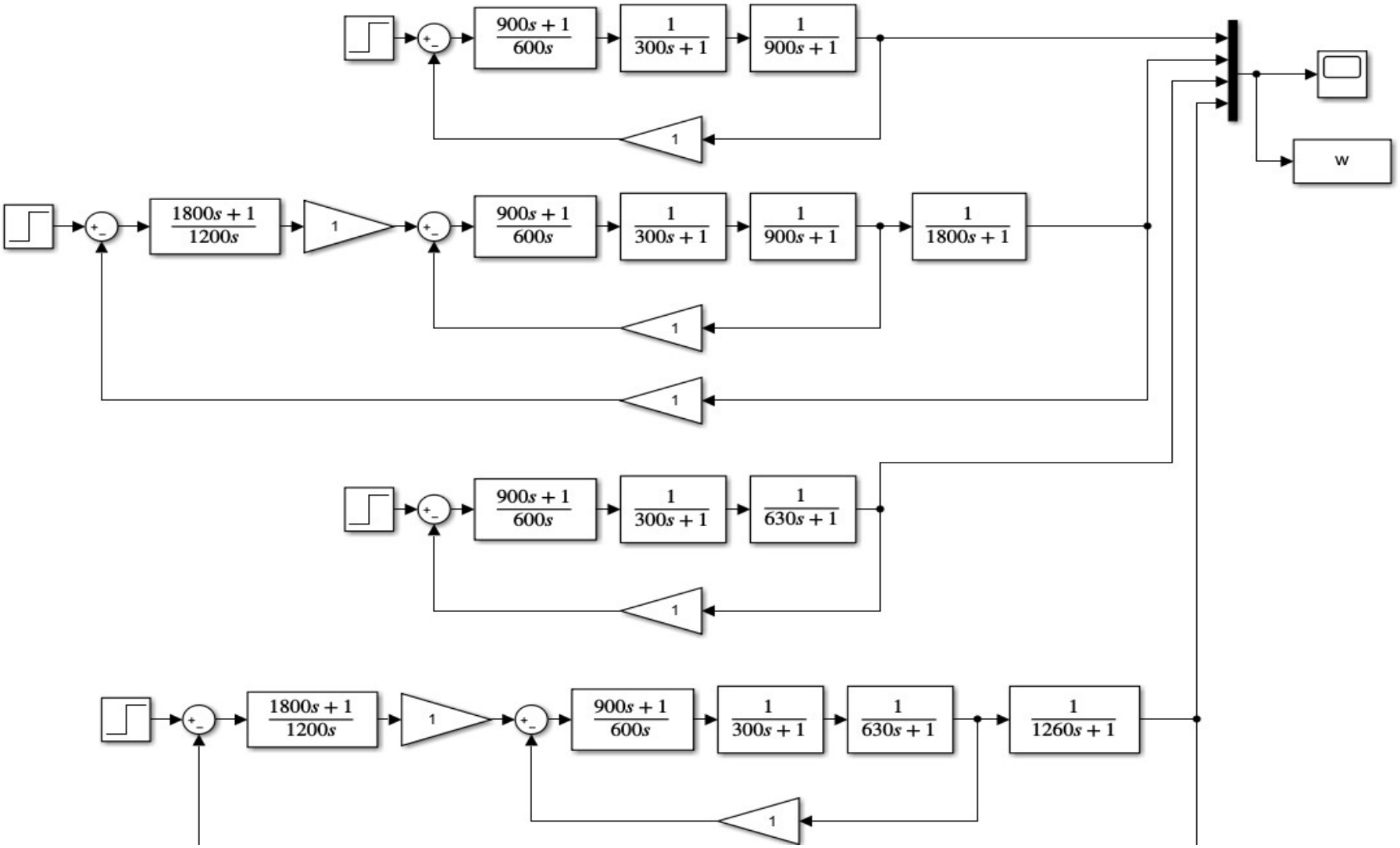


Рисунок 3.5 — Модели контуров регулирования исходной схемы и при форсировании насоса и вентилятора

Расчет регуляторов контуров управления производится с учетом следующих допущений:

- передаточные функции теплопередающих звеньев имеют большие постоянные времени;

- с учетом этого на структурной схеме электроприводы насоса и вентилятора представляются безынерционными (коэффициентами);

- в переходном процессе управление ведется в форсированном режиме, поэтому регуляторы координат определяются с учетом этого;

- принимаем, что реализуется форсирование скоростей насоса и вентилятора в 1,3 раза.

Передаточную функцию контура нагревателя в этом случае можно представить в виде

$$W_{KH}(p) \approx \frac{1/K_{OH}}{T_{KH}p+1}\ , \qquad (3.1)$$

где $T_{KH} = 2T_H$.

Контур регулирования температурой теплицы рассчитывается аналогично на технический оптимум, что обеспечивает устойчивость и низкую чувствительность к параметрическим возмущениям.

Для компенсации возмущения (изменения температуры наружного воздуха) можно создать инвариантную цепь из условия

$$W_A(p) = \frac{A(p)}{t_H(p)} = 0\ , \qquad (3.2)$$

где $W_A(p)$ - передаточная функция по температуре наружного воздуха ($t_H(p)$) до точки А.

В соответствии со структурной схемой (рис. 3.1) и формулами (3.1, 3.2) передаточная функция звена ИЦ описывается выражением

$$W_{ИН}(p) = \frac{W_{OX}(p)}{K_{tH}W_{Pt}(p)W_{KH}(p)}\ . \qquad (3.3)$$

Весьма часто передаточная функция ИЦ имеет порядок числителя выше порядка знаменателя, что делает их физически не реализуемыми. Однако, с учетом

существенных инерционностей звеньев, можно использовать апериодические звенья с малыми постоянными времени для обеспечения реализуемости ИЦ. Как показывают расчеты, это позволяет практически полностью компенсировать возмущения.

В результате проведенных исследований работы электротехнического комплекса можно сделать следующие выводы:

- качественные показатели рассматриваемой системы во многом определяются параметрами цепи форсирования;

- присутствие случайной составляющей в сигнале форсирования ухудшает работу системы;

- динамические характеристики системы и цепи форсирования должны быть существенно разнесены (обеспечение стационарного режима работы);

- если динамические характеристики системы и цепи форсирования сопоставимы (нестационарный режим работы), то начинают проявляться свойства множительного звена и сигнала форсирования $U_{ФОРС}$, которые отрицательно сказываются на устойчивости.

-применение регулируемого электропривода в управлении насоса и вентилятора позволяют существенно сократить время переходных процессов в электротехническом комплексе регулирования температуры теплицы;

- использование интегрального контроля температуры позволяет исключить неоднозначность в измерениях и получить повышение эффективности электротехнического комплекса;

- возможность применения ИЦ для компенсации колебаний температуры наружного воздуха;

- предлагаемые решения позволяют повысить энергосбережение в тепличном комплексе.

3.2 Синтез системы регулирования температуры

Современная зимняя теплица как объект автоматического управления температурно-влажностным режимом характеризуется крайне неудовлетворительной динамикой и нестабильностью параметров, вытекающими из особенностей технологии производства [77-81]. В основу работы систем управления микроклиматом теплицы положен принцип пропорционально интегрального регулятора, при котором система управления стремится достичь установившегося состояния при помощи воздействия на управляющие элементы и измерения динамических величин с учётом компенсации накопленных интегральных погрешностей. В то же время агротехнические нормы устанавливают высокую точность стабилизации температуры ±1°С, своевременное её изменение в зависимости от уровня фотосинтетически активной облученности, фазы развития растений и времени суток. Сформированная технологическая стратегия предъявляет высокие требования к функционированию и техническому совершенствованию оборудования автоматизации управления техническими параметрами в теплицах.

Электротехнический комплекс представляет систему, состоящую из устройств управления, преобразования, передачи и функционально предназначенную для реализации технологического процесса. Система автоматического регулирования (САР) электротехнического комплекса теплицы выполнена для отработки заданных параметров (температура, влажность, освещенность, вентилирование, положение фрамуг, подача питательного раствора и т.д.). Устройства управления оборудованием являются достаточно сложными, поскольку работа происходит при изменении параметров объекта управления [22, 23, 107, 127]. Поэтому, при синтезе основное внимание обращено к возможности регулирования режимов работы, построению системы управления с низкой чувствительностью к изменениям параметров и возмущений [19].

Структурная схема системы регулирования температуры теплицы (СРТТ) содержит звенья с большими постоянными времени. Наиболее инерционная часть характеризуется теплоемкостью и теплопроводностью внутреннего объема

теплицы. Эти параметры изменяются в зависимости от величины растительной массы выращиваемой культуры. Таким образом, наиболее инерционное звено имеет переменные параметры. Высокие требования, предъявляемые к СРТТ, можно обеспечить за счет применения упреждающей коррекции (УК) и использования инвариантных цепей (ИЦ) [20, 54].

На рисунке 3.6 приведена структурная схема системы управления теплицей.

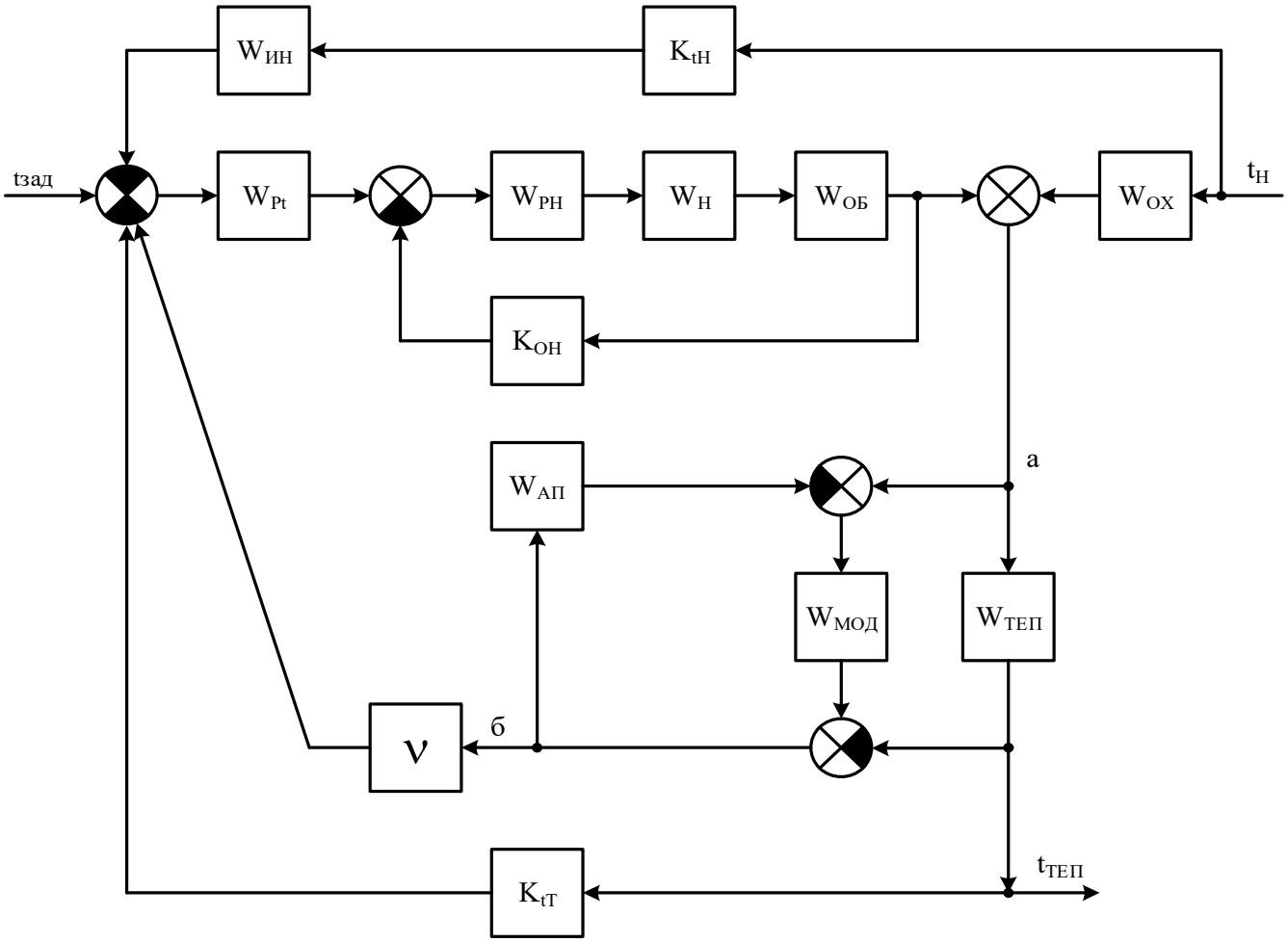


Рисунок 3.6 — Структурная схема системы,

где W_{Pt} – передаточная функция регулятора температуры теплицы;

$W_{РН}$ – передаточная функция регулятора нагревателя;

$W_{Н}$ – передаточная функция нагревателя;

$W_{ОБ}$ – передаточная функция обогревателя;

$W_{ОХ}$ – передаточная функция элементов охлаждения;

$W_{МОД}$ – передаточная функция модели теплицы;

$W_{ТЕП}$ – передаточная функция теплицы;

$W_{АП}$ – передаточная функция звена автоподстройки;

$K_{ОН}$ – коэффициент передачи датчика температуры обогревателя;

$K_{tТ}$ – коэффициент передачи датчика температуры теплицы;

$K_{tН}$ – коэффициент передачи датчика температуры наружного воздуха;

v – коэффициент дифференциального сигнала

Для контроля параметров СРТТ используются датчики температуры наружного воздуха, нагревателя и теплицы. Регуляторы координат позволяют формировать требуемую выходную характеристику.

Принцип действия системы автоматического регулирования заключается в отслеживании отклонения регулируемых величин, задающих работу теплицы или протекание процесса от исходного номинального режима и при этом воздействовать на объект или процесс так, чтобы устранять эти отклонения [152].

Для осуществления автоматического регулирования к объекту подключается регулятор, вырабатывающий управляющее воздействие на регулирующий орган. Это воздействие вырабатывается регулятором в зависимости от разности между текущим значением регулируемой величины (температуры, давления, уровня жидкости и т. д.), измеряемой датчиком, и желаемым её значением, устанавливаемым задатчиком. Регулируемый объект и автоматический регулятор вместе образуют систему автоматического регулирования. Основным признаком САР, является наличие главной обратной связи, по которой регулятор контролирует значение регулируемого параметра.

В схеме введена обратная связь по температуре обогревателя. Проведем расчет регулятора контура нагрева системы $W_{РН}(p)$.

Синтез регулятора выполняется исходя из настройки контура на технический оптимум [62]:

$$W_{РН}(p)W_{Н}(p)W_{ОБ}(p)K_{ОН} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}. \qquad (3.4)$$

Примем за малую (некомпенсируемую) постоянную времени $T_{\mu} = T_H$. Тогда передаточная функция регулятора, доставляющая технический оптимум контуру регулирования температуры нагревателя, будет иметь вид:

$$W_{PH}(p) = \frac{T_{ОБ} p + 1}{2k_{OH} T_H p}$$

Это пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, компенсирующий наибольшую инерционность контура.

Передаточную функцию контура нагревателя в этом случае можно представить в виде

$$W_{KH}(p) \approx \frac{1/K_{OH}}{T_{KH} p + 1}, \qquad (3.5)$$

где $T_{KH} = 2T_H$.

Контур регулирования температуры теплицы также настраиваем на технический оптимум. Для этого необходимо выполнить равенство

$$W_{PtT}(p) W_{KH}(p) k_{tT} = \frac{1}{2T_{\mu} p\left(T_{\mu} p + 1\right)}.$$

Принимая за малую постоянную времени $T_{\mu} = 2T_H$, найдем требуемую передаточную функцию регулятора температуры теплицы

$$W_{PtT}(p) = \frac{T_T p + 1}{\frac{4k_{tT} T_H}{k_{OH}} p}.$$

Следовательно, для обеспечения технического оптимума также необходим ПИ-регулятор, коэффициент передачи которого равен

$$k_{PtT} = \frac{k_{OH} T_T}{4k_{tT} T_H},$$

а постоянная времени интегрирования

$$T_{PtT} = \frac{4k_{tT} T_H}{k_{OH}}.$$

Для получения требуемой характеристики объекта введем обратную связь по температуре теплицы и настроим контур на технический оптимум. Передаточная функция замкнутого контура объекта регулирования $W_{KT}(p)$ принимает вид

$$W_{KT}(p) \approx \frac{1/K_{tT}}{2\alpha T_T^2 p^2 + 2\alpha T_T p + 1}, \qquad (3.6)$$

где $\alpha = K_T / K_{Tpac}$.

Выражение для показателя колебательности известно [62]

$$M = \frac{A(\omega_P)}{A(\omega = 0)}, \qquad (3.7)$$

где $A(\omega_P)$ – значение амплитудной характеристики системы на резонансной частоте.

Проведем анализ выражения (3.7) по чувствительности показателя колебательности M_A .Для системы регулирования с настройкой на технический оптимум передаточная функция имеет вид (3.5). Приведем ее к нормированной форме записи.

$$W_{ЗП}(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \qquad (3.8)$$

где $K = 1/K_{tT}$; $T = T_T\sqrt{2\alpha}$; $\xi = \sqrt{\frac{\alpha}{2}}$.

Амплитудная характеристика для рассматриваемой системы известна, как

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(2T\xi\omega)^2 + (1 - T^2\omega^2)^2}} . \qquad (3.9)$$

При $\omega = \omega_P$ эта характеристика принимает экстремальное значение

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial(\omega)} = 0 . \quad (3.10)$$

Нахождение условий экстремума функции $A(\omega)$ дает результат

$$\omega_P = \sqrt{\frac{1 - 2\xi^2}{T^2}} . \qquad (3.11)$$

Подставим (3.8) в (3.6) и определим значение $A(\omega_P)$

$$A(\omega_P) = \frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \ . \qquad (3.12)$$

Используя выражение (3.7), можно определить показатель колебательности для рассматриваемой системы

$$M = \frac{1}{\sqrt{2\alpha - \alpha^2}} \ . \qquad (3.13)$$

Оценим влияние изменения α на значение показателя колебательности

$$\frac{\partial M}{\partial \alpha} = -\frac{1-\alpha}{(2\alpha - \alpha^2)^{3/2}} \ . \qquad (3.14)$$

Из выражения (3.13) видно, что значение колебательности M изменяется в широких пределах в зависимости от α . Для устранения этого недостатка используем упреждающую коррекцию. Формирование корректирующего сигнала показано на рис. 3.1. Сигнал с датчика температуры теплицы поступает на звено модели $W_{МОД}(p)$, параметры которого выбираются из условия

$$W_{МОД}(p) = W_{ТЕП}(p)_{НОМ} \ , \qquad (3.15)$$

где $W_{ТЕП}(p)_{НОМ}$ – передаточная функция объекта в номинальном режиме.

Для рассматриваемого случая

$$W_{МОД}(p) = \frac{K_{ТЕП}}{pT_{ТЕП} + 1} \ . \qquad (3.16)$$

Сигнал с выхода звена модели сравнивается с сигналом обратной связи, в результате чего формируется дифференциальный сигнал, который с коэффициентом ν поступает на регулятор температуры теплицы. Упрощенная передаточная функция замкнутого контура температуры теплицы с упреждающей коррекцией $W_{КТУ}(p)$ имеет вид [26]:

$$W_{КТУ}(p) \approx \frac{1/K_{ТЕП}X}{2T_T^2\frac{\alpha}{X}p^2 + 2T_T\frac{\alpha}{X}p + 1} \ , \qquad (3.17)$$

где $X = 1 + \nu(\alpha - 1)$.

Для рассматриваемого случая показатель колебательности определяется выражением

$$M = \frac{1 + \nu(\alpha - 1)}{\sqrt{2\alpha\left[1 + \nu(\alpha - 1)\right] - \alpha^2}} . \quad (3.18)$$

Анализ формулы (3.18) позволяет сделать следующие выводы:

– если $\nu = 1$, то M=const=1 независимо от значения α ;

– если $\nu = 0$, то значение M соответствует системе без упреждающей коррекции;

– если $\alpha = 1$, то M=const=1 независимо от значения ν .

Таким образом, введение упреждающей коррекции позволяет создать систему, инвариантную к изменениям параметров теплицы в широких пределах. Для системы с упреждающей коррекцией (3.17) проведем анализ чувствительности M к вариациям α и ν. Влияние α и ν на значение M позволяет оценить график (рисунок 3.7), построенный по выражению (3.18) [108].

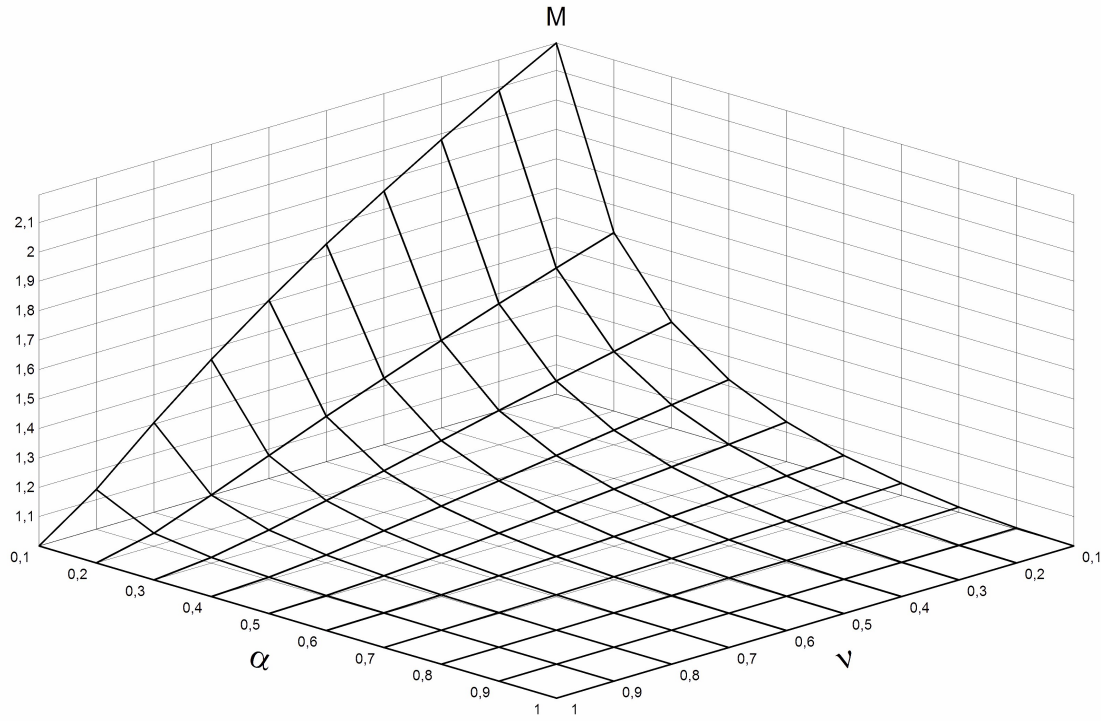


Рисунок 3.7. — График зависимости $M = f_1(\alpha, \nu)$

На рисунке 3.8 представлен график изменения коэффициента K в зависимости от параметров α и ν .

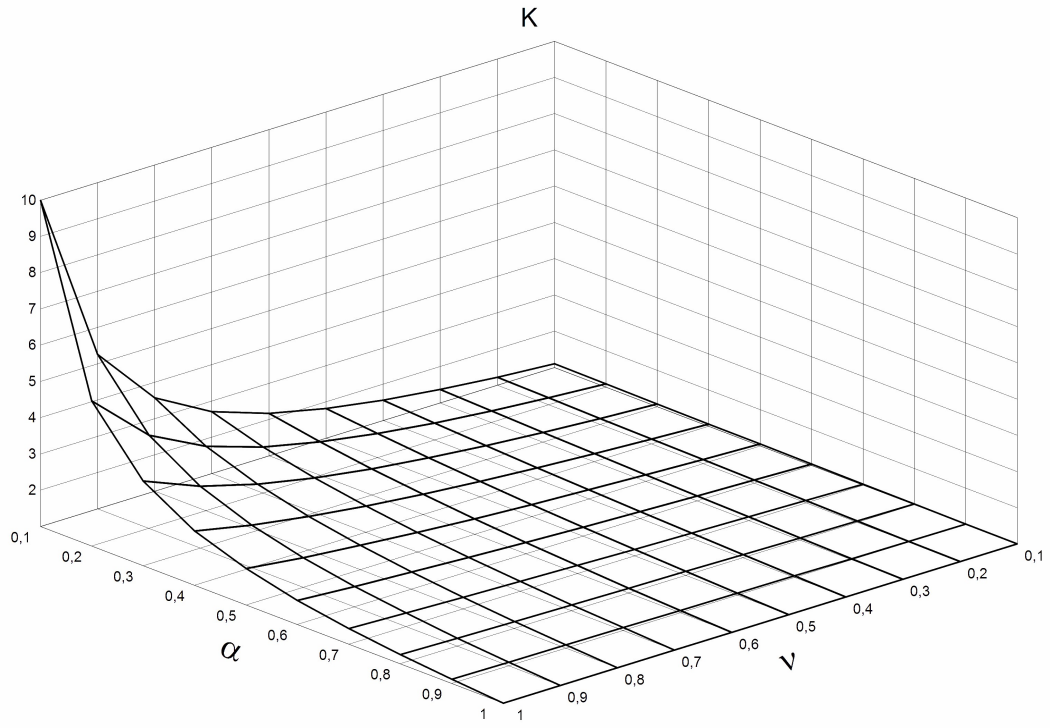


Рисунок 3.8. — График зависимости $K = f_2(\alpha, \nu)$

Из графиков видно, что:

– снижение α приводит к существенному увеличению K ;

– снижение ν позволяет сделать K близким к 1.

Из выражения (3.18) видно, что компенсирующая цепь позволяет восстановить исходный коэффициент системы.

Сравнение рисунков 3.7 и 3.8 позволяет выполнить выбор ν (значение α зависит от режима работы и является параметрическим возмущением):

– следует снизить значение ν , при этом возрастает максимальное значение колебательности, а максимальное увеличение коэффициента снижается;

– ограничить, по возможности, диапазон изменения α.

Из таблицы 3.1 можно выбрать подходящее значение ν.

Таблица 3.1 — Данные коэффициентов

ν	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
M_{MAX}	1	1,14	1,3	1,46	1,6	1,73	1,86
K_{MAX}	10	5,3	3,6	2,7	2,2	1,8	1,6

В качестве допустимого значения M выбираем $M \approx 1-1{,}14$, при этом $K_{MAX} \approx 5{,}3-10$ и настройка упреждающей коррекции $\nu \approx 0{,}9-1$.

В случае использования упреждающей коррекции, происходит изменение контурного коэффициента передачи, что отрицательно сказывается на характеристиках системы.

$$K = \frac{K_{\Sigma}}{1 + K_{\Sigma}\left[1 + \nu K_{ТЕП}(\alpha - 1)\right]} . \qquad (3.19)$$

Поэтому необходимо скомпенсировать снижение этого коэффициента. Для этого включается цепь автоподстройки. При этом передаточная функция звена коррекции принимает вид

$$W_{аб}(p) = \frac{\alpha K_{ТЕП} - W_{ТЕП}(p)}{1 + \alpha K_{ТЕП} W_{АП}(p)} = \frac{K_{ТЕП}\, p\left[\alpha T_{ТЕП}\, p + (\alpha - 1)\right]}{(T_{ТЕП}\, p + 1)(p + \alpha K_{ТЕП} K_{АП})} , \quad (3.20)$$

где $W_{АП}(p) = \dfrac{K_{АП}}{p}$.

Видно, что включение звена автоподстройки сохраняет статический коэффициент передачи СРТТ без изменений.

На рисунках 3.9, 3.10, 3.11 представлены переходные процессы в исследуемой системе при вариации коэффициента $K_{ТЕП} \pm 10\%$.

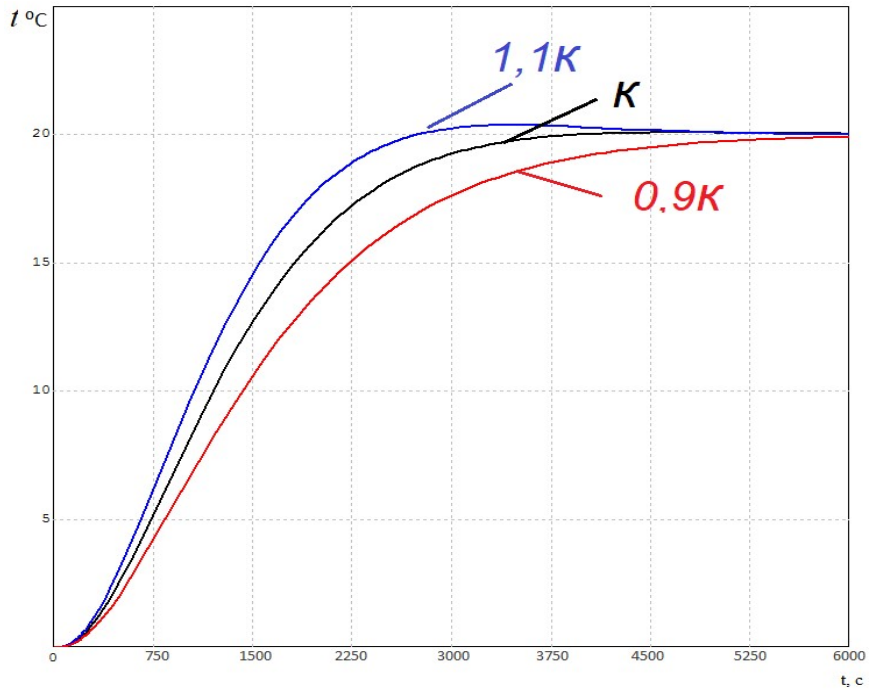


Рисунок 3.9 — Переходные процессы в системе без упреждающей коррекции

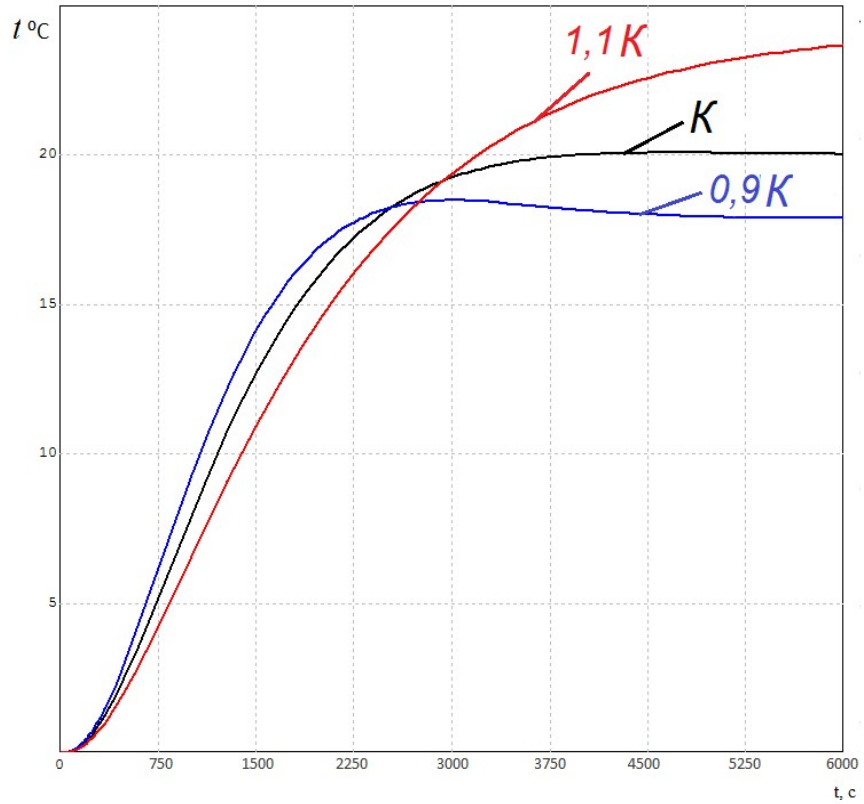


Рисунок 3.10 — Переходные процессы в системе с упреждающей коррекцией без автоподстройки

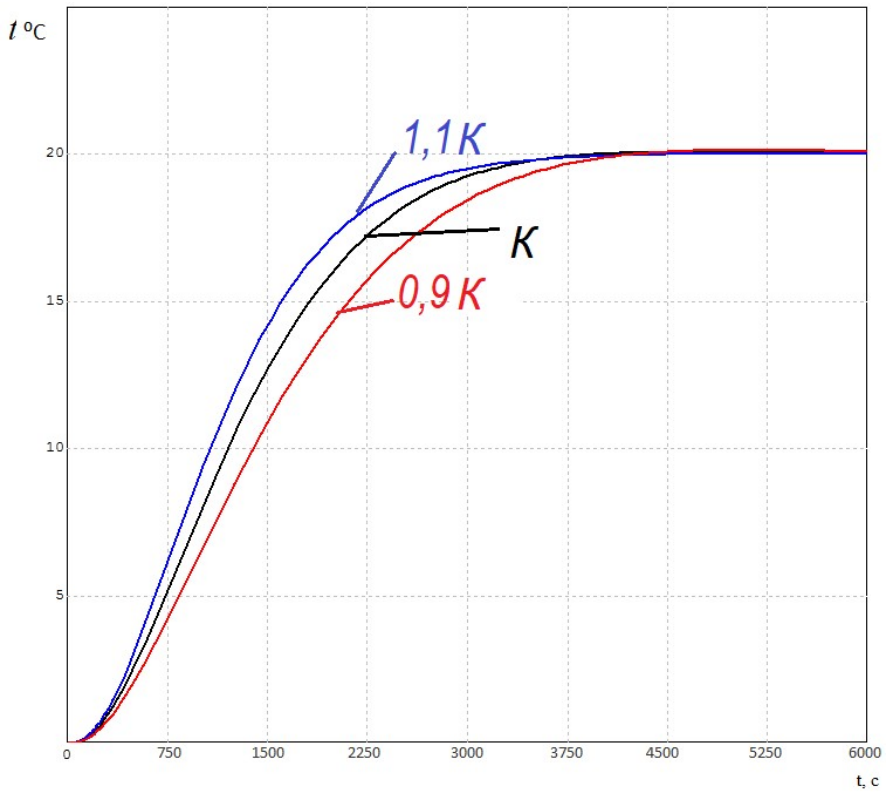


Рисунок 3.11 — Переходные процессы в системе с упреждающей коррекцией с автоподстройкой

Проведенный синтез системы регулирования температуры показывает:

- СРТТ является системой с переменными параметрами;

- эффективность применения упреждающей коррекции для стабилизации параметров работы СРТТ;

- необходимость использования автоподстройки для сохранения контурного коэффициента;

- возможность применения ИЦ для компенсации колебаний температуры наружного воздуха.

3.3 Анализ работы системы стабилизации температуры теплицы при действии случайных сигналов

В реальных электротехнических системах кроме детерминированных сигналов всегда присутствуют сигналы, имеющие случайный характер. Одним из критериев качества в этом случае можно считать уровень дисперсии выходного сигнала при действии на систему случайного процесса [116, 134, 145]. В рассматриваемом электротехническом комплексе случайным сигналом является возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Сравним две рассматриваемые системы: структура с подчиненным регулированием и система с упреждающей коррекцией. Будем считать, что возмущение – случайный сигнал типа «белый шум», то есть

$$S(\omega) = N = const \ , \quad (3.21)$$

где $S(\omega)$ - спектральная плотность.

Дисперсия выходного сигнала D_X определяется по формуле (3.22):

$$D_X = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} |W_{ЗАМК}(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega \ . \quad (3.22)$$

Обозначим передаточные функции по возмущению замкнутых систем структуры подчиненного регулирования $W_{ЗВП}(p)$ и систему с упреждающей коррекцией $W_{ЗВУ}(p)$. На основе структурной схемы (рис. 3.1) можно получить

$$W_{ЗВП}(p) = \frac{\alpha K_T 4T_H p(2T_H p + 1)}{(\beta T_T p + 1)4T_H p(2T_H p + 1) + (T_T p + 1)\alpha} \ , \quad (3.23)$$

$$W_{ЗВУ}(p) = \frac{\alpha K_T 4T_H p(2T_H p+1)}{(\beta T_T p+1)4T_H p(2T_H p+1)+(T_T p+1)\alpha+\frac{\nu}{K_t}\left[(\beta-\alpha)T_T p+(1-\alpha)\right]}, \quad (3.24)$$

где $\alpha = \frac{K_{Треал}}{K_{Трас}}$, $\beta = \frac{T_{Треал}}{T_{Трас}}$.

В том случае, если соблюдается условие (3.23), выражение (3.24) можно записать в виде

$$D_X = \frac{N}{p} I_X \ ,$$

где I_X - табличное значение интеграла [20].

На основании этого будем рассматривать значения I_X, так как только они определяют величину D_X.

$$I_{ЗВП} = \frac{T_H \alpha^2 \left[4T_H + \alpha T_T + 2\beta T_T\right]}{16\beta T_T\left[(\beta T_T + 2T_H)(4T_H + \alpha T_T) - 2\alpha\beta T_T T_H\right]}, \quad (3.25)$$

$$I_{ЗВУ} = \frac{T_H \alpha^2 \left[4T_H + \alpha T_T + 2\beta T_T + \frac{\nu T_T}{K_t}(\beta-\alpha)\right]}{16\beta T_T\left[(\beta T_T + 2T_H)(4T_H + \alpha T_T + \frac{\nu T_T}{K_t}(\beta-\alpha)) - 2\alpha\beta T_T T_H(\alpha + \frac{\nu}{K_t}(1-\alpha))\right]}. \quad (3.26)$$

На основании выражений (3.22, 3.23) построены 3Д графики $I = f(\alpha,\beta)$, приведенные на рисунках 3.12, 3.13.

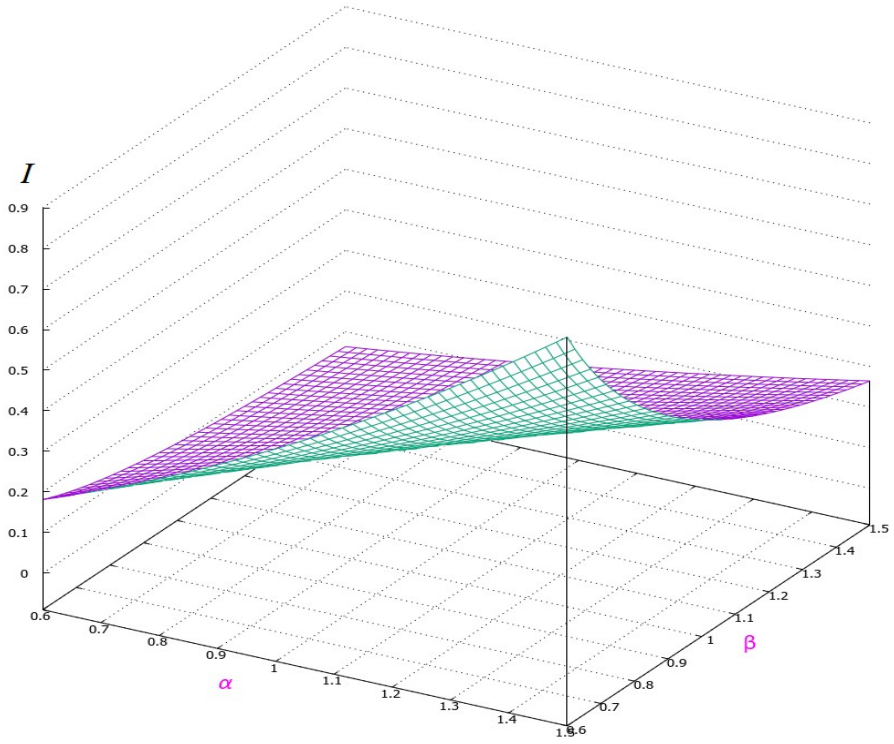


Рисунок 3.12 График функции $I_{ЗВП} = f(\alpha, \beta)$

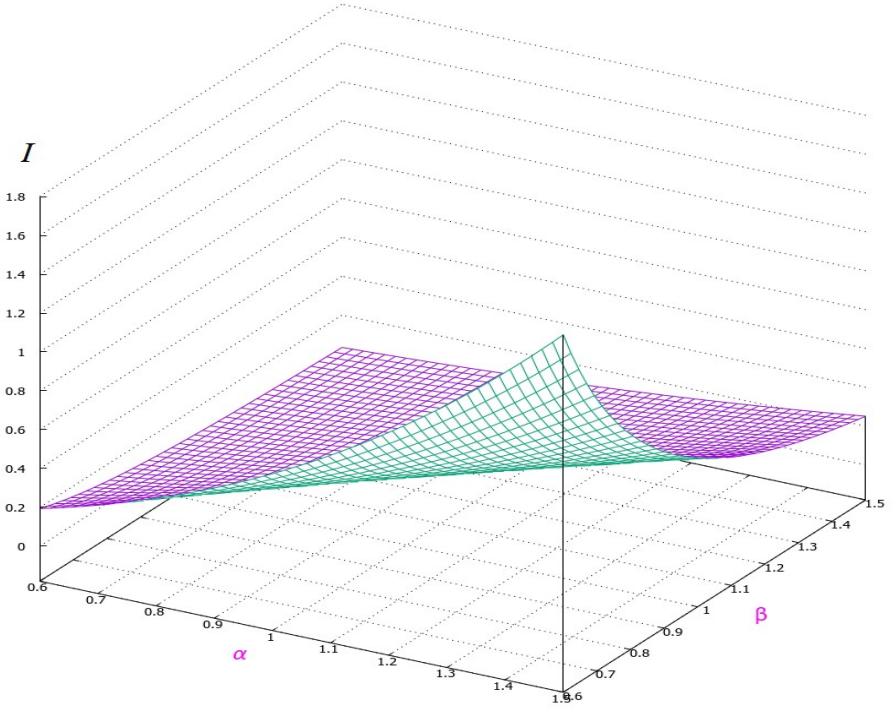


Рисунок 3.13 График функции $I_{ЗВУ} = f(\alpha, \beta)$ при условии $\nu = 1$

Сравнение двух графиков рисунков 3.12, 3.13 показывает, что:

- снижение α уменьшает значение I в рассматриваемых системах;
- снижение β увеличивает значение I в рассматриваемых системах;
- при условии $\alpha = \beta = 1$ значения $I_{ЗВП}$ и $I_{ЗВУ}$ равны друг другу.

Рассмотрим влияние коэффициента ν в $I_{ЗВУ}$. Для этого случая принимаем $\beta = 1$ и строим график $I_{ЗВУ} = f(\alpha, \nu)$ (рисунок 3.14).

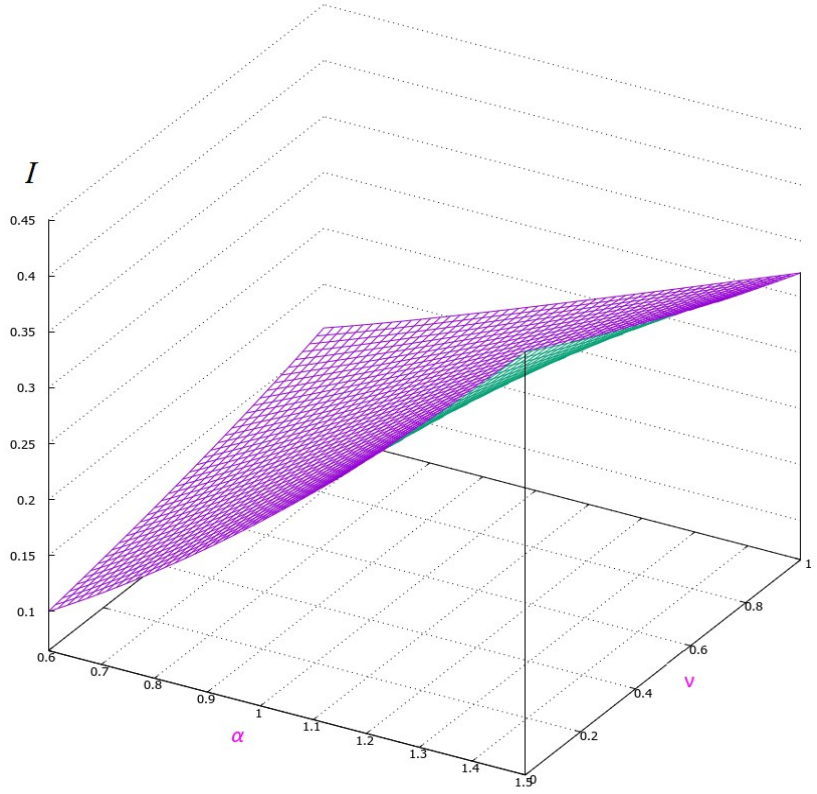


Рисунок 3.14 — График функции $I_{ЗВУ} = f(\alpha, \nu)$ при условии $\beta = 1$

Сравнение графиков на рисунках 3.13 и 3.14 позволят сделать выводы, что:

- независимо от значения ν снижение коэффициента α уменьшает значение I;
- при значениях коэффициента $\alpha < 1$ увеличение коэффициента ν приводит к росту I;
- при значениях коэффициента $\alpha > 1$ увеличение коэффициента ν приводит к снижению I;
- при условии $\alpha = 1$ изменение коэффициента ν не влияет на I.

Рассмотрим влияние случайного возмущения на систему с упреждающей коррекцией и компенсирующей схемой (рисунок 3.6). В результате работы цепи компенсации $K_{Трас} = K_{Треал}$, таким образом обеспечивается режим работы, при котором коэффициент $\alpha = 1$. На рисунке 3.15 приведен график $I_{ЗВУ} = f(\beta, \nu)$.

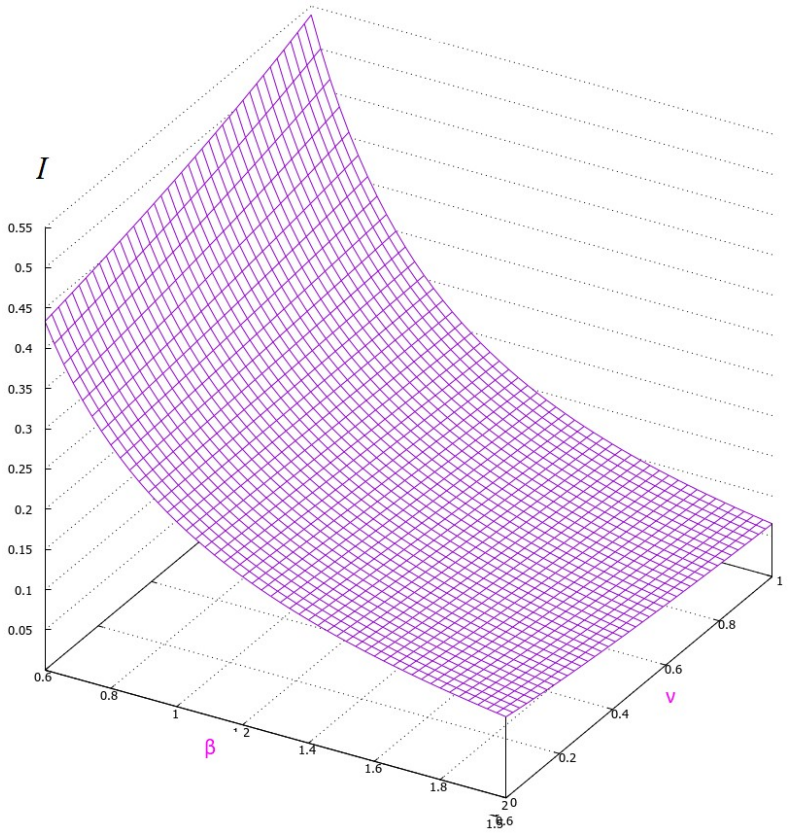


Рисунок 3.15 — График функции $I_{ЗВУ} = f(\beta,\nu)$ при условии $\alpha = 1$

Сравнение графиков на рисунках 3.14 и 3.15 показывает, что:

- снижение коэффициента β приводит к росту I независимо от значения коэффициента ν;
- при значениях коэффициента $\beta < 1$ увеличение коэффициента ν приводит к снижению I;
- при значениях коэффициента $\beta > 1$ увеличение коэффициента ν приводит к росту I;
- при условии $\beta = 1$ изменение коэффициента ν не влияет на I.

Проанализируем влияние режима форсирования на значение I. В соответствии с алгоритмом работы схемы (рисунок 3.1) режим форсирования включается, когда ошибка в системе превышает определенный уровень $\Delta t°C$. При форсировании в системе управления температурой теплицы обеспечивается снижение постоянных времени T_H и $T_{ТЕП}$ на 30%. В выражениях 3.6 и 3.7 порядок постоянных времени в числителе на 1 меньше порядка постоянных времени знаменателя. Поэтому все графики рис. 3.13 и 3.14 сохраняются с изменением масштаба по оси

I в 1,43 раза в режиме форсирования. В процессе работы ошибка в системе снижается и становится меньше $\Delta t°C$, значение I в установившемся режиме возвращается к значениям, соответствующим исходному (неформированному) режиму.

3.4 Структура системы регулирования температуры теплицы при цифровой технической реализации

Определим аналоговую реализацию структурной схемы. После исключения упреждающей коррекции и инвариантной цепи она принимает вид (рисунок 3.16)

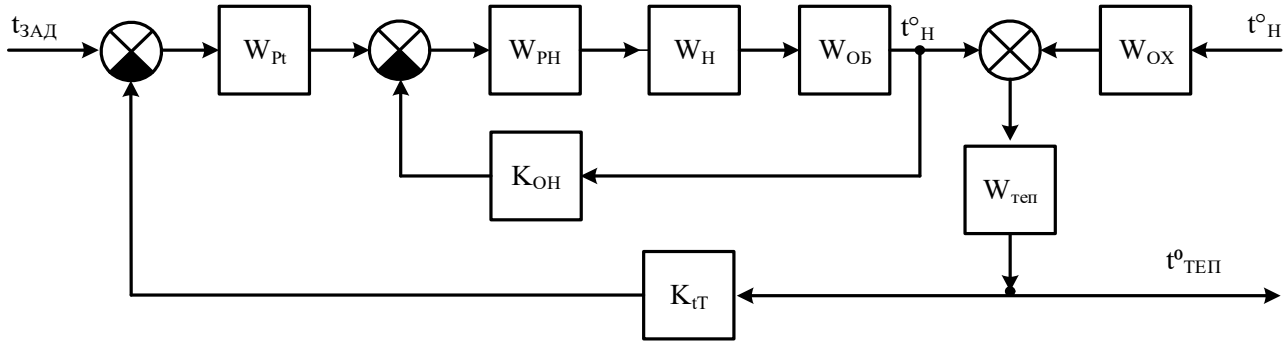


Рисунок 3.16 — Упрощенная структурная схема системы стабилизации температуры теплицы (СТТ).

Считаем, что внутренний контур обогревателя реализован по аналоговой схеме с настройкой на технический оптимум

$$W_{KH}(p) = \frac{1/K_{OH}}{2T_H^2 P^2 + 2T_H P + 1} \qquad (3.27)$$

Внешний контур регулирования температурой теплицы замыкается через систему автоматизации «Priva Connext». Особенностью работы этого контура является явно выраженная дискретность: квантование по времени и дискретизация по уровню. Влияние квантования по времени на свойства системы можно учесть с помощью Z- преобразования [106]. Составляем дискретные математические модели рассматриваемой системы (рисунок 3.17).

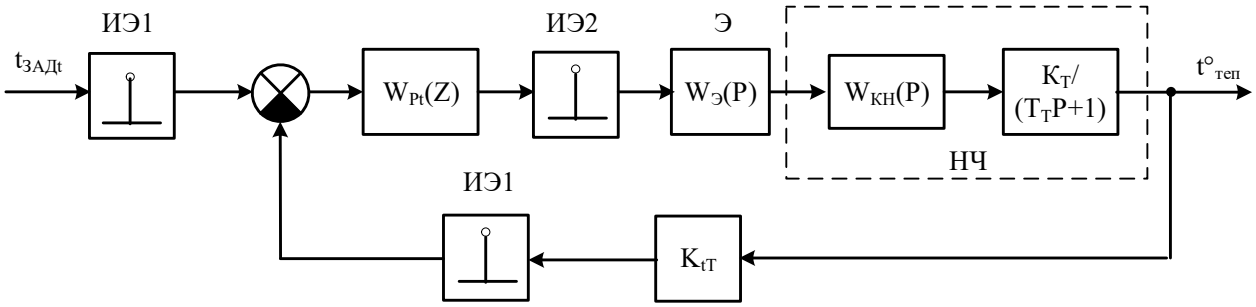


Рисунок 3.17 — Структурная схема цифровой системы СТТ с учетом квантования по времени.

Схема позволяет учесть, что непрерывный сигнал задания $U_{задт}$ и сигнал с датчика температуры теплицы с помощью идеальных импульсных элементов ИЭ1 [93] преобразуются в решетчатые функции. Регулятор контура температуры теплицы реализуется в цифровом виде с дискретной передаточной функцией $W_{pt}(Z)$. Выходной сигнал регулятора через идеальный импульсный элемент второго рода ИЭ2 [106] подается на вход контура регулирования обогревателя, который для цифрового сигнала выполняет функцию экстраполятора нулевого порядка. Функционально это осуществляет запоминание выходного сигнала регулятора СТТ на один такт. Это позволяет включить его в структурную схему в виде непрерывной передаточной функции $W_э(P)$. Так же в непрерывную часть системы СТТ входят замкнутый контур нагревателя и теплица с соответствующими передаточными функциями.

Для получения математической модели рассматриваемой системы СТТ, учитывающей цифровую реализацию, требуется перейти к дискретным передаточным функциям. Приведенная на их основе структурная схема имеет вид (рисунок 3.18).

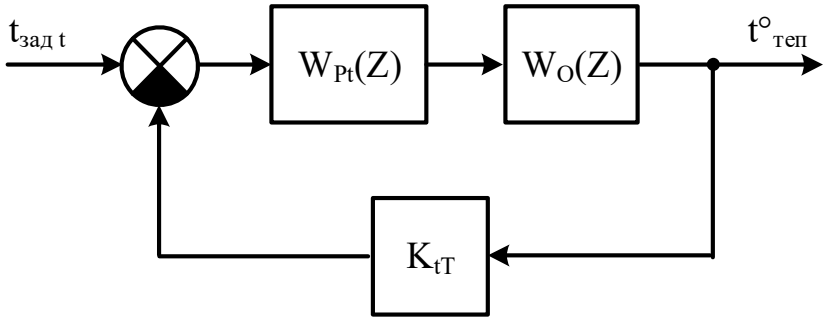


Рисунок 3.18 — Упрощенная структурная схема цифровой системы СТТ

Определим дискретную передаточную функцию непрерывной части системы СТТ с учетом экстраполятора нулевого порядка. Дискретная передаточная функция объекта $W_0(Z)$ определяется по выражению [85]

$$W_O(Z) = \frac{t_T(Z)}{N_{Pt}(Z)} = \frac{Z-1}{Z} \cdot Z\left\{\frac{W_o(P)}{P}\right\} \quad (3.28)$$

Где Z- условное обозначение перехода от преобразования Лапласа к Z преобразованию, t_t - температура теплицы, N_{pt} – выходной сигнал регулятора СРТТ, $Z=e^{PT}$ переменная, Т-период квантования по времени.

3.5 Дискретные передаточные функции непрерывной части системы регулирования температуры теплицы с учетом экстраполятора нулевого порядка

Математическая модель объекта управления температурой теплицы представлена дискретной передаточной функцией $W_0(Z)$. Запишем в виде:

$$W_0(Z) = \frac{1}{K_{OH}} \frac{Z-1}{Z} Z\left\{\frac{1}{K_{OH}(T_K^2P^2 + 2\xi_K T_K P + 1)(T_T + 1)TP}\right\} \quad , (3.29)$$

Разложим выражение в фигурных скобках формулы (3.29) на сумму элементарных дробей:

$$\frac{1}{K_{OH}} \frac{Z-1}{Z} Z\left\{\frac{E}{P} + \frac{F}{(T_T P + 1)} + \frac{GP + H}{T_K^2P^2 + 2\xi_K T_K P + 1}\right\} \quad . (3.30)$$

Неизвестные коэффициенты E, F, G, H можно определить, приведя правую часть (3.30) к общему знаменателю и приравняв числитель полученного выражения к 0. Из формулы следует, что для соблюдения равенства необходимо выполнение условий:

$$\{\dots\} = \frac{E(T_T + 1)(T_K^2P^2 + 2\xi_K T_K P + 1) + FP(T_K^2P^2 + 2\xi_K T_K P + 1)}{P(T_T P + 1)(T_K^2P^2 + 2\xi_K T_K P + 1)} +$$

$$+\frac{GP^2(T_TP+1)+HP(T_TP+1)}{P(T_TP+1)(T_K^2P^2+2\xi_KT_KP+1)} \qquad (3.31)$$

Предположим, что

$$\xi=\frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$T_KT_K^2EP^3+(2\xi_KT_KT_T+T_K^2)EP^2+(T_T+2\xi_KT_K)E_P+E+T_K^2FP^3+$$

$$2\xi_KT_KFP^2+FP+T_TGP^3+GP^2+T_THP^2+HP=0. \qquad (3.32)$$

$$\left.\begin{aligned} &T_TT_K^2+T_K^2F+T_TG=0\\ &2\xi_KT_KT_T+T_K^2+2\xi_KT_KF+G+T_TH=0\\ &T_T+2\xi_KT_K+F+H=0 \end{aligned}\right\} \qquad (3.33).$$

Из решения системы уравнений (3.33) можно найти значения коэффициентов:

$$H=-(T_T+2\xi_KT_K+F)$$

$$2\xi_KT_KT_T+T_K^2+2\xi_KT_KF+G-T_T^2-2\xi_KT_KT_T-T_TF=0$$

$$T_TT_K^2+T_K^2F+T_TG=0$$

$$E=1$$

$$\left.\begin{aligned} &G=-\frac{T_KT_K^2+T_K^2F}{T_T}\\ &F=-\frac{T_T^3}{T_T^2+T_K^2-2\xi_KT_KT_T}\\ &G=\frac{2\xi_KT_K^3-T_K^4}{T_T^2+T_K^2-2\xi_KT_KT_T}\\ &H=\frac{4\xi_K^2T_K^2T_T-2\xi_KT_K^3-T_K^2T_T}{T_T^2+T_K^2-2\xi_KT_KT_T} \end{aligned}\right\} \qquad (3.34).$$

Подставляя коэффициенты, записываем эквивалентное выражение дискретной передаточной функции:

$$W_0(Z) = \frac{1}{K_{OH}} \frac{Z-1}{Z} \mathrm{Z}\left\{ \frac{1}{P} - \frac{T_T^3}{(T_T^2 + T_K^2 - 2\xi T_K T_T)(T_T P + 1)} + \right. \\ \left. + \frac{\left[\frac{2\xi_K T_K^3 - T_K^4}{T_T^2 + T_K^2 - 2\xi_K T_K T_T} P + \frac{4\xi_K^2 T_K^2 T_T - 2\xi_K T_K^3 - T_K^2 T_T}{T_T^2 + T_K^2 - 2\xi_K T_K T_T} \right]}{T_K^2 P^2 + 2\xi_K T_K P + 1} \right\} \quad (3.35)$$

По таблицам D → Z преобразований находим изображения элементарных дробей:

$$\mathrm{Z}\left\{\frac{1}{P}\right\} = \frac{Z}{Z-1}$$

$$Z\left\{ - \frac{T_T^3}{(T_T^2 + T_K^2 - 2\xi_K T_K T_T)(T_T P + 1)} \right\} = - \frac{T_T^2 Z}{(T_T^2 + T_K^2 - 2\xi_K T_K T_T)(Z - d_T)} \quad (3.36),$$

где

$$\alpha = \frac{\xi}{T_K} \qquad \beta = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_K}$$

$$d_T = e^{-\frac{T_{\text{ДИС}}}{T_T}} \qquad d_K = e^{-\frac{\xi_K T}{T_K}} \quad (3.37).$$

Подставим (3.36 в 3.35) и получим изображения D → Z преобразований

$$W_0(Z) = \frac{1}{K_{OH}} \left\{ 1 - \frac{T_T^2 (Z-1)}{(T_T^2 + T_K^2 - 2\xi T_K T_T)(Z - d_T)} + \frac{T_K (2\xi_K T_T - T_T)}{T_T^2 + T_K^2 - 2\xi_K T_K T_T} - Zda \times \right. \\ \times \left[\frac{(z-1)(z - d\cos\beta T_{\text{ДИС}})}{Z^2 - 2Zd\cos\beta T_{\text{ДИС}} + dk^2} \right. \\ \left. \left. + \frac{2\xi_k T_T - \xi_K T_K - T_K}{\sqrt{1-\xi_K^2}(2\xi_K T_T - T_K)} \frac{(Z-1) d \sin\beta T_{\text{ДИС}}}{Z^2 - 2Zd\cos\beta T_{\text{ДИС}} + d_K^2} \right] \right\} \quad (3.38).$$

После преобразований и сокращений получаем передаточную функцию объекта регулирования температуры теплицы:

$$W_0(z)=\frac{1}{k_{OH}}\frac{az^2+bz+c}{\left(z-d_T\right)\left(z^2-2zd_K\beta T_{ДИС}+d_K^2\right)}, \tag{3.39}$$

где:

$$a=\frac{T_T^2}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}\left(1+2d_K\cos\beta T_{ДИС}+d_K^2\right)-$$
$$-\frac{2\xi_K T_K T_T-T_K^2}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}\left(1+d_T+d_K\cos\beta T_{ДИС}+\frac{\xi_K T_K d_K}{T_T-\xi_K T_K}\sin\beta T_{ДИС}\right)-d_T-2d_K\cos\beta T_{ДИС}$$

$$b=d_K^2+2d_K d_T\cos\beta T_{ДИС}+$$
$$+\frac{2\xi_K T_K T_T-T_K^2}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}\left[d_T+d_K\left(1+d_T\right)\left(\cos\beta T_{ДИС}+\frac{\xi_K T_K}{T_T-\xi_K T_K}\sin\beta T_{ДИС}\right)\right]-$$
$$-\frac{T_T^2}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}\left(d_K^2+2d_K\cos\beta T_{ДИС}\right)$$

$$c=\frac{T_T^2 d_K}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}-d_K^2 d_T-$$
$$-\frac{2\xi_K T_K T_T-T_K^2}{T_T^2+T_K^2-2\xi_K T_K T_T}d_T d_K\left(\cos\beta T_{ДИС}+\frac{\xi_K T_K}{T_T-\xi_K T_K}\sin\beta T_{ДИС}\right). \tag{3.40}$$

Нахождение дискретной передаточной функции рассматриваемой системы необходимо для определения алгоритма работы цифровых регуляторов. Считаем, что вычисление интегралов осуществляется по формулам нахождения полной суммы, а процедура дифференцирования производится по принципу первой обратной разности. Дискретная передаточная функция регулятора имеет пропорционально-интегральный регулятор температуры теплицы:

$$W_{PtT}(z)=k_{PtT}+\frac{T_{ДИС}z}{T_{PtT}\left(z-1\right)}=\frac{\left(k_{PtT}T_{PtT}+T_{ДИС}\right)z-k_{PtT}T_{PtT}}{T_{PtT}\left(z-1\right)}, \tag{3.41}$$

Или, с учетом значений k_{PtT} и T_{PtT} :

$$W_{PtT}(z)=\frac{\left(T_T+T_{ДИС}\right)z-T_T}{4T_H\left(z-1\right)}. \qquad (3.42)$$

Было проведено моделирование системы на рис. 3.16. Показаны переходные процессы аналоговой и цифровой системах с периодом $T_{дис.}$=60. Также на графике показано $\Delta_{дин}$ – динамическое расхождение между этими процессами и интеграл от $\Delta_{дин}$. (рисунок 3.19)

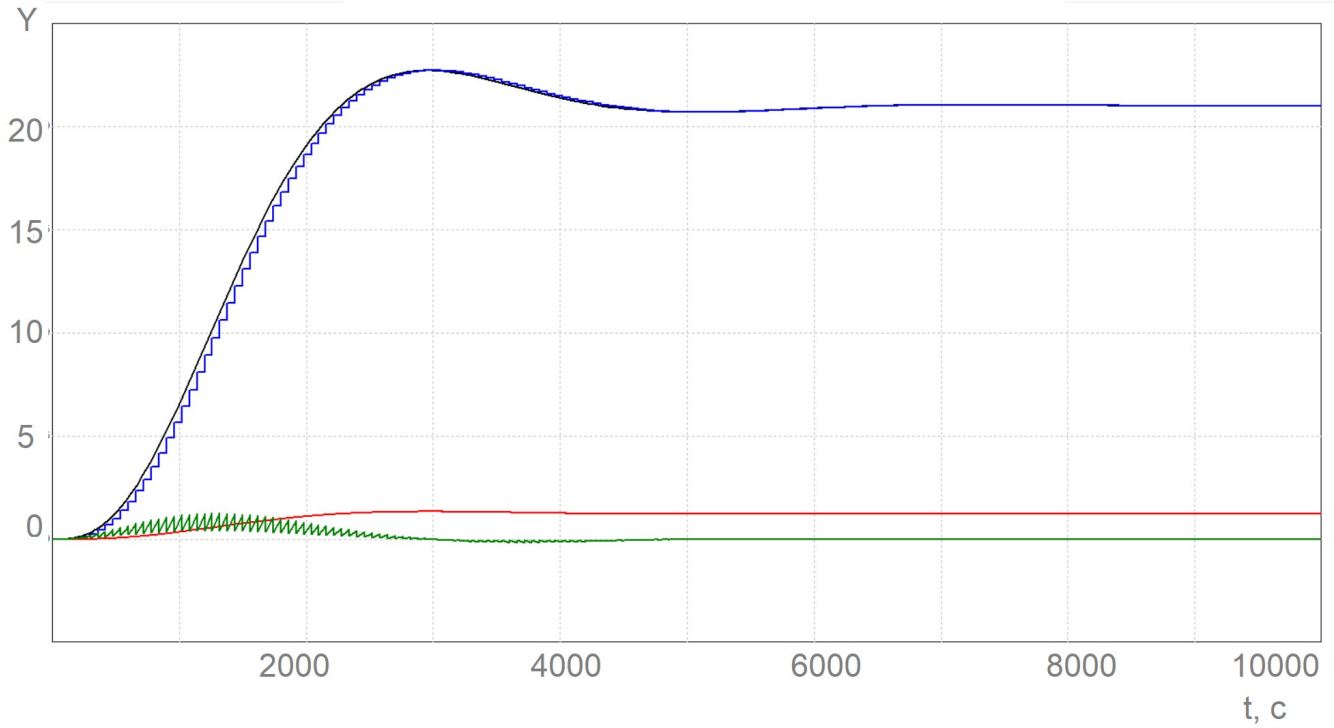


Рисунок 3.19 — Переходные процессы замкнутой системы $T_{дис.}$ = 60

На рисунке 3.20 приведены аналогичные процессы для периода $T_{дис.}$=6. Кроме того, масштаб $\Delta_{дин}$ и $\int \Delta_{дин}$ увеличен в 10 раз.

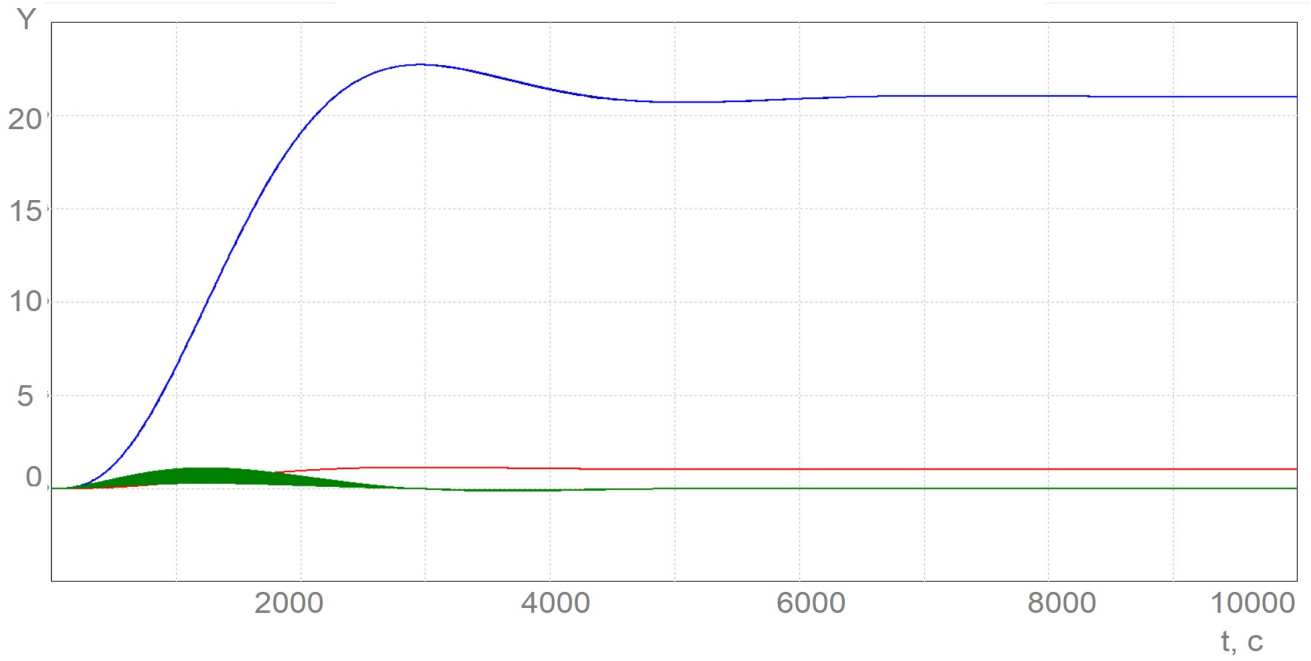


Рисунок 3.20 — Переходные процессы замкнутой системы $T_{дис.} = 6$

масштаб $\Delta_{дин}$ и $\int \Delta_{дин}$ увеличен в 10 раз, где

Черный — – аналоговый вариант переходного процесса системы;

Синий — – цифровой с разным периодом дискретизации 6 и 60;

Зеленый — – разница аналогового и дискретного;

Красный — –интегральная ошибка цифрового и аналогового сигнала.

Анализ полученных графиков приводит к следующим выводам:

- Наличие $\Delta_{дин}$ связано с дискретной работой системы;
- $\int\Delta_{дин}$ может быть минимизирован, если в аналоговом варианте схемы установить звено запаздывания, учитывающее дискретность работы ($T_{дис}$);
- $\int\Delta_{дин}$ практически пропорционален величине $T_{дис}$. Снижение $T_{дис}$ дает кратное снижение $\int\Delta_{дин}$.

Выводы по третьей главе

Был проведен синтез структур систем СТТ. На основе проведенных исследований этих схем можно сделать следующие выводы:

- Предлагается использовать упреждающую коррекцию для снижения чувствительности к изменениям параметров системы.

- Проведен анализ влияния случайных сигналов на работу такой схемы и показаны преимущества упреждающей коррекции по сравнению со структурой подчиненного регулирования.

- Построена цифровая реализация систем СТТ, дано сравнение с аналоговым вариантом.

- Показано преимущество работы схемы с комплексным измерителем параметров, который дает возможность снизить на порядок интервал дискретизации.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛИЧНОГО КОМБИНАТА

4.1 Практические аспекты внедрения

В процессе экспериментальных исследований были проведены опыты на действующем оборудовании комбината АО «Тепличное». В основе управления лежит автоматизированный программируемый комплекс «Priva Connext», который определяет работу электротехнического оборудования. Непосредственно задает подачу теплоносителя, вентиляции, экранирование, нагнетание углекислого газа, задачу освещенности, мониторинг текущей инсоляции, увлажнение, электроснабжение, водоподготовку, приготовление и подачу питательного раствора, дренажной системы, контроль наружной метеорологической обстановки.

Для правильного использования системы управления параметров теплицы необходимо сформировать стратегию ведения в соответствии с текущим технологическим заданием. Важным является задача входных установочных параметров матрицы и достаточное введение корректирующих настроек. Ведется постоянный мониторинг технических и технологических параметров в автоматическом режиме и выполняется текущая аналитика, визуализация работы оборудования. Общим для всех подсистем управления является временная синхронизация с разбивкой суток по шести временным периодам.

Приведем наглядное изображение экрана оператора с текущим заданием на ведение отопления теплицы (рисунок 4.1). Активируются периоды управления электротехническим оборудованием. Задается управление насосами подачи теплоносителя, прописывается температура отопления. Определяется стратегия ведения корректировок для компенсации нагрева системой электрического досвечивания, суммарной накопленной естественной освещенности. Определяется приоритетное влияние связанных систем, скорость набора и снижения температуры, параметры регулирования. Для определения значений прописываются табличные данные. Вводится стратегия регулированием насосами и подающей аппаратурой.

После процессорной обработки введенной стратегии, и проверкой моделирования работы систем электротехнического комплекса, отображаются расчетные текущие значения температур.

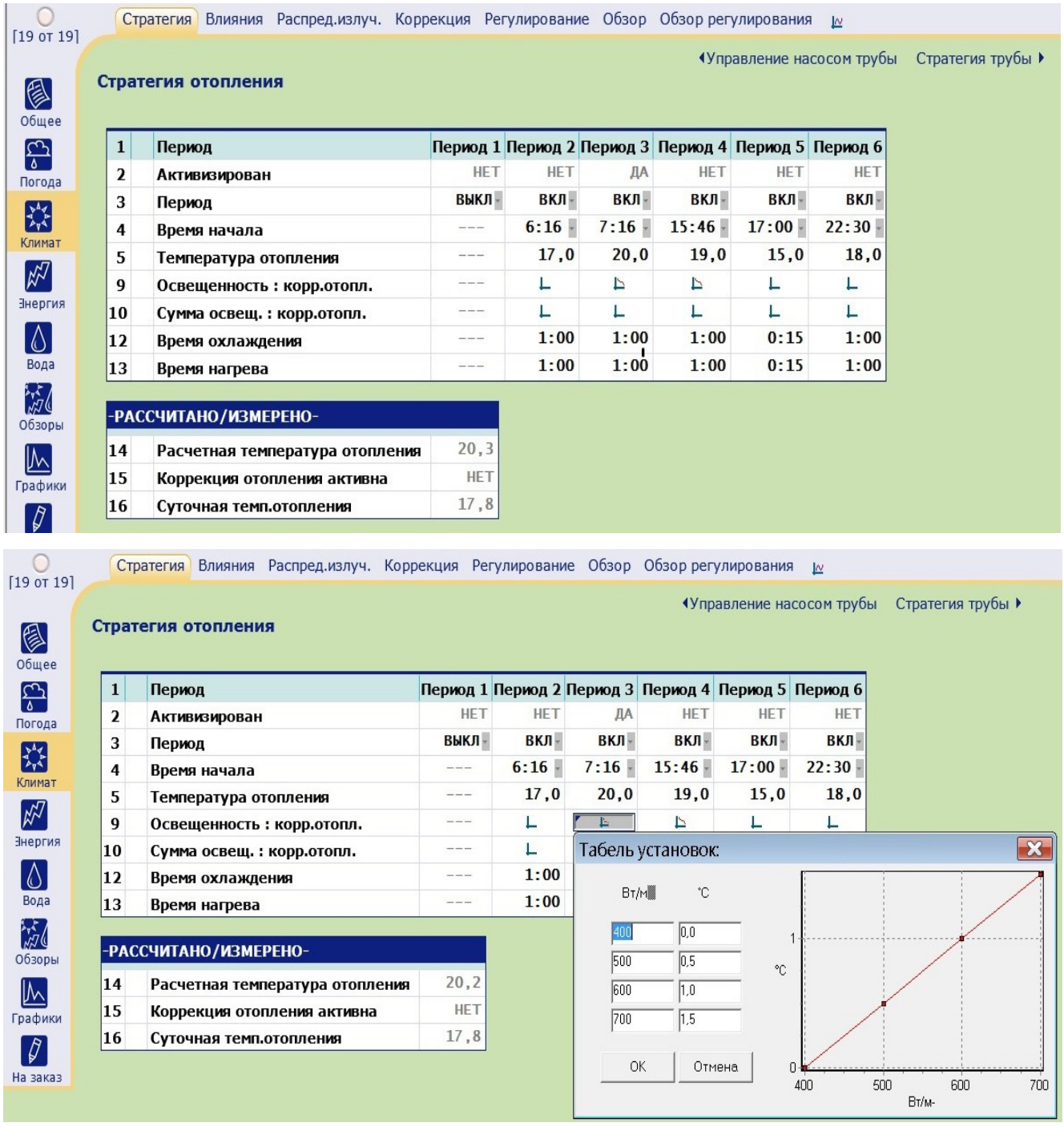
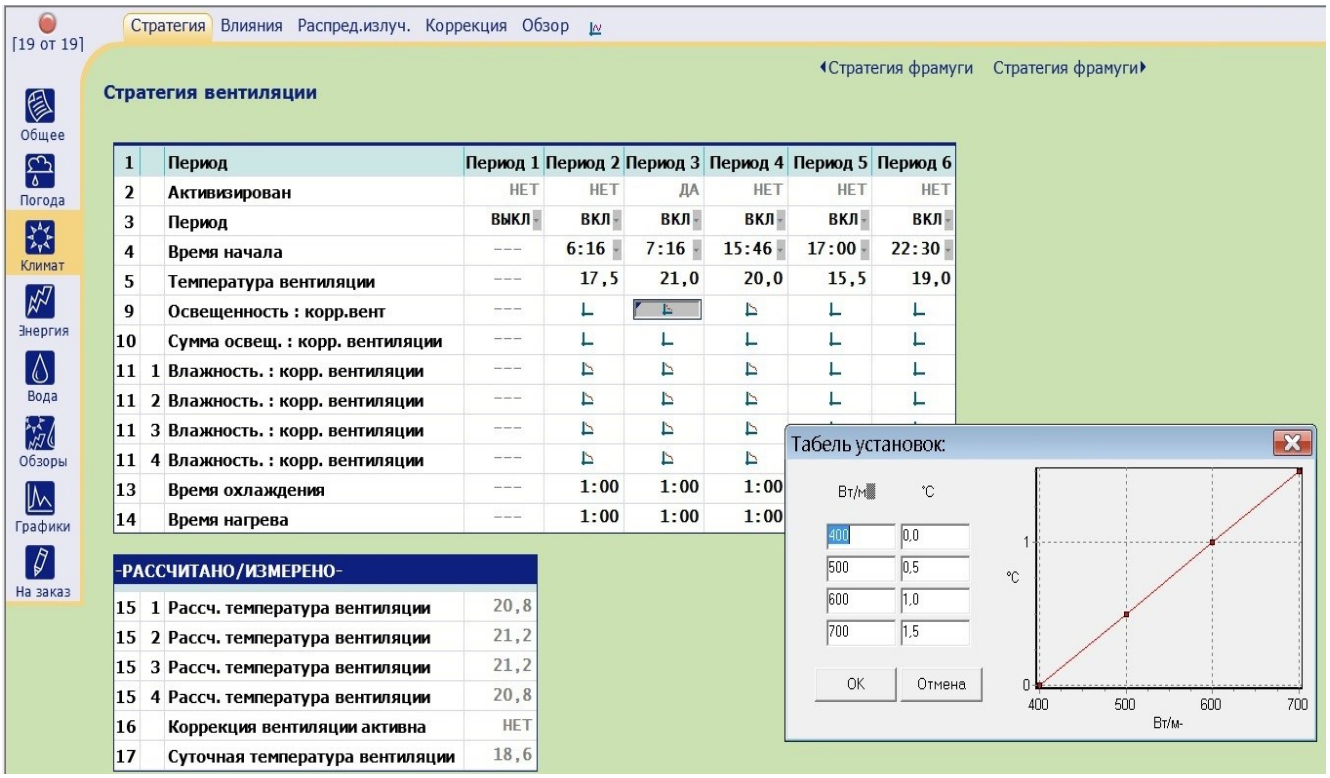


Рисунок 4.1 — Панель ведения стратегии управления отоплением теплицы

Стратегия управления электрооборудованием системы отопления работает совместно с системой вентиляции. Для распределения нагрева по объему помещения теплицы установлена система вентиляторов с программируемым управле-

нием скорости потока. Направление обдува установлено в одном положении. Задаются периоды активности, условия включения обдува по внутренне температуре, коррекции по запуску системы досвечивания, влажности внутреннего воздуха, время работы вентиляторов на охлаждение и нагрев теплицы. Наглядное изображение экрана оператора с текущим заданием на ведение вентиляции теплицы представлено на (рисунок 4.2).



		Период	Период 1	Период 2	Период 3	Период 4	Период 5	Период 6
2		Активизирован	НЕТ	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
3		Период	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ
4		Время начала	---	6:16	7:16	15:46	17:00	22:30
5		Температура вентиляции	---	17,5	21,0	20,0	15,5	19,0
9		Освещенность : корр.вент	---					
10		Сумма освещ. : корр. вентиляции	---					
11	1	Влажность. : корр. вентиляции	---					
11	2	Влажность. : корр. вентиляции	---					
11	3	Влажность. : корр. вентиляции	---					
11	4	Влажность. : корр. вентиляции	---					
13		Время охлаждения	---	1:00	1:00	1:00		
14		Время нагрева	---	1:00	1:00	1:00		

		-РАССЧИТАНО/ИЗМЕРЕНО-	
15	1	Рассч. температура вентиляции	20,8
15	2	Рассч. температура вентиляции	21,2
15	3	Рассч. температура вентиляции	21,2
15	4	Рассч. температура вентиляции	20,8
16		Коррекция вентиляции активна	НЕТ
17		Суточная температура вентиляции	18,6

Рисунок 4.2 — Панель ведения стратегии управления вентиляцией теплицы

Для ускорения созревания плодов и обеспечения параметров роста растений необходимо наличие требуемой концентрации углекислого газа. Отбор отработанного газа от котловых агрегатов и подачу в теплицы производится по управляемой стратегии, увязанной с работой энергетического оборудования и текущего состояния теплицы. Водится период активности системы, коррекции от положения фрамуг, внутренней температуры и влажности воздуха теплиц, скорости ветра, наружной температуры и влажности. Водятся ограничения по верхнему и нижнему пределу концентрации газа в теплице. Изображение экрана оператора с текущим заданием на ведение подачи углекислого газа теплицы представлено на (рисунок 4.3).

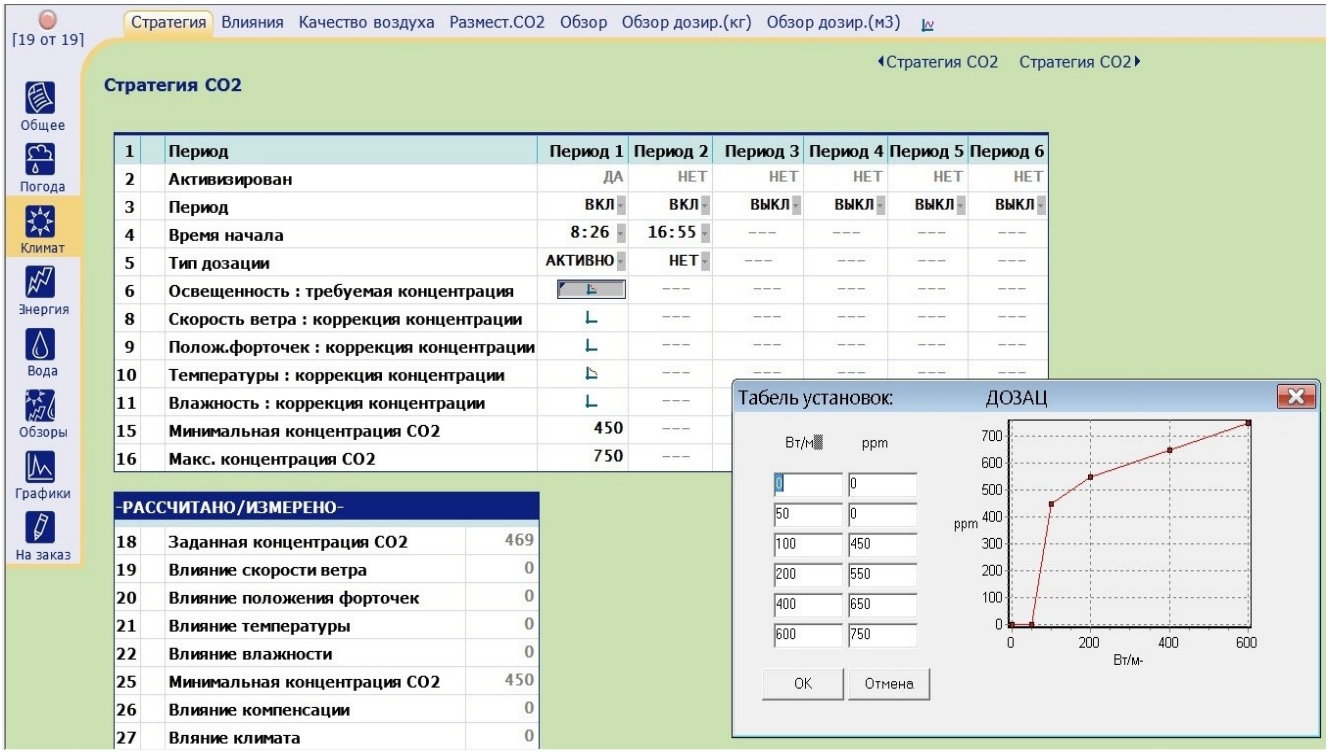


Рисунок 4.3 — Панель ведения стратегии управления газацией теплицы

Таким образом имеем сложную систему автоматизированного управления работой электротехнического комплекса с большим составом электрооборудования. Все управление осуществляется от программируемого комплекса «Priva Connext». Оборудование работает согласованно, по алгоритму. Оператор имеет возможность осуществлять управление по системам. В случае аварийной ситуации имеется предупреждение о сбое конкретной системы с возможностью sms- информирования.

4.2 Анализ результатов натурных экспериментов

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные от существующего автоматизированного комплекса «Priva Connext» позволяют сделать выборку с характерными периодами по нагрузке электротехнического комплекса, технологическим режимам и типовым дням наружной климатической обстановки. Примем к рассмотрению периоды с максимальным расходом энергоресурсов. Построим график с заданным режимом автоматического поддержания температуры, фактической реализацией температуры теплицы и суточным профилем зимней наружной температуры (рисунок 4.4а).

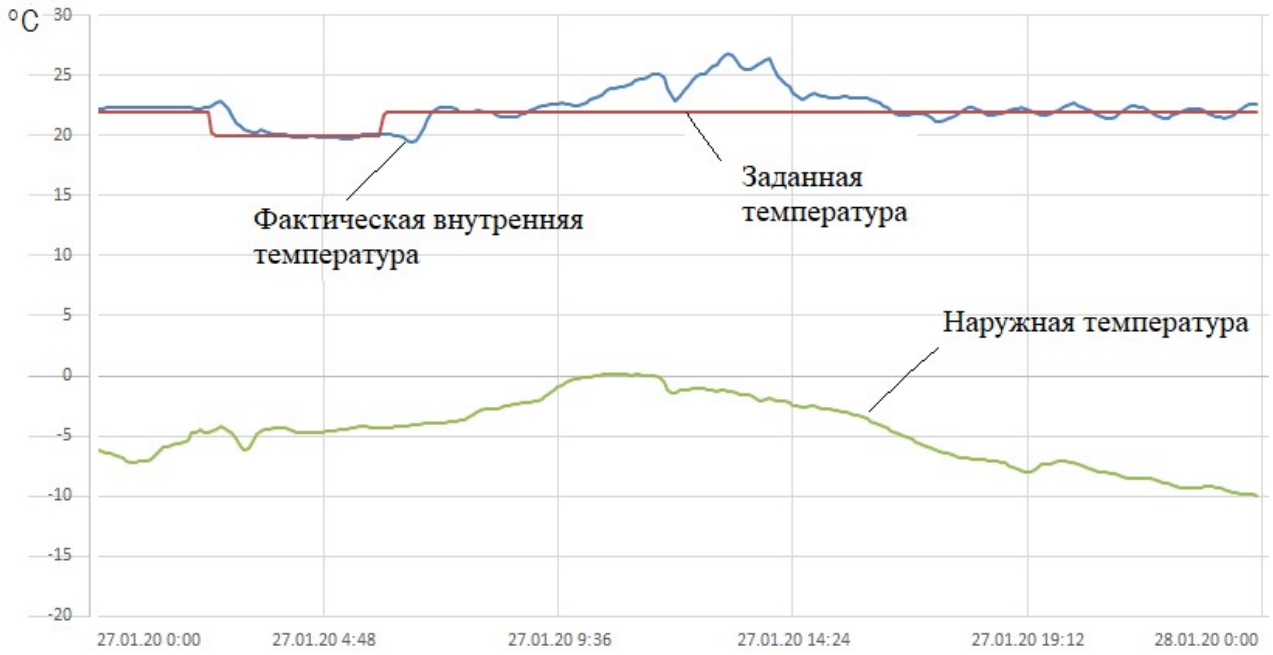


Рисунок 4.4.а — Суточный график температур 27.01.2020г.

Из графика наглядно представлена существенные расхождения контролируемого параметра и фактической температурой теплицы. В ночное и темное время, без присутствия солнечной радиации, регулирование температуры с присутствующем разбросом значений, прописывается в заданный режим. Однако при внешних возмущающих всплесках выходит из заданного диапазона регулирования. Происходит перегрев, увеличенный расход электроэнергии, газа, повышенный износ насосного и котлового оборудования. Рассмотрим суточное распределение дневных температур тех же суток (рисунок 4.4.б) [12, 14, 72, 74, 131, 139].

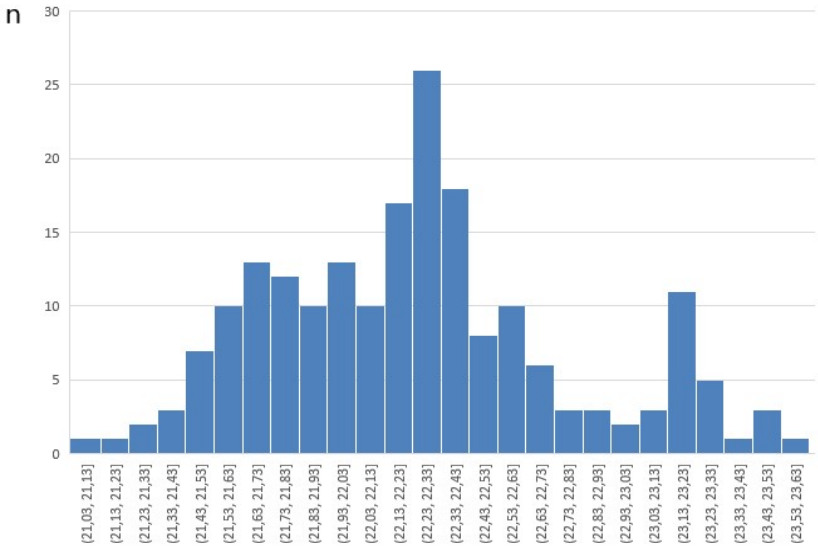


Рисунок 4.4.б — Суточное распределение дневных температур теплицы 27.01.2020г.

По распределению и частоте температуры теплицы наблюдается существенное превышение регулируемого параметра, что связано избыточным нагревом системы отопления в пиковый режим наружной солнечной радиации и особенностями регулирования подачи теплоносителя.

Примем к рассмотрению типовые зимние сутки в пасмурный день, без избыточной солнечной радиации. Наружные температуры отрицательные, перегрев температуры теплицы умеренный (рисунок 4.5.а, 4.6.а).

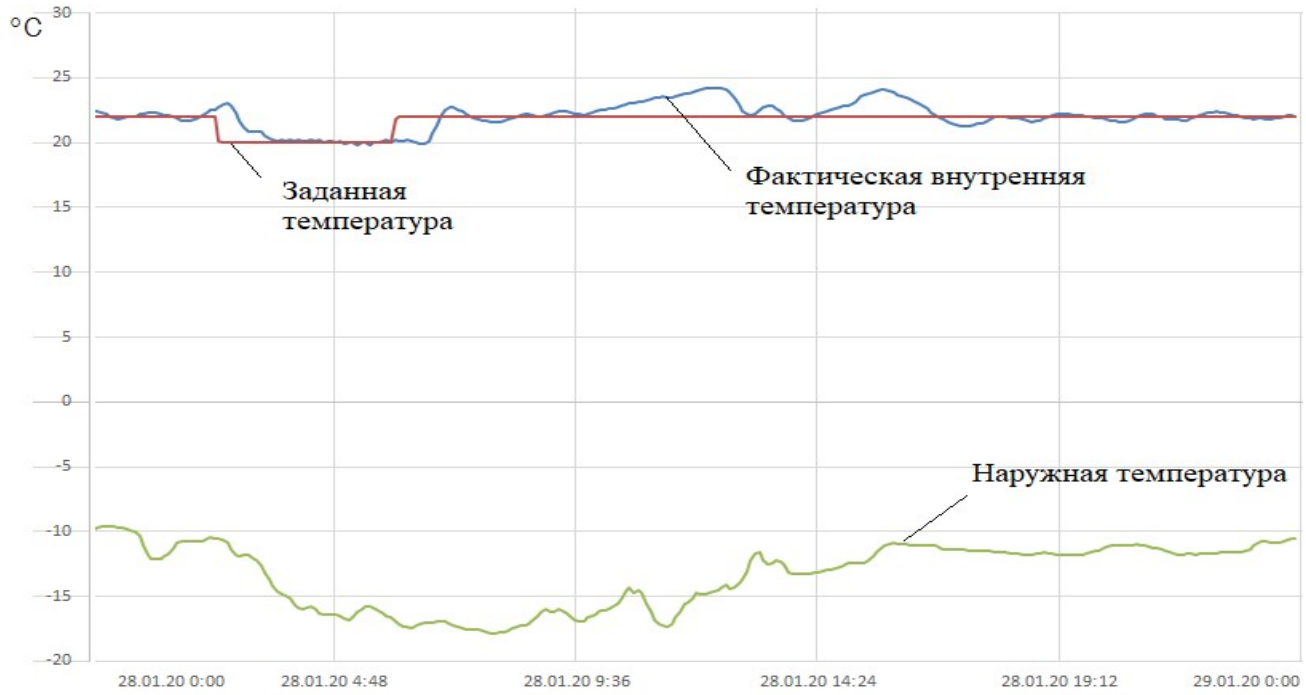


Рисунок 4.5.а — Суточный график температур 28.01.2020г.

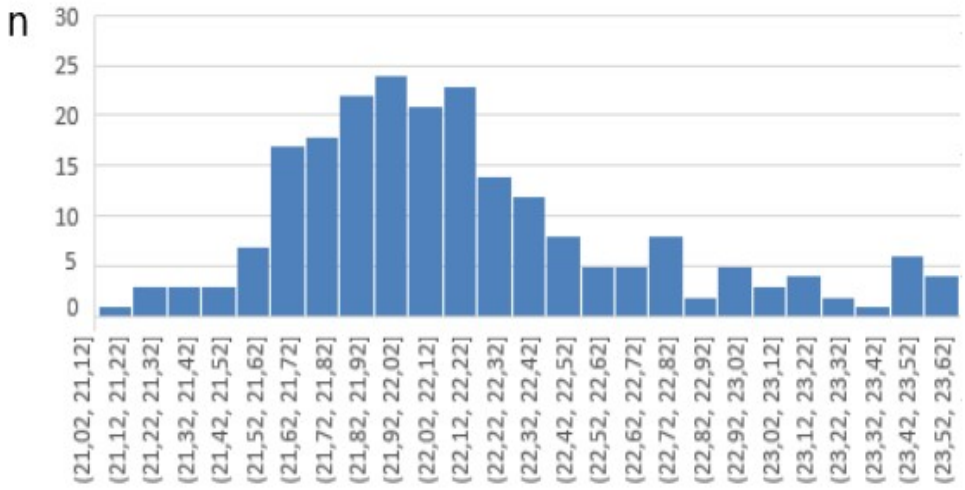


Рисунок 4.5.б — Суточное распределение дневных температур теплицы 28.01.2020г.

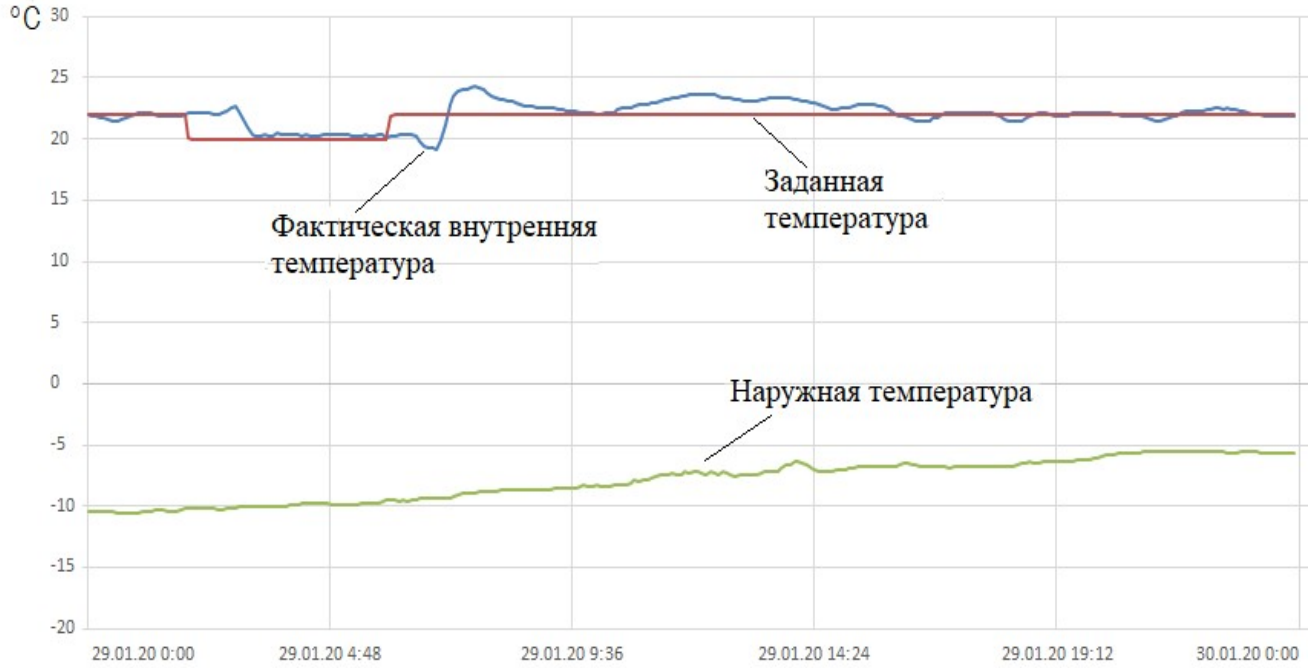


Рисунок 4.6.а — Суточный график температур 29.01.2020г.

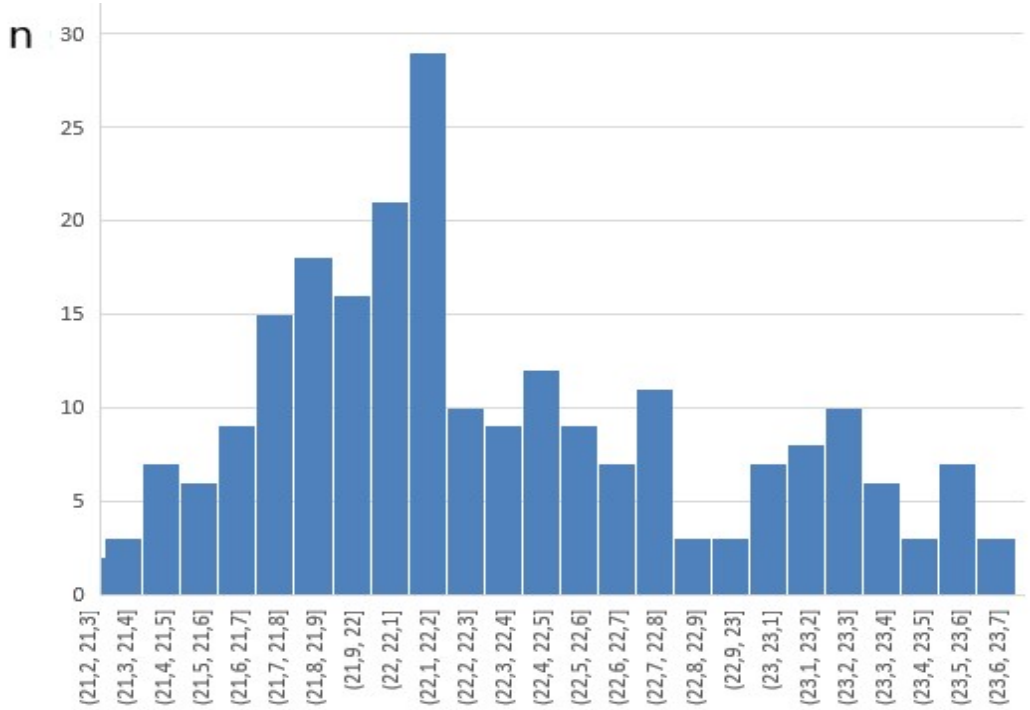


Рисунок 4.6.б — Суточное распределение дневных температур теплицы 29.01.2020г.

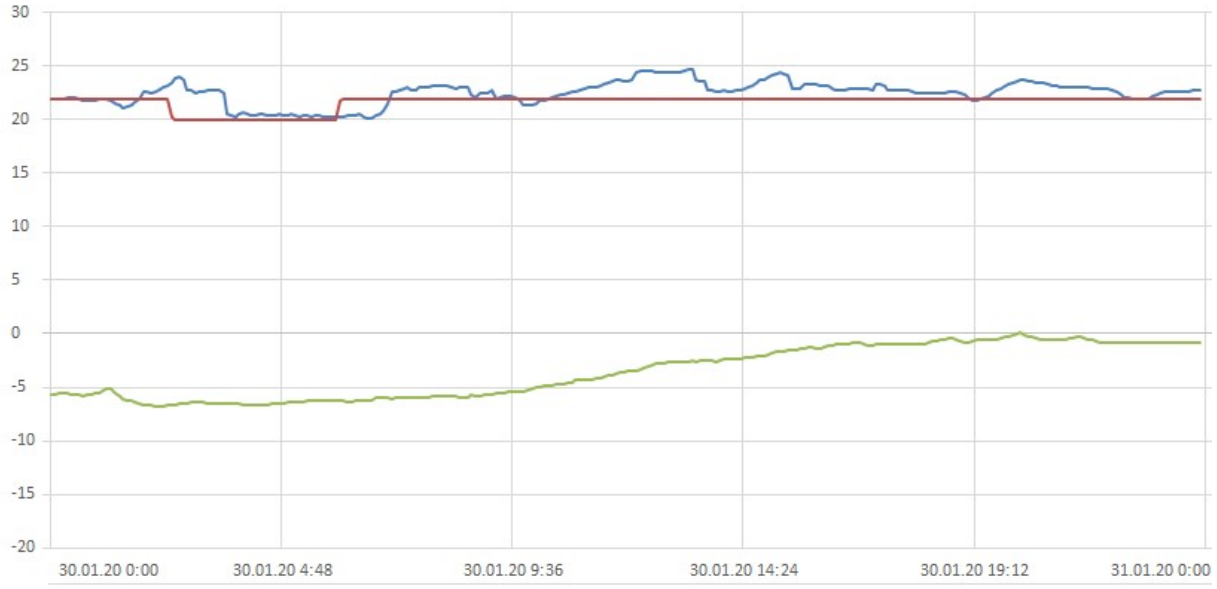


Рисунок 4.7.а — Суточный график температур 30.01.2020г.

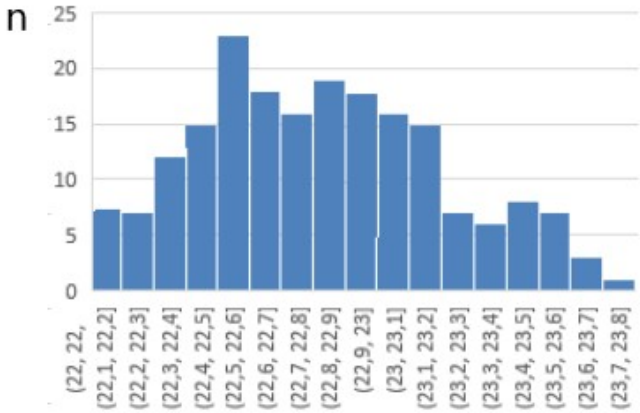


Рисунок 4.7.б — Суточное распределение дневных температур теплицы 30.01.2020г.

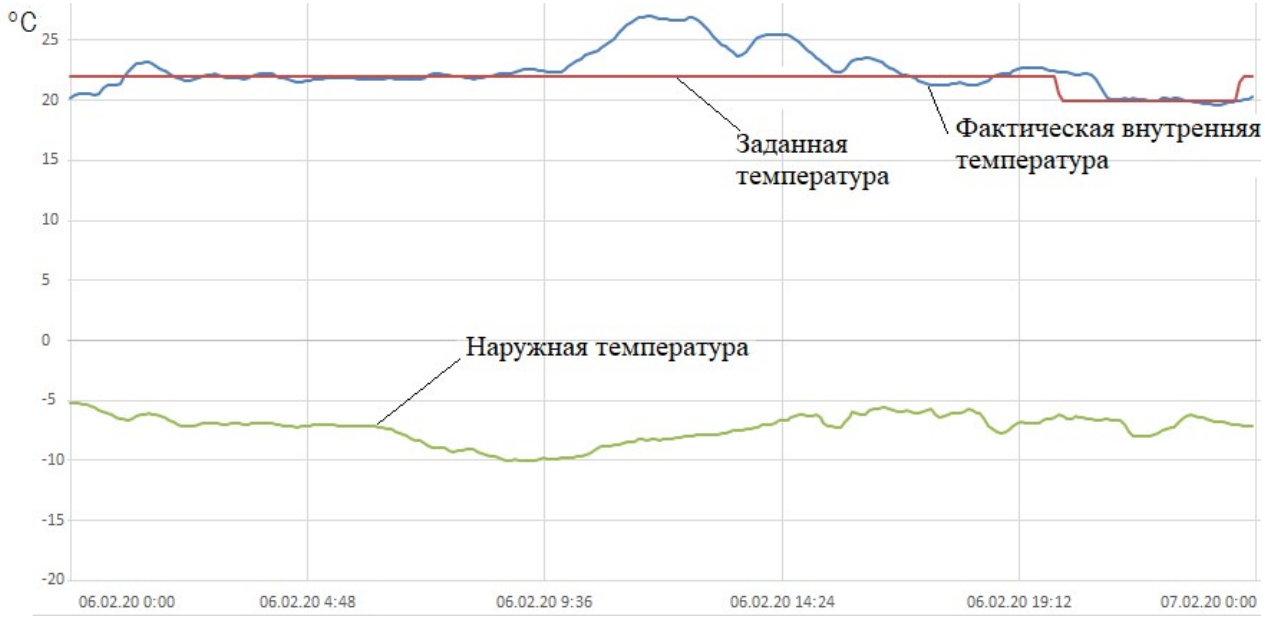


Рисунок 4.8.а — Суточный график температур 6.02.2020г.

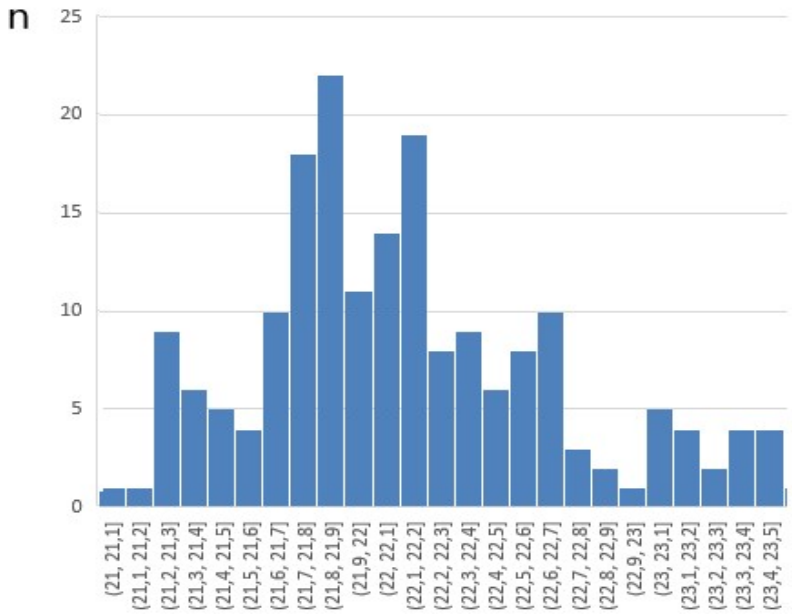


Рисунок 4.8.б — Суточное распределение дневных температур теплицы 6.02.2020г.

Анализ процессов и статистических данных показывает на необходимость проведения доработок существующей системы регулирования электротехнического комплекса, имеющийся резерв энергосбережения [15, 76].

Приведем результаты обработки технических параметров микроклимата теплицы. Данные сведены в таблицах 4.1, 4.2.

Таблица 4.1 — Значения корреляции

Корреляция	За сутки 27.01.2020	Время с 00 до 12	Время с12 до 17	Время с 17 до 24
$t_{теп}$ и $t_{наружная}$	0,461072	0,091981	0,545651	0,208711
$t_{теп}$ и $t_{задано}$	0,520075	0,646718	0,364231	0,413526
$t_{теп}$ и $Q_{освещ}$	0,82819	0,283547	0,877796	-0,319368

Таблица 4.2 — Статистические данные температуры теплицы

Дата	27.01.2020	28.01.2020	29.01.2020	30.01.2020	06.02.2020
Дисперсия по генеральной совокупности	2,3149096	1,0597709	0,723809645	1,18934159	3,142274729
Среднее геометрическое	22,269932	21,998516	21,88846839	22,46779633	22,3982562
Стандартное отклонение генеральное	1,5241311	1,0312437	0,85225092	1,092467682	1,775731799

Анализ значений корреляции показывает, что:

- В течение суток корреляция ($t_{теп}$ и $t_{наружная}$) и ($t_{теп}$ и $Q_{освещ}$) принимают наибольшее значение в утренние и ночные часы.
- Можно сделать вывод о влиянии освещенности и наружной температуры, эти параметры являются существенным возмущающим фактором для системы стабилизации температуры теплицы.

Статистические данные температуры теплицы указывают, что в течении нескольких суток среднее значение температуры колеблется в пределах заданного значения (+22ºС +0,47; -0,1). При этом величина среднеквадратичного отклонения ~1,3ºС, что приводит к дополнительным расходам ~ 130тыс.руб. за зимний месяц. Графики $t_{теп}$ºС показывают, что происходит постоянное изменение температуры под действием внешних факторов, которые носят случайный характер.

После проведения предлагаемых мероприятий в системе автоматического регулирования электротехнического комплекса, потребление энергоресурсов было снижено, по сравнению с аналогичными периодами с идентичными наружными климатическими условиями и технологическим состоянием блока теплиц до 4%, по газу и электроэнергии до 2%. В денежном выражении по состоянию тарифов на 2019г. это составит 268 тыс. руб. на один блок теплиц за год [39, 40, 105].

4.3 Анализ влияния дискретизации по времени на работу системы обогрева теплицы при случайных возмущениях

Построим цифровую модель системы регулирования электротехнического комплекса тепличного комбината с разной дискретизацией (рисунок 4.9) [21, 46, 85, 93].

Таким образом моделируем работу существующей системы управления электротехническим комплексом автоматизации «Priva Connext» с периодом опроса комплексных датчиков 60с и предлагаемую систему с комплексным измерением параметров и периодом опроса 6с.

Сравним работу систем при воздействии случайных сигналов. В результате исследования системы автоматического регулирования электротехническим комплексом определим влияние случайного сигнала с различными частотными характеристиками. Работу системы опробуем с характерными временными интервалами в программном комплексе МВТУ.

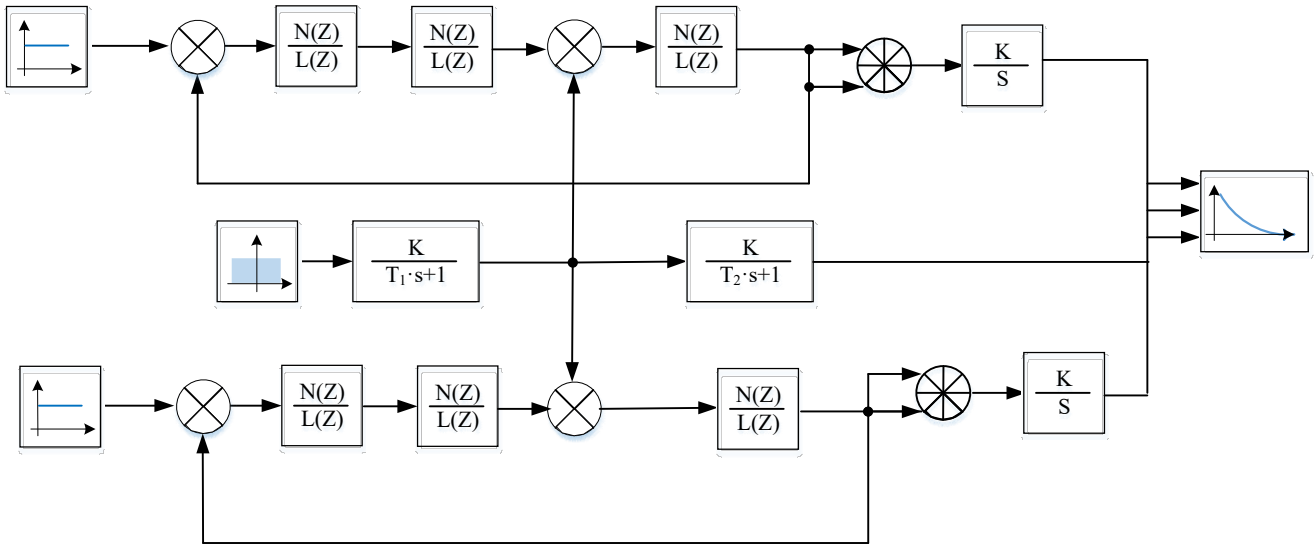


Рис. 4.9 — Цифровая модель системы регулирования электротехнического комплекса тепличного комбината

На рисунке 4.10 приведены графики, характеризующие интегральное значение среднеквадратического отклонения за конкретный период.

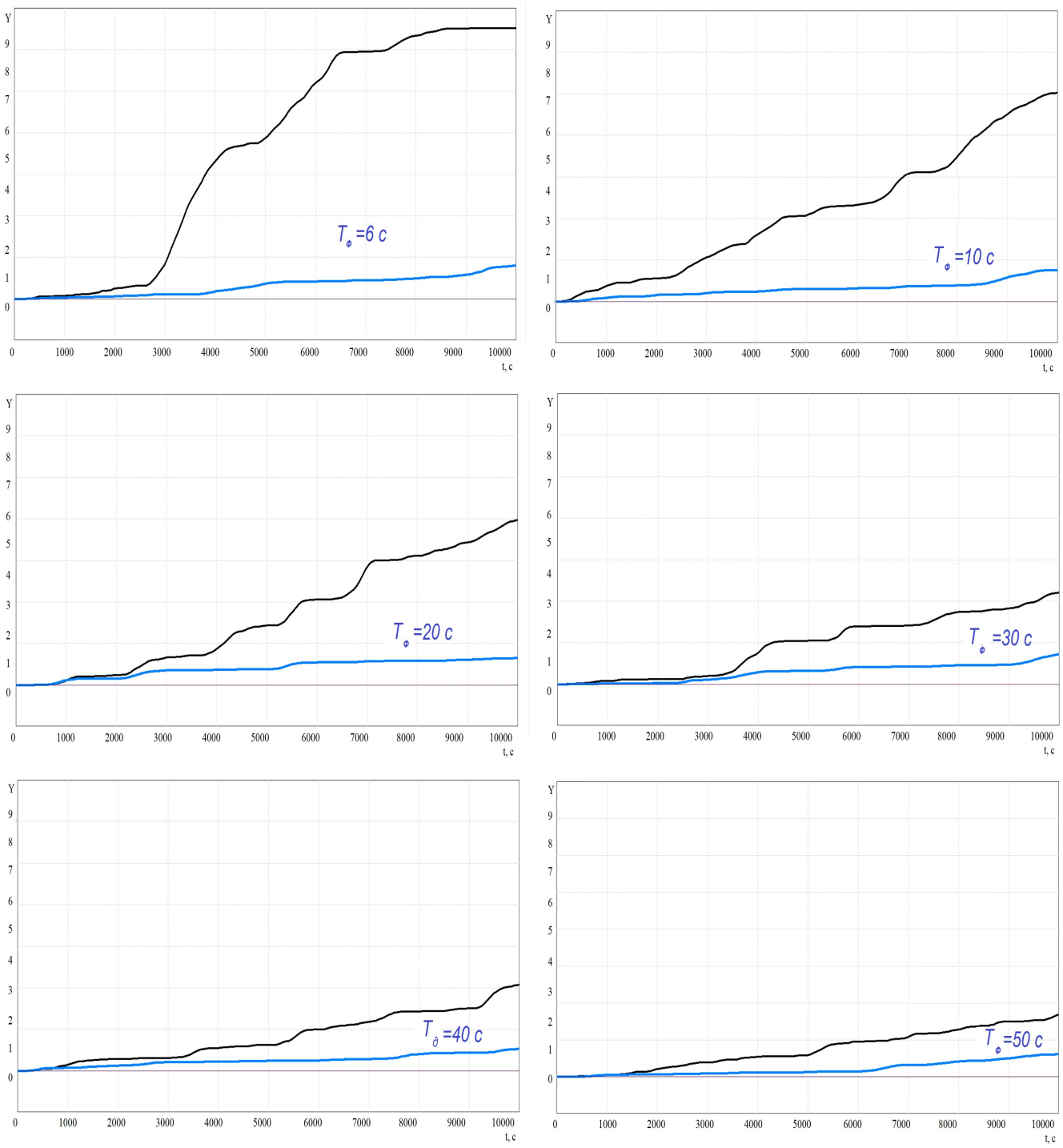


Рисунок 4.10 — Графики, характеризующие влияние периода дискретизации на среднеквадратичное отклонение

Обобщенный результат эксперимента возможно представить сводным графиком. Приведем профили среднеквадратического интегрирования систем регулирования с разным периодом дискретизации, рисунке 4.11.

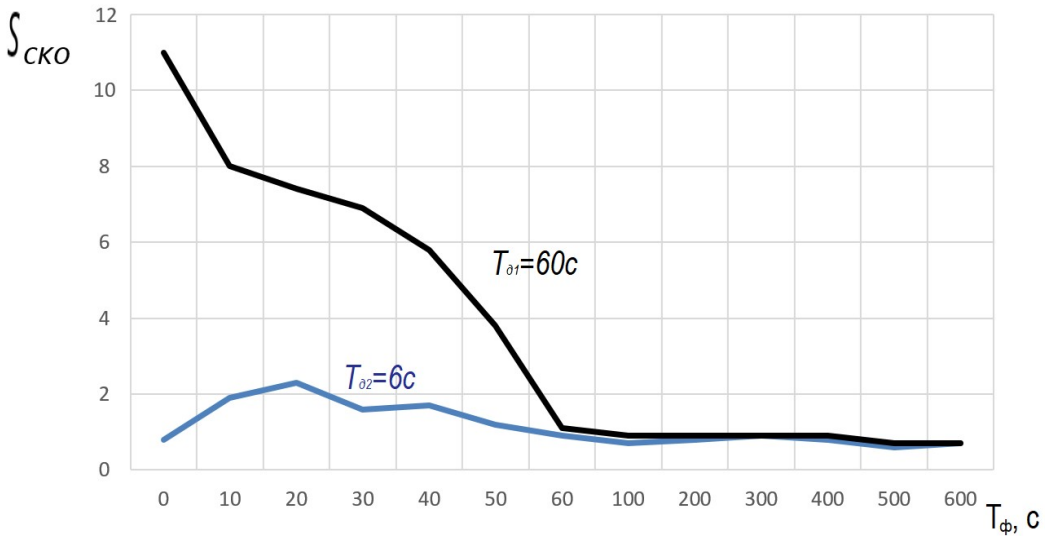


Рисунок 4.11 — Графики изменения СКО систем регулирования с разным периодом дискретизации в зависимости от динамичности возмущения

- при увеличении постоянной времени $T_ф$ в цепи случайного сигнала «белый шум», который действует как возмущение – интегральные значения среднеквадратического отклонения снижаются;
- система с меньшим периодом дискретизации всегда имеет более низкое среднеквадратическое отклонение;
- при $T_Ф \approx 100$ значения среднеквадратического отклонения для систем с различными периодами дискретизации становятся равными друг другу.

Таким образом, при резко изменяющейся внешней температуре система с меньшим периодом дискретизации будет иметь меньшее значение среднеквадратического отклонения.

4.4 Анализ влияния дискретизации по времени и амплитуде на работу системы обогрева теплицы

Составим модели, различающиеся дискретизацией по времени. Дискретизация по амплитуде в обоих моделях одинакова и соответствует действующему оборудованию (0,1°С). Приведем схему моделирования на рисунке 4.12.

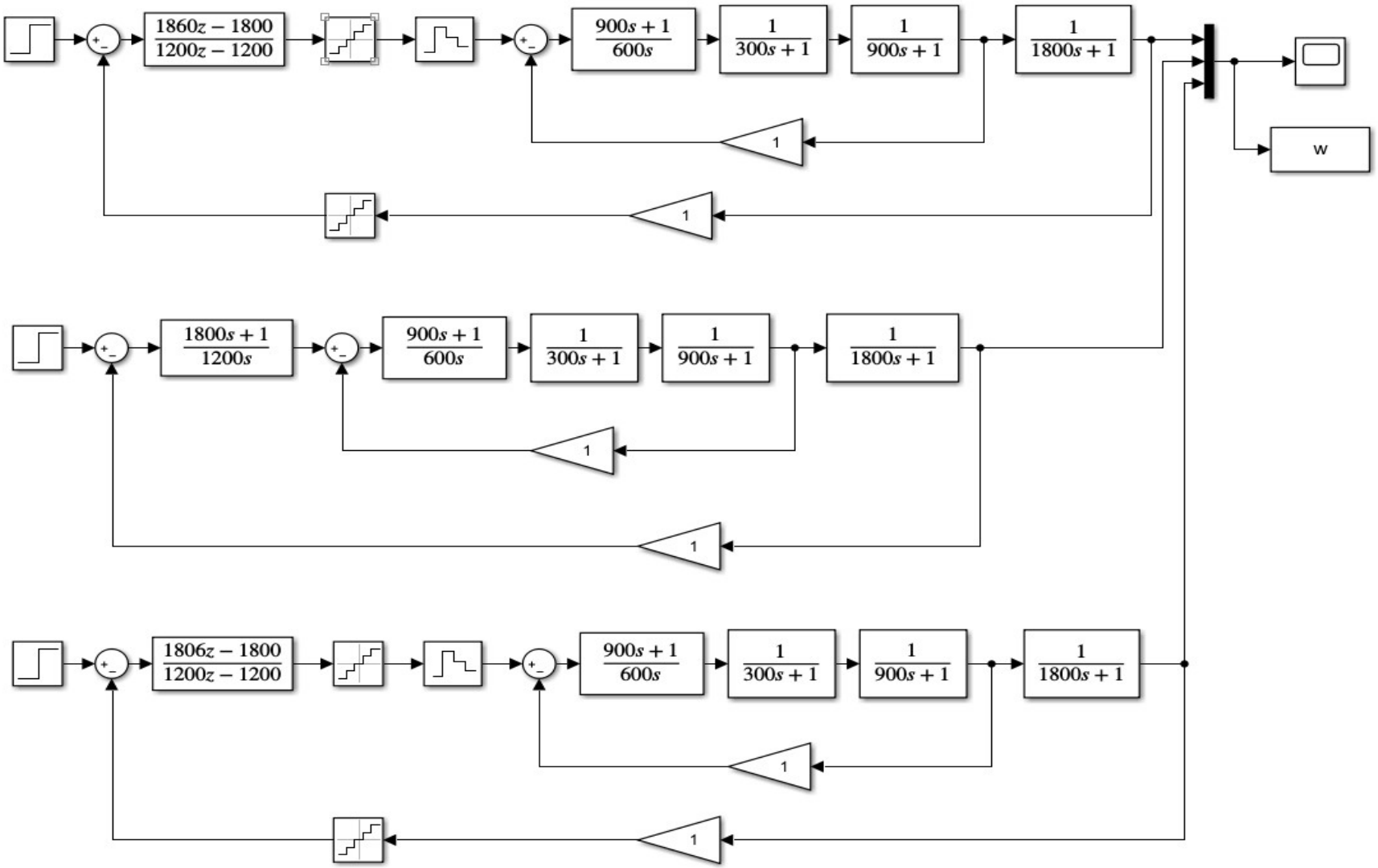


Рисунок 4.12 — Модель для анализа влияния дискретизации по времени и амплитуде на работу системы обогрева теплицы

Модель содержит три блока:

- первый – дискретная схема с интервалом дискретизации T=60c;
- второй - аналоговая схема;
- третий -дискретная схема с интервалом дискретизации T=6c.

Результаты моделирования (отработка задающих воздействий приведены на рисунке. 4.13)

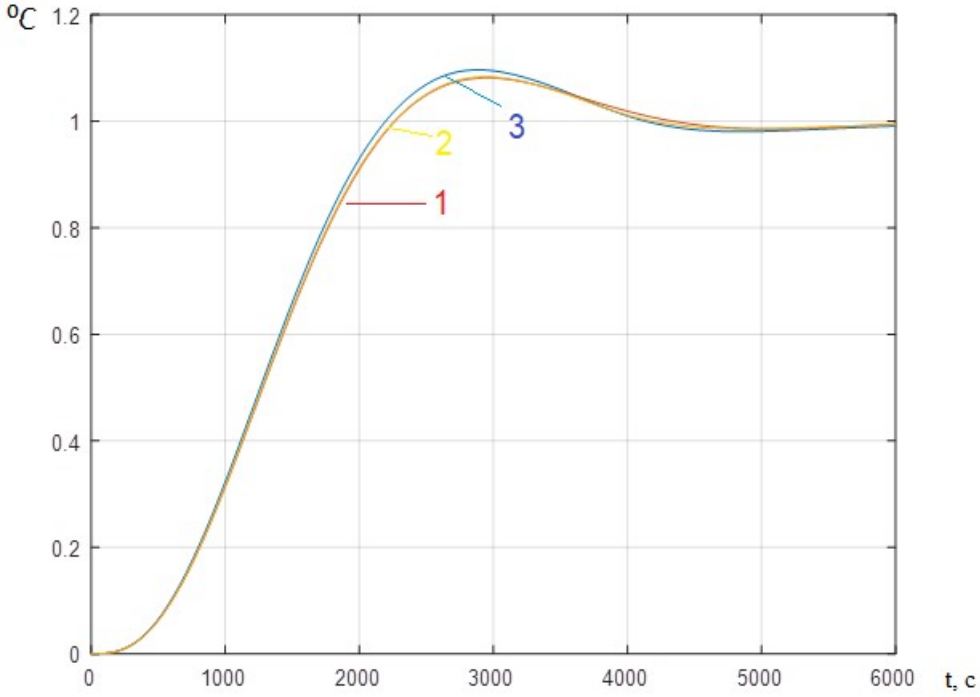


Рисунок 4.13 — Переходные процессы при моделировании систем, приведенных на рисунке 4.12

Анализ показывает, что существует расхождение (Δ) между аналоговыми и цифровыми вариантами схемы. На рисунке 4.14 приводится значение Δ для анализируемых схем.

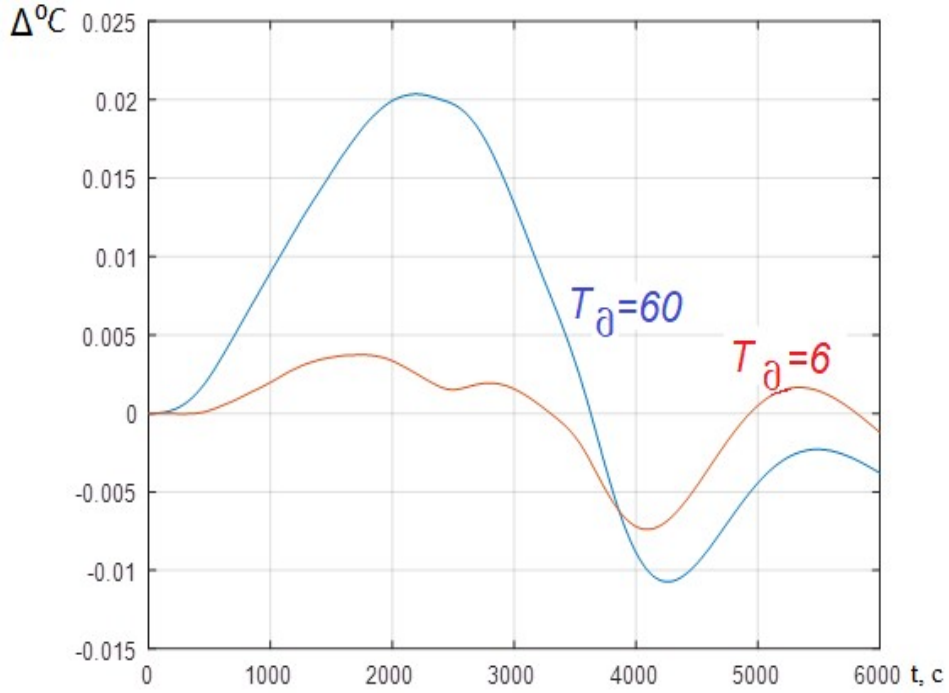
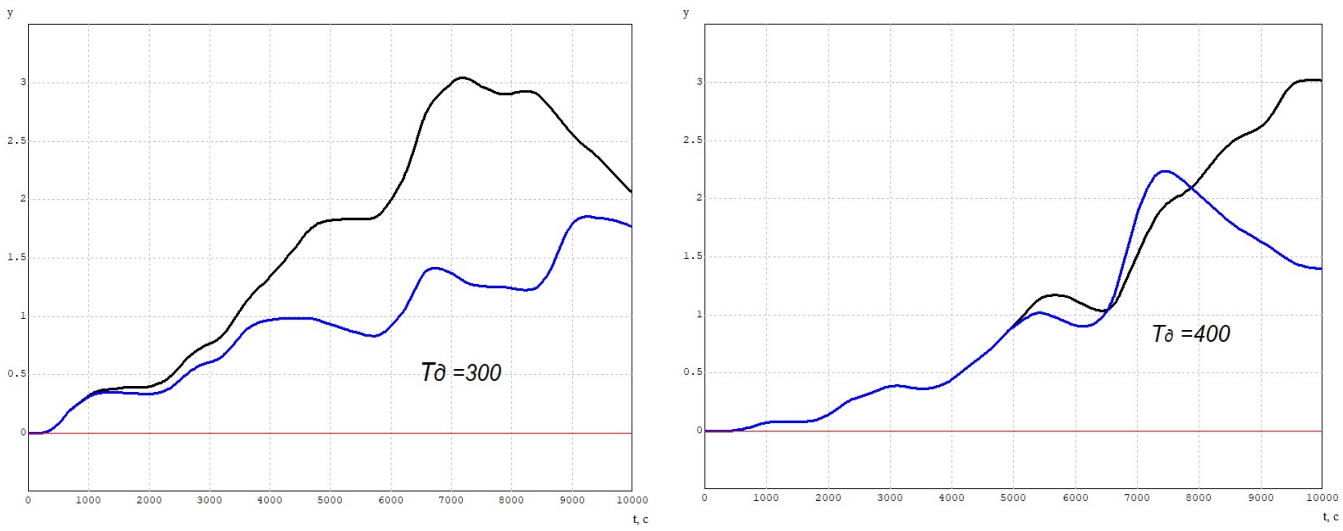


Рисунок 4.14 — Расхождение между аналоговыми и цифровыми вариантами схем при различной дискретности квантования по времени

Был проведен анализ работы цифровых моделей на возмущающие воздействия случайного характера. В процессе исследования изменялась постоянная времени в цепи сигнала возмущения. Таким образом имитировалась различная динамика, действующая на схему СТТ сигнала, графики приведены на рисунке 4.15.



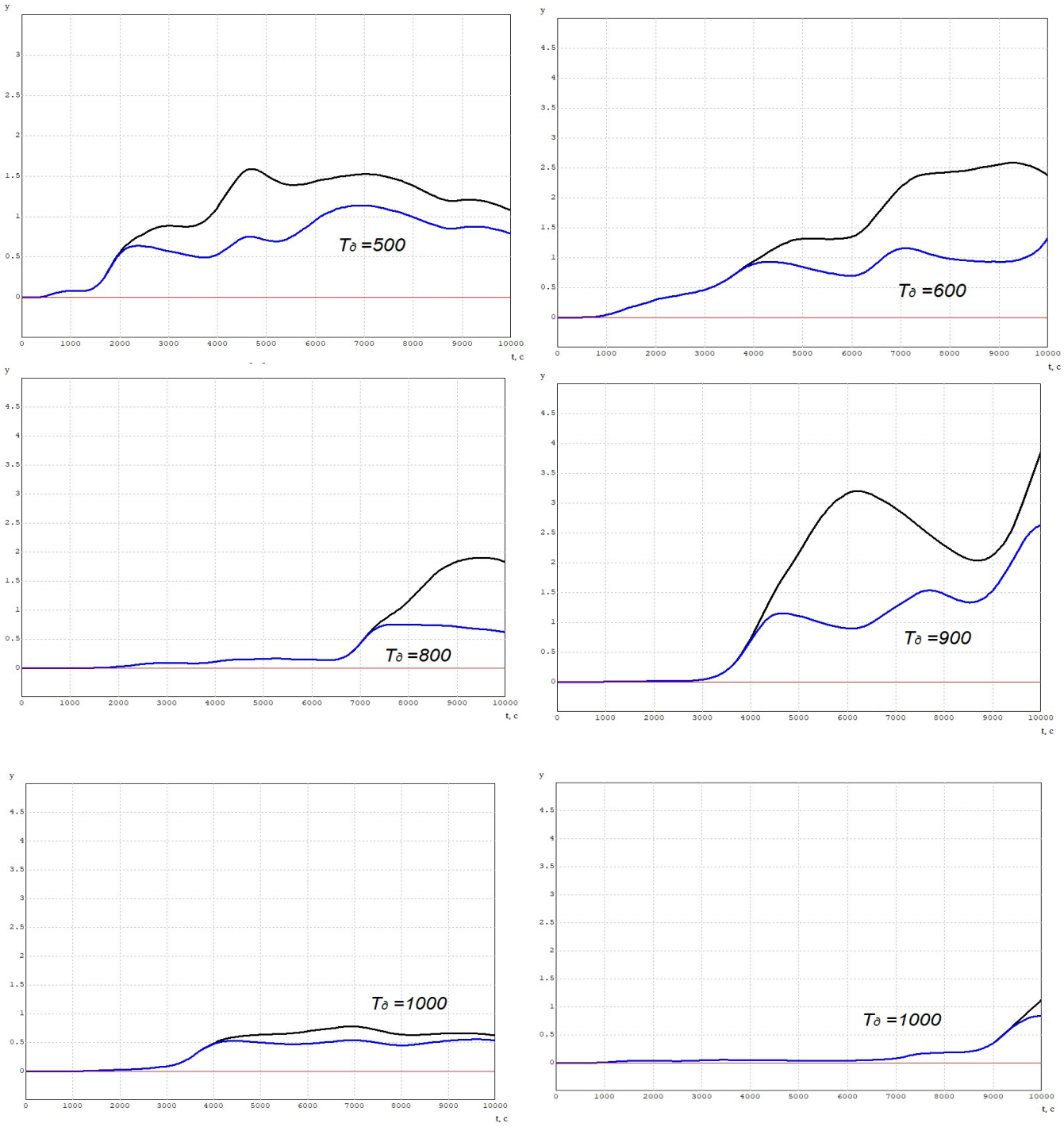


Рисунок 4.15 — Графики, характеризующие влияние дискретизации по времени и амплитуде на работу системы обогрева теплицы

На рисунке 4.16 приведены интегральные значения СКО для различных $T_ф$.

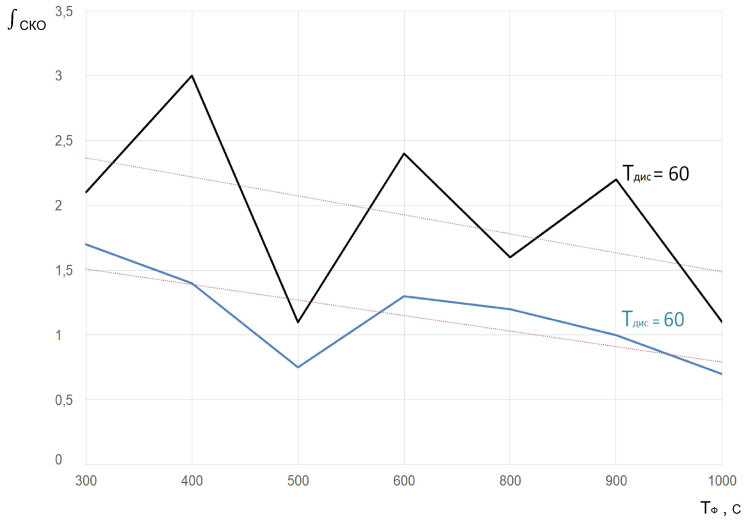


Рисунок 4.16 — интегральные значения СКО для различных $T_ф$

По сравнению с предыдущей схемой (дискретизация только по времени, рисунок 4.11), видно, что система с большим значением $T_{дис}$ имеет более высокое значение СКО. Однако в рассматриваемом случае изменение СКО не является монотонным – имеются провалы и подъемы, что может быть связано с дискретностью работы по амплитуде моделируемых систем.

4.5 Анализ работы схемы СТТ с различными схемами форсирования в реальных условиях

Приведем полученную модель для анализа влияния случайного возмущения на электротехнический комплекс тепличного комбината на рисунке 4.15

Рассмотрены два варианта структур с форсированием. Первая структура – сигнал управления форсированием – один для обоих контуров. Во второй структуре – сигнал форсирования системы в каждый контур подается отдельно. Во второй структуре сохраняется принцип подчиненного регулирования для цепей форсирования. В первой структуре сигнал форсирования подается на внутренний контур с упреждением. Эти различия отразились на работе в условиях случайных возмущений. При этом сохраняются общие тенденции снижения СКО при уменьшении динамичности возмущения. Управление с одним сигналом форсирования системы более эффективно с точки зрения устойчивости при воздействии случайного сигнала.

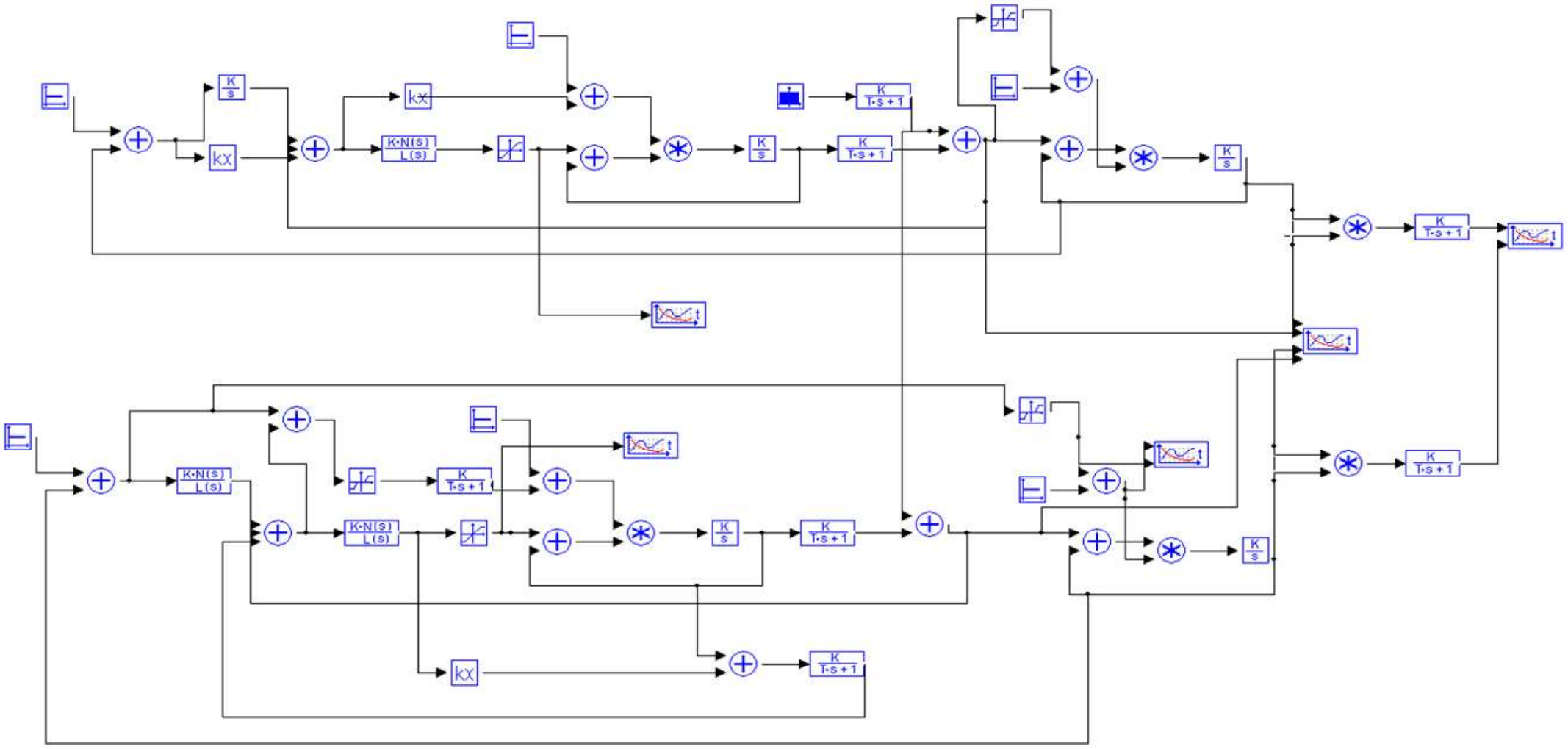


Рисунок 4.17 — Модель для анализа влияния случайного возмущения на электротехнический комплекс тепличного комбината

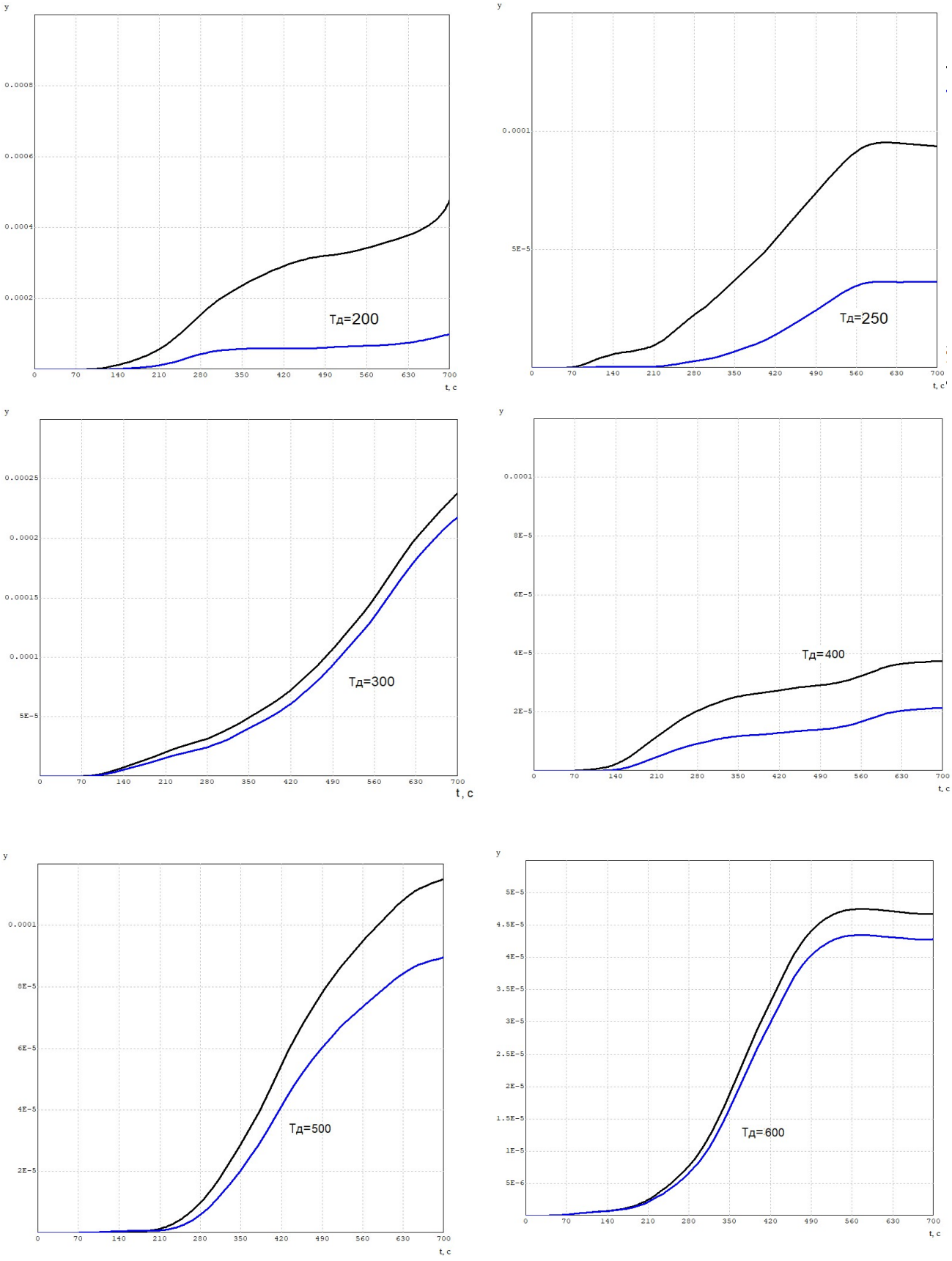


Рисунок 4.18 — Переходные процессы при действии случайных сигналов

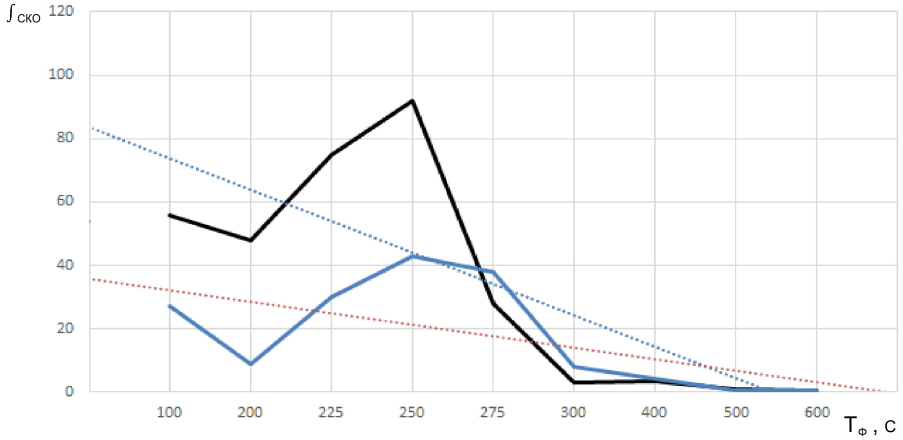


Рисунок 4.19 — Интегральные значения СКО для различных $T_ф$.

Анализ рис. 4.19 позволяет сделать следующие выводы:

- Схема с раздельным включением форсирования имеет большее значение СКО.
- Имеется явно выраженный для обоих схем подъем СКО в районе $T_ф$≈250. Это может быть связано с возрастанием колебательности при перестройке схемы из номинального режима в форсированный.

Выводы по четвертой главе

1. Проведены эксперименты на действующем оборудовании электротехнического комплекса тепличного комбината, которые показали существенное влияние на температуру теплицы внешних возмущений (наружной температуры и освещенности), имеющих случайный характер.

2. Исследованы различные модели электротехнического комплекса, разработанные в диссертации при действии случайных возмущений.

3. Предлагаемые технические решения (форсирование, комплексный контроль параметров) позволяют снизить влияние случайных возмущений на температуру теплицы.

4. Отмечается, что на величину среднеквадратичного отклонения влияют динамические показатели возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогу проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Использование предложенной методики синтеза системы управления температурой теплицы с форсированием режима позволило повысить быстродействие системы регулирования температуры на 32%.
2. Разработано электротехническое устройство, обеспечивающее комплексный контроль параметров микроклимата теплицы, дающее интегральную оценку и повышение быстродействия измерение контролируемых параметров в 10 раз.
3. Разработана система автоматического регулирования температуры теплицы с низкой чувствительностью к параметрическим возмущениям, которая обеспечивает сохранение динамических показателей при изменении параметров теплицы на 10%.
4. Комплексная апробация и внедрение предложенных решений позволили определить их энергоэффективность и снизить объемы потребления энергоресурсов – газа на 4%, электроэнергии на 2%. В денежном выражении по состоянию тарифов на 2019г. это составляет 268 тыс. руб. на один блок теплиц за год.
5. Разработана цифровая математическая модель ЭТК ТК, с возможностью учета периода дискретизации датчика контроля микроклимата, которая позволила оценить эффективность его применения в реальных условиях.

Рекомендации

1. Разработанное устройство комплексного измерения параметров микроклимата рекомендуется внедрять на тепличных комплексах защищенного грунта и для помещений большого объема.
2. Результаты исследования могут быть использованы предприятиями, занимающимися растениеводством в теплицах защищенного грунта.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на построение системы управления микроклимата с учетом большего числа влияющих возмущающих факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахманов В. Х. Информационно-измерительная система дистанционного контроля параметров микроклимата. / В. Х. Абдрахманов, К. В. Важдаев, Р.Б. Салихов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. - Т. 12. № 3. С. 91-99.
2. Абрамов С. Б. Разработка эффективной системы подогрева теплицы в условиях забайкальского края. / С. Б. Абрамов, И. Ф. Суворов // Сборник: INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW OF THE PROBLEMS AND PROSPECTS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION Collection of scientific articles LXIII International correspondence scientific and practical conference. 2019. С. 15-21.
3. Александровский Н.М. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами. / Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. // М. Энергия. 1973. С. 272.
4. Алексеев В.В. Энерготовар и рынок. //В сб. трудов «Энергосбережение в сельском хозяйстве». М. ВИЭСХ. 2000. С. 151.
5. Алексеенко С.В. Нетрадиционная энергетика и энергоресурсосбережение в России //Энергосбережение. 2008. N 1. С. 68-73.
6. Алешина Е.С. Динамические свойства теплиц как объектов управления // Математические модели, средства вычислительной и преобразовательной техники в электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства. Тр. ВСХИ30. М. 1990. С. 103-109.
7. Аминов Р.З. Теплоснабжение тепличных комбинатов на базе паротурбинных электростанций. / Р. З. Аминов, М. С. Доронин, В. В. Климов, А. М. Усов, Е.Ю. Курилко // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. 1991. № 2. С. 78 – 84.
8. Андрижиевский А.А. Энергосбережение и энергетический менеджмент: / А.А. Андрижиевский, В.И. Володин // М. Высшая школа. 2005. С. 296.
9. Андрющенко А.И. Система показателей для оценки топливной эффективности эксплуатационных режимов ТЭЦ / А.И. Андрющенко, Б.А. Семенов // Промышленная энергетика. 2005. №12. С. 2-7.
10. Арутюнян А.А. Основы энергосбережения // М. Энергосервис 2007. С. 600.
11. Астапова Ю.О. Когенеративные установки / Ю.О. Астапова, К.С. Шульга, А.А. Бубенчиков // М. Потенциал современной науки. 2014. №8

С. 6-13.

12. Астапов Ю.М., Медведев В.С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления // М. Наука 1982. С 304.
13. Астахов Н.Л. Коэффициент использования теплоты топлива // Энергетик. 2004. №3. С. 29-30.
14. Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В.Н. Афанасьев, Т.В. Лебедева // Оренбург Учебное пособие для вузов. ГОУ ОГУ. 2007. С. 245.
15. Барбасова Т.А. Повышение энергетической эффективности промышленных предприятий / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Материалы 7-й международной научно-практической конференции. 2011. Т. 30. Технологии. Здания и архитектура. София. БялГРАД-БГ ООД. С. 61-62.
16. Барков В.М. Когенераторные технологии: возможности и перспективы / http://www.combienergy.ru/stat/876-Kogeneratornye-tehnologii-vozmojnosti-i-perspektivy (Дата обр. 26.04.2020).
17. Безруких П.П. Мифы и реальность энергосбережения. // М. ГУ Институт энергетической стратегии. Энергетическая политика. 2009. №1. С. 15-19.
18. Белоусов О.А. Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. / Белоусов О.А., Зырянов Ю. Т., Петров А. В. // Конструирование интеллектуальных микропроцессорных систем энергосберегающего управления динамическими объектами. 2013. №3 (51) С. 15-21.
19. Белоусов О.А. Вопросы энергосберегающего управления тепловыми аппаратами с электронагревом / О. А. Белоусов, Ю. Т. Зырянов, Р. Ю. Курносов // Энергобезопасность и Энергосбережение. №1 2015. С. 36-42.
20. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления: [линейные системы, нелинейные системы, импульсные системы, цифровые и адаптивные системы, критерии устойчивости, случайные процессы] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - СПб., 2004. С. 747.
21. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы // М. Наука, 1976. С.576.
22. Биленко В.А. Многосвязное регулирование энергоблоков на базе современных программно-технических комплексов // Теплоэнергетика. 2001. №10. С. 13-18.
23. Боос Г.О. Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом. / А.А. Филимонова, Г.О. Босс // Инновации в науке. 2014. № 38 С. 39-41.

24. Борисов Б.П. Нормирование и экономия электрической энергии в электротехнологических установках. / Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.И. Гардин. // ИЭД АН УССР Препринт. Киев 1987. С. 528.
25. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Н.М. Недилько // М. Агропромиздат 1986. С. 386.
26. Боровиков М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики // Саратов. Саратовский университет, 1980. С. 390.
27. Бурман А.П. Основы современной энергетики / А. П. Бурман, П.А.Бутырин, П.А. Виссарионов // М. МЭИ, 2003. С. 452.
28. Бурман, А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем // А.П. Бурман, Ю.К. Розанов,
Ю.Г. Шакарян. М. Издат. дом МЭИ, 2012. С. 335.
29. Варганов Д.Е. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации. / А.В. Варганова, И.И. Баранкова // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 29-34.
30. Водянников В.Т. Экономическая оценка проектных решений в энергетике АПК // М. Колос 2008. С. 263.
31. Волынская Н. А. Проблемы и методы государственного регулирования энергообеспечения экономики России / Н. А. Волынская, В. Б. Любашевский // Сиб. отделение Рос. акад. наук, Новосибирск. 2003. С. 163.
32. Гавриченко А.И. Динамика температуры воздуха в блочной теплице при обогреве / А.И. Гавриченко, А.М. Клочков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1975. №4. С. 12-15.
33. Гендугов В.М. О скоростях звука в химически равновесной смеси газов. Москва: Вестн. МГУ. Сер. 1. -2004. № 4. С. 50-53
34. Головкин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии // М. Энергоатомиздат. 1984. С. 359.
35. Гордеев А.В. Сравнительный анализ газопоршневых и газотурбинных установок / А.В. Гордеев, В.А. Михайлов // Сборник: Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации сборник статей VII Международной научно-практической конференции. 2017. С 155-159.

36. ГОСТ 31295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993) Межгосударственный стандарт Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1. Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Электронный ресурс: http://internet-law.ru/gosts/gost/2309 / Дата обр. 27.05.2020.
37. ГОСТ 31295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993) Межгосударственный стандарт. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation. Электронный ресурс: https://znaytovar.ru/gost/2/GOST_3129522005_SHum_Zatuxanie.html / Дата обр. 27.05.2020.
38. ГОСТ IEC 60034-2-2-2014 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ Часть 2-2 Специальные методы определения отдельных потерь больших машин по испытаниям. Rotating electrical machines. Part 2-2. Specific methods for determining separate losses of large machines from tests. Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/1200120651 / Дата обр. 27.05.2020.
39. ГОСТ Р 51541-99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения // https://meganorm.ru/Index2/1/4294818/4294818587.htm / / Дата обр. 27.05.2020.
40. ГОСТ Р 54195-2010. Ресурсосбережение. Промышленное производство. Руководство по определению показателей (индикаторов) энергоэффективности // https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293801/4293801444.htm / Дата обр. 27.05.2020.
41. Гнездова О.Е. Энергообеспечение тепличных хозяйств с генерацией электрической и тепловой энергии и выработкой CO_2. / Гнездова О.Е., Чугункова Е.С. // М. Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019 2(3). С. 141-151.
42. Грудинин В. С. Адаптивное итерационное управление температурой в теплице / В. С. Грудинин, В. С. Хорошавин, А. В. Зотов, С. В. Грудинин // Инженерные технологии и системы. Т. 29. № 3. 2019. С. 383-395.
43. Грыжов В. К. Имитационная модель программного управления температурным режимом в теплицах блочного типа / В. К. Грыжов, В. Г. Корольков, Е. В. Грыжов // Теория и практика современной науки. 2016. №

12-1 (18). С. 317-328.

44. Гунин В.М. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления предприятия на основе математической обработки статистической отчетности / В. М. Гунин, Л. А. Копцев, Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика 2000. №2. С. 2-5.
45. Гуртовцев А. Л. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика // Новости электротехники № 5. 2008. С. 108-114.
46. Густав Олссон. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав Олссон, Джангуидо Пиани СПб.: Невский Диалект 2001. С. 557.
47. Дайнеко В. А. Применение электрической энергии в сельском хозяйстве / В. А. Дайнеко, А. В. Крутов // Минск Ураджай 2001. С. 300.
48. Данилова С.Ю. Анализ научных подходов по управлению производственными системами на предприятиях / Данилова С.Ю., Искосков М.О., Руденко А.А.// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.16 №1/7, 2014г. С.1846-1848.
49. Долгих П. Н. Анализ технологий и оборудования для управления системой микроклимата в теплицах на базе утилизированной тепловой энергии от систем облучения / П. Н. Долгих, Н. В. Кулаков, М. В. Самойлов // Вестник НГИЭИ. Технические науки. 2016. С. 80-94.
50. Долгих П. П. Энергосберегающие облучательные установки для сооружений защищенного грунта / П. П. Долгих, В.Р. Завей-Борода, Я. А. Кунгс, В. Д. Никитин, Н. В. Цугленок // Красноярск ГАУ. 2006. С. 108.
51. Доманов В.И. Анализ основных узлов энергосистемы тепличного комбината и способов снижения энергозатрат / Доманов В.И., Певчева Е.В. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. №3 С.3-10.
52. Доманов В.И. Комплексный контроль параметров микроклимата теплицы / Доманов В.И., Певчева Е.В. // Промышленные АСУ и контроллеры. Приборы и системы для автоматизации промышленных предприятий. 2019. №4 С.3-8.
53. Доманов В.И. Синтез инерционной электромеханической системы, инвариантной к изменениям параметров объекта управления / Доманов В.И., Доманов А.В., Певчева Е.В. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. №5
54. Доманов В.И. Система управления температурой теплицы / Доманов В.И., Певчева Е.В. // Промышленные АСУ и контроллеры. Приборы и системы для автоматизации промышленных предприятий. 2019. №8

С.3-8.

55. Доманов В.И. Synthesisofa Greenhouse temperature control system. / Доманов В.И., Певчева Е.В., Доманов А.В.// Easteuropean scientific journal (Wschodnio europejskie Czasopismo Naukowe) электронная версия журнала: 16.10.2019. Issn - 2468-5380 Свидетельство СМИ (Польша): Sygn. Akt VII Ns Rej Pr961/15.
56. Доманов В.И. Определение потребности энергоресурсов тепличным комбинатом / Доманов В.И., Певчева Е.В. // Мехатроника, автоматика и робототехника. Материалы международной научно-практической конференции. г. Новокузнецк- НИЦ МС 2018г- №2. С. 159 – 160.
57. Доманов В.И. Система автоматического регулирования параметров микроклимата в теплице закрытого грунта. / Доманов В.И., Певчева Е.В. // Мехатроника, автоматика и робототехника. Материалы международной научно-практической конференции. г. Новокузнецк- НИЦ МС 2019г- №4. С. 20 – 22.
58. Доронин М. С. Технико-экономическая эффективность снабжения теплично - овощных комбинатов сбросной и низко потенциальной теплотой паротурбинных электростанций // Саратовский политехнический институт. Саратов: 1988. С. 9.
59. Дорф Р. Современные системы управления / Дорф Р., Бишоп Р. // М. Лаборатория базовых знаний. 2002. С. 592.
60. Дудников Е.Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов // М. Л. Госэнергоиздат. 1956. С 264.
61. Егупов Н. Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под. ред. Н.Д. Егупова // М. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. С. 744.
62. Елисеев В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу / В.А. Елисеева и А.В. Шинянский // М. Энергоатомиздат 1983. С. 616.
63. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко, О. Д. Савченко // М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003. С. 278.
64. Иванова И.Ю. Симоненко А.Н. Эффективные направления развития малой энергетики на востоке России. / И. Ю. Иванова, Т. Ф. Тугузова // Энергетическая политика. М. ГУ Институт энергетической стратегии. 2009. №2. С. 57-59.
65. Иванов Г. Я. Нормирование светотехнических установок для светокуль-

туры растений // Электрификация и автоматизация технологических процессов в сельском хозяйстве Сибири: Сб. науч. тр./СО ВАСХНИЛ, СибИМЭ. - Новосибирск 1990. - С. 82-95.

66. Изаков. Ф.Я. Энергосберегающие системы автоматического управления микроклиматом / Изаков. Ф.Я., Попова С.А. // Челябинск ЧГАУ 1988. С. 52.
67. Изаков Ф.Я. Способ автоматического управления температурно - световым режимом в теплице и система для его реализации. / Ф. Я. Изаков, С. А. Попова, М. А. Супрун, Д. Н. Антонов, И. Н. Антонов // Патент на изобретение RU 2405308 C1, 10.12.2010. Заявка № 2009121213/12 от 03.06.2009.
68. Изаков Ф.Я. Математическая модель динамики трубных систем обогрева теплиц / Ф. Я. Изаков, А. А. Рысс, Л. И. Гурович // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1986. - №2. - С. 33 – 35.
69. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода/ уч.пособие для студентов Вузов // Н.Ф.Ильинский. М. МЭИ, 2000 С. 164.
70. Имаев Д.Х. Анализ и синтез систем управления. Теория. Методы. / Д. Х. Имаев, З. Ковальски, Н. Н. Кузьмин // Гданьск, С.-Петербург, Сургут, Томск, 1997 С. 172.
71. Казаков В.Г. Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, О.С. Смирнова // Промышленная энергетика. 2010. – № 1. С. 38–41.
72. Калинина В. Н. Введение в многомерный статистический анализ: Учебное пособие / В. Н Калинина, В. И. Соловьев // ГУУ. М. 2003. С. 66.
73. Канев Н.Г. Акустический метод измерения температуры и влажности воздуха в помещениях. Акустический журнал. Издательство: Российская академия наук (Москва) ISSN: 0320-7919 2014. Т. 60. № 3. С. 353-355.
74. Капанский А.А. Особенности сбора и обработки данных для построения вероятностно-статистических моделей энергопотребления / А.А. Капанский, Е.Л. Шенец // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 1 (14), Т. 2. С. 12-22.
75. Каплин А.А. Повышение эффективности газопоршневых установок. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Ж.А. Шаповал. 2017 С. 90-92.

76. Карпов В. Н. Показатели энергетической эффективности действующих агроинженерных (технических) систем. / В. Н. Карпов, З. Ш. Юлдашев // СПб. СПбГАУ, 2014. С. 160.
77. Клюев А.С. Состояние и проблемы практического синтеза и реализации автоматических систем управления технологическими процессами // Сб. докл. Всерос. научн. конф. Управление и информационные технологии С.Петербург ЛЭТИ, Т.2, 2003. С. 274-278.
78. Ключев В.И. Теория электропривода/ Уч.для вузов // М.: Энергоатомиздат, 2001. С. 704.
79. Кондратьева Н. П. Разработка системы автоматического управления электрооборудованием для реализации энергосберегающих электротехнологий / И. Р. Владыкин, И. А. Баранова, С. И. Юран, А. И. Батурин, Р. Г. Большин, М. Г. Краснолуцкая // Вестник НГИЭИ. 2018. № 6 (85). С. 36-49.
80. Константинов В.Н. Многоканальная система для мониторинга и анализа микроклимата в теплицах. Описание измерительной системы. // (Болгария). Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2004. №2. С. 315.
81. Корытин А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и уста-
новок / М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 432.
82. Кочкин В.И. Управляемая передача мощности // Новости электротехники, 2007, № 4 С. 2-6.
83. Кочкина А.В. Методика оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения / А. В. Кочкина, А. В. Малафеев, Д. Е. Варганов, Н. А. Курилова, И. А. Дубина // Электротехнические системы и комплексы. 2014.№ 3 (24). С. 49-53.
84. Кульков А.В. Математическая модель зависимости значения распространения скорости звука в воздухе от его физических характеристик. / А. В. Кульков А. И. Вострецов // Сборник трудов конференции «Математика и компьютерные науки», ФГБОУ ВО СмолГУ, г. "Мир науки" Нефтекамск 2017г. С. 21-25.
85. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления // Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. С. 448.
86. Куприянов А. // Энергетика тепличного хозяйства – 2016.- №2 эл. ресурс https://www.agbz.ru/articles/energetika-teplichnogo-hozyaystva/ Дата обр.

26.05.2020.

87. Лазарев Г.Б. Управление эффективностью механизмов собственных нужд ТЭС // Энергия единой сети. 2012. № 5. С. 58-67.
88. Левин А. В. Автономные системы электроснабжения/ А. В. Левин, Н. Н. Лаптев // Вестник Кузбасского государственного технического университета 2015. Электротехника, электронная техника, информационные технологии С. 87-93.
89. Леончик Б. И. Научные основы энергосбережения. / Леончик Б. И., Данилов О. Л. Учебное пособие. М. МГУГ1П. 2000. С. 278.
90. Макоклюев Б. И. Влияние метеофакторов на режимы потребления электроэнергии энергосистем / Б. И. Макоклюев, А.В. Антонов, А.С. Полижаев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Иркутск. 2015 №65. С. 405 – 414.
91. Мелексетов А. Н. Повышение энерго-эффективности выращивания овощей и зеленых культур в сооружениях защищенного грунта путем совершенствования системы управления параметрами микроклимата. / С. А. Будагова, О. А. Липа // Ресурсосберегающее энергетическое оборудование и машины для производства сельскохозяйственной продукции Материалы международной заочной научно-практической конференции. 2018. С. 53-56.
92. Минаев И. Г. Энергосберегающая система управления источниками оптического облучения в теплицах / И. Г. Минаев, А. Г. Молчанов, В. В. Самойленко // ВНИИОиК Ставрополь № 1-1. Том 3. 2012. С. 40–43.
93. Мита Ц. Введение в цифровое управление / Мита Ц., Хара С., Кондо Р. // Москва, "Мир", 1994г. С 256.
94. Мурзакулов Н. А. К вопросу об иерархической системе управления урожайностью теплицы // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2019. № 1 (49). С. 173-179.
95. Муромцев Д. Ю. Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами: Монография. // ISBN 8-86609-048-1. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2005. С. 202.
96. Муромцев Д.Ю. Особенности реализации интеллектуальных систем энергосберегающего управления энергоемкими объектами / Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков, В. Н. Шамкин, И. В. Тюрин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Научтехлитиздат М. №12. 2019. С. 43-49.

97. Мартыненко И. И. Методика электрического моделирования температурных полей в открытом и защищенном грунте / И. И. Мартыненко, Г. Я. Иванов //Комплексная механизация и электрификация с-х. пр-ва: Труды Днепропетровского СХИ. Т. XXXШ 1976. С. 38-43.
98. Николюкин М. С. Автоматизированная система мониторинга и управления тепличным хозяйством / М. С. Николюкин, А. А. Сиухин, С. А. Васильев // Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья материалы I Всероссийской конференции с международным участием. М. 2019. С. 531-536.
99. Павлов В. З. Экспериментальная оценка инфильтрации воздуха в теплицах // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1976. № 7. С. 18.
100. Певчева Е.В. Энергоэффективное управление электротехническим комплексом тепличного комбината // Энергетик. г. Москва. 2020. №8 С.41-44.
101. Певчева Е.В. Характеристика электроприемников тепличного комбината / Певчева Е.В., Доманов В.И. //Материалы докладов II Поволжская научно-практическая конференция «Казанский государственный энергетический университет» Казань 2016г. Том III, С. 202-204.
102. Певчева Е.В. Повышение эффективности энергетического оборудования теплиц закрытого грунта. / Певчева Е.В., Доманов В.И.// Материалы докладов 12 Между-народная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» г. Иваново 2017г.Т.1 С.119-121.
103. Певчева Е.В. Анализ сезонности потребления энергоресурсов тепличным комбинатом. / Певчева Е.В., Доманов В.И. // Актуальные проблемы энергетики АПК. «Саратовский Государственный Аграрный Университет Имени Н.И. Вавилова» Материалы IX международной научно-практической конференции. г. Саратов 2018 г. С.322-324.
104. Певчева Е.В. Пат. №2704636 Российская Федерация. Устройство контроля параметров микроклимата в теплице защищенного грунта. [Текст] Е.В. Певчева; заявитель и патентообладатель Е.В. Певчева. Опубл. 30.10.2019г, Бюл. №31.
105. Полухин А. А. Экономические аспекты оценки эффективности энергопотребления в сельском хозяйстве / А. А. Полухин, С. А. Абдулкеримов

// Экономика сельского хозяйства России. 2014. №7. С. 46-52.

106. Поляков К.Ю. Основы теории цифровых систем управления // СПбГМТУ. СПб. 2006. С. 161.
107. Прудцких Н. В. Имитационное моделирование системы автоматизированного управления микроклиматом модульных вертикальных теплиц / Н. В. Прудцких, В. Н. Гудинов // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии. Материалы IX Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых. 2019. С. 36-40.
108. Пустыгин А.Н. Повышение эффективности энергосберегающей системы автоматического управления температурным режимом в теплице путем улучшения характеристик чувствительности и точности регулирования. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Челябинск, 2004 С. 22.
109. Правила устройства электроустановок. М. Энергоатомиздат. 2002. -. 280
110. Приказ РФ от 25 июня 2007 г. N 342 «О концепции развития аграрной науки и научного обеспечения апк россии до 2025 года».
111. Пьявченко Т. А. Автоматизированные информационно-управляющие системы с применением SCADA-системы Trace Mode: Учебное пособие. – СПб. Лань. 2015. С. 336.
112. Ракутько С.А. Энергосберегающая система управления энерготехнологическими процессами / С.А.Ракутько // Сб.тр. VI межд. науч.-практич. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». / Под ред. А.П.Кудинова, Г.Г.Матвиенко. СПб. 2008. С. 39-41
113. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009г. №1715р «Об энергетической стратегии России на период до 2030года». эл. ресурс https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/96681/ дата посещ. 25.05.2020.
114. Рогалев Н.Д. Экономика энергетики: учеб. пособие для вузов / Н. Д. Рогалев, А. Г. Зубкова, И. В. Мастерова // М. Изд. дом МЭИ, 2008. С. 300.
115. Рогалев Н.Д. Проблемы и пути совершенствования энергетических систем и комплексов / Н. Д. Рогалев, В. В. Молодюк // Сб. научных трудов. Саратов. Саратовский университет. 2018. №9. С. 3-11.
116. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М. Энергия, 1973. С. 438.
117. Рушкин А.Н. Система управления температурой воздуха в теплице / А.

Н. Рушкин, Н. В. Мороз // Системы контроля окружающей среды. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 24.

118. Сапега А. Газовые микротурбины: модели и эффективность // Энергетика и ТЭК. 2013. № 9. С. 16–18.
119. Семёнов В.С., Золотов В.П. Преимущества локального энергообеспечения / В. С. Семёнов, В. П. Золотов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». №2 (34) 2012. С. 225-228.
120. Скобелев Д. О. Энергетический менеджмент: прочтение 2020. Руководство по управлению энергопотреблением для промышленных предприятий / Д.О.Скобелев, М. В. Степанова // М. Колорит 2020. С. 92.
121. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. // М. Машиностроение. 1985. С. 536.
122. Соснина Е.Н. Анализ характеристик возобновляемых источников энергии и факторов, влияющих на себестоимость выработки электроэнергии / Е. Н. Соснина, Е. Б. Солнцев, И. А. Липужин, под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI. 2018. С. 114-120.
123. Степочкин Е. А. Формирование энергетической стратегии промышленного предприятия // Перспективы науки. 2014. № 6 (57). С. 35-38.
124. Суворов М.Н. Автономные источники электроснабжения с использованием газопоршневых установок в сельском хозяйстве: состояние и дальнейшее развитие // Инновации и инвестиции. 2015 №4. С. 150-152.
125. Толстой, А. Ф. Повышение эффективности тепловых процессов в системах защищенного грунта. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М. 2001 С. 22.
126. Трофимова Т. И. Курс физики: учебник. Пособие для вузов. // М. Академия, 2006. С. 560.
127. Тюрин И. В. Синтез микропроцессорных систем оптимального управления сложными тепловыми объектами // Промышленные АСУ и контроллеры М. Научтехлитиздат №10 2008 С. 18-21.
128. Удинцев Д. Н. Системные вопросы применения распределенной генерации: практикум "Расчет основных параметров автономной энергосистемы и системы с распределенной генерацией" / Д. Н. Удинцев, С. В. Шульженко; - М. МЭИ, 2019. С. 49.

129. Федеральный закон РФ «Об энергосбережении» 23 ноября 2009 года N 261-ФЗ эл. ресурс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ дата обр. 26.05.2020.
130. Федорова И. А. Повышение тепла путем управления энергоносителя // International Journal of Humanities and Natural Sciences, № 10-1 (37). 2019 С. 176-179.
131. Хорольский В. Я. Математическое моделирование задач оптимизации автоматизированного управления деятельностью энергетических служб сельскохозяйственных предприятий / В. Я. Хорольский, В. Г. Жданов, Е. А. Логачева // Ставрополь ООО «Ветеран» 2014. С. 116.
132. Цанев С. В. Газотурбинные энергетические установки / Цанев С. В., Буров В. Д., Земцов А. С. // М. МЭИ, 2011. С. 428.
133. Чемоданов Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования / Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С. // М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. С. 552.
134. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы // М./: Энергоатомиздат. 1987. С. 256.
135. Шаталов И. К. Оценка эффективности применения инновационных технологий для энергообеспечения тепличного комплекса / Шаталов И. К., Шаталова И. И. // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2017 №18-2 С. 275-285.
136. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715"р. // Электронный ресурс. Режим доступа: http:// www.energystrategy.ru/projects/es"2030.htm / дата обращения 26.04.2020.
137. Юданова А.В. Интеллектуальная система контроля влажности и температуры воздуха в теплице. Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2011. № 2. с. 319.
138. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф // М. Наука, 1968. С. 914.
139. Яковлев С. М. Способ управления формированием урожая / С.М. Яковлев, И. И. Каримов // https://patentimages.storage.googleapis.com/52/df/7a/b1d243e7926048/RU2552033C1.pdf Дата обр. 27.05.2020
140. Artekoni A. Domestic demand-side management: role of heat pumps and

thermal energy storage systems / A. Artekoni, N. Hewitt, F. Polonara // Applied thermal engineering. 2013. № 51(12). P. 155–165.

141. Chandann V. Modeling and optimization of a combined cooling, heating and power plant system / V. Chandann, A. T. Do, B. Jin, F. Jabbari // American Control Conference. St. Louis, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2012. P. 3069–3074.
142. Dagum E.B. Modeling, Forecasting and Seasonally Adjusting Economic Time Series with the X-11 ARIMA Method / E. B. Dagum // The Statistician / 1988. P. 203–216.
143. Davidson G.A. Sound propagation in fogs // J. Atmos. Sci. 1975. V. 32 №11. P. 2201-2205.
144. Facci A.L. Analysis of the influence of thermal energy storage on the optimal management of a trigeneration plant / A.L. Facci, L. Andreassi, S. Ubertini // Energy procedia. 2014. № 45. P. 1295–1304.
145. Feuer A. Adaptive control of single-input, single-output linear systems / Feuer A., Morse A. // IEEE Trans. on Automat. Control.1978. Vol.23.№4. – P. 557-569.
146. Hendriks L. Neue Temperaturregelstrategien. 1. Pflanzenbauliche Grundlagen // KTBL, Darmstadt (KTBL-Arbeitsblatt Gartenbau 676). 1994. P. 27–32.
147. Lofqvist T., K. Sokas, J. Delsing. Speed of sound measurements in humid air using an ultrasonic flow meter // Proceedings of XVII IMEKO World Congress. June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia, 2003.
148. Mahmoud M. S. Control and optimization of distributed generation systems / M. S. Mahmoud, F. M. AL-Sunni // Cham: Springer. 2015. P. 578.
149. Meyer J. AEL: Arbeitsgemeinschaft fur Elektrizitatsanwendung in der Landwirtschaft // Pflanzenbelichtung №3 1994. P. 84.
150. Narendra K.S. Stable adaptive controller design. Part II: proof of stability / Narendra K.S., Lin Y.-H., Valavani L.S. // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1980. Vol.25.№3. P. 440-448.
151. Nicolosi G. An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse / G. Nicolosi, R. Volpe, A. & Messineo. // Energies, 2017 10(5). P. 722.
152. Rodriguez C. Robust design methodology for simultaneous feedforward and feedback tuning. / J. E. Normey - Rico; J. L. Guzman; M. Berenguel IET Control Theory Appl. 2016 № 10 P. 84–94.
153. Sallai J. Acoustic Ranging in Resource-Constrained Sensor Networks. Insti-

tute for Software Integrated Systems. / J. Sallai, G. Balogh, M. Maroti, A. Ledeczi, B. Kusy. // Vanderbilt University, 2015. Terrace Place, Nashville, TN 37203, USA. Электронный ресурс: https://translate.google.com/translate?hl=ru&sl=en&u=https://www.isis.vanderbilt.edu/node/3561&prev=search&pto=aue Дата обр. 27.05.2020.

154. Shamshiri, R. R. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review / R. R. Shamshiri, J. W. Jones, K. R. Thorp, D. Ahmad, H. C. Man, S. & Taheri // International Agrophysics. 2018 №32(2) P. 287-302.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Акт об использовании результатов диссертационной работы Певчевой Е.В. в АО «Тепличное».

Утверждаю:
Технический директор
АО «Тепличное»
Смутницкий С.И.

Акт 08.10.2020 г.

Об использовании результатов диссертационной работы
Певчевой Елены Викторовны
«Улучшение динамических характеристик
электротехнического комплекса тепличного комбината»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер Журавлев А.В. и начальник службы ТС Рухлин М.А., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Певчевой Е.В. использованы для повышения эффективности электротехнического комплекса АО «Тепличное».

Проведенные доработки системы управления позволили улучшить качество микроклимата в теплице, уменьшить колебания параметров внутреннего микроклимата при изменениях наружной климатической обстановки. Проведенные мероприятия позволили уменьшить энергопотребление и повысить качество выходной продукции.

Начальник службы ТС Рухлин М.А.

Главный инженер Журавлев А.В.