

Казахский национальный университет им. аль-Фараби

УДК 631.171 (043.3)

на правах рукописи

**УМАРОВ АМАНТУР АМАНГЕЛЬДЫЕВИЧ**

**Разработка ситуационной интеллектуальной системы  
управления минитеплицей на базе IoT устройств**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:  
д.т.н., доцент Бельгибаев Б.А.  
д.т.н., профессор Гриф М.Г.

Республика Казахстан  
Алматы, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	6
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ПРОБЛЕМА ИМПОРТА ОВОЩЕЙ В КАЗАХСТАНЕ	
1.1 Анализ внутреннего рынка овощей в Казахстане и проблема импорта	16
1.2 Факторы жизни и факторы среды растения и закон оптимума в биологии	
1.2.1 Факторы жизни растений.....	20
1.2.2 Факторы среды и агроклиматические показатели среды.....	22
1.2.3 Фазы развития и роста растения и закон оптимума.....	24
1.3 Обзор математических моделей управления микроклиматом (модели среды) .....	25
1.4 Обзор моделей агроэкосистем (модели роста и развития растений)	
1.4.1 Модели агроэкосистем.....	27
1.4.2 Модель “Почва – Растение – Атмосфера” и система имитационного моделирования Agrotool.....	29
1.4.3 Модель расчета урожайности сельскохозяйственной культуры Лысенко С.А.....	32
1.5 Технологии интеллектуальной обработки данных на основе нечеткой логики и нейронных сетей.....	33
1.6 Технологические процессы и умное управление в современных теплицах.....	35
1.7 Прогрессивные технологии в тепличном хозяйстве и возможности их применения с точки зрения критерия Цена-Качество.....	39
Выводы по первой главе.....	42
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МОДЕЛЬ “РАСТЕНИЕ – СРЕДА – СИТУАЦИЯ - УПРАВЛЕНИЕ”	
2.1 Постановка задачи принятия решения с помощью экспертной системы и алгоритм ее обучения	
2.1.1 Структура нечеткого логического вывода.....	43
2.1.2 Постановка задачи принятия решения с помощью экспертной системы.....	44
2.1.3 Алгоритмы принятия решения с помощью экспертной системы	46
2.1.4 Параметрическая идентификация и обучение гибридной сети.....	48
2.2 Модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление”	
2.2.1 Принцип ситуационного управления.....	50
2.2.2 Постановка задачи ситуационного управления и критерий оптимальности.....	52
2.2.3 Описание модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление” .....	56

2.3 Использование модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление” для решения задач ситуационного управления	
2.3.1 Структура и функциональная схема экспертной системы модели.	66
2.3.2 Идентификация текущей ситуации в суточном масштабе времени (задача 1).....	67
2.3.3 Алгоритм решения задачи идентификации текущей ситуации в суточном масштабе времени (задача 1).....	69
2.3.4 Идентификация интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени (задача 2).....	70
2.3.5 Алгоритм идентификации интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени (задача 2).....	71
2.3.6 Определение моментов перехода фаз (задача 3).....	71
2.3.7 Алгоритм определения моментов перехода фаз (задача 3).....	72
2.3.8 Ситуационное управление агротехническими мероприятиями (задача 5).....	74
Выводы по второй главе.....	75
<b>3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА</b>	
3.1 Биологический эксперимент для исследования роста и развития растений в теплице	
3.1.1 Цель и задачи эксперимента.....	77
3.1.2 Биологический эксперимент в домашней теплице.....	79
3.1.3 Биологический эксперимент в теплице КазНУ им. аль-Фараби.....	80
3.2 Синтез компенсатора возмущений	
3.2.1 Исследование влияния возмущений Среды и построение линейной параметрической модели.....	82
3.2.2 Синтез компенсатора возмущений.....	89
3.3 Синтез НЛК для ситуационного управления технологическими режимами теплицы для системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”	
3.3.1 Определение конфигурации НЛК для ситуационного управления технологическими режимами теплицы.....	93
3.3.2 Синтез модели НЛК (задача 4).....	95
3.3.3 Выбор функциональных требований к разработке НЛК.....	97
Выводы по третьей главе.....	104
<b>4 МОНИТОРИНГ, СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛИЦЕЙ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРОЖАЙНОСТИ</b>	
4.1 Мониторинг и нечеткое управление с использованием беспроводных и IoT технологии в домашней теплице.....	106
4.2 Мониторинг состояния среды с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби.....	113
4.3 Ситуационное управление в суточном масштабе времени с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби (задачи 1 и 3).....	115
4.4 Ситуационное управление в биологическом масштабе времени с	119

использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби (задача 2).....	
4.5 Сравнительный анализ урожайности для трех теплиц: КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и Eco Product Company (Актобе)	
4.5.1 Планирование эксперимента.....	122
4.5.2 Применение модели урожайности Лысенко С.А.....	123
4.5.3 Применение нечеткой модели урожайности.....	127
4.5.4 Сравнительный анализ моделей.....	129
4.6 Оценка работоспособности системы в условиях исследовательской теплицы КазНУ им. аль-Фараби.....	131
Выводы по четвертой главе.....	134
<b>5 ПАТЕНТЫ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ (ПРОТОТИПЫ), ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ</b>	
5.1 Мобильное IoT-приложение “Ақылды жылыжай”	
5.1.1 Описание системы.....	136
5.1.2 Руководство по использованию.....	138
5.2 Полупромышленная установка “Домашняя смарт теплица”	
5.3.1 Описание полезной модели.....	143
5.3.2 Формула полезной модели.....	145
Выводы по пятой главе	146
Рекомендации по выращиванию овощей в теплице.....	147
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	148
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	151
Приложение А – Справка о прохождении научной стажировки.....	158
Приложение Б – Авторское свидетельство.....	159
Приложение В – Патент на полезную модель.....	160
Приложение Г – Акты и справки внедрения.....	161
Приложение Д – Полупромышленная установка “Домашняя смарт теплица” (прототип).....	165
Приложение Е – Мобильное приложение “Ақылды жылыжай” .....	166
Приложение Ж – Справки о публикации статей в базе данных Скопус.....	167

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ҚР ҚНЖЕ 3.02-33-2014 «Жылу, желдету, кондиционер жүйелері». – Астана, 2014.

СН РК 3.02-33-2014. Теплицы и парники. - Алматы: «КазНИИСА», 2014. 121с.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АСУ – автоматизированная система управления  
БД – база данных  
БЗ – база знаний  
БУ – блок управления  
ЗУ – задающее устройство  
ИМ – исполнительный механизм  
КВ – компенсатор возмущений  
ЛПР – лицо, принимающее решение  
МНК – метод наименьших квадратов  
НЛК – нечеткий логический контроллер  
ННЛК – нейро-нечеткий логический контроллер  
НС – нейронная сеть  
ПЛК – программируемый логический контроллер  
ПЛФ - принцип лимитирующих факторов  
РП – решающее (корреляционное) правило  
САР – система автоматического регулирования  
СКО – среднее квадратическое отклонение  
СМО – система массового обслуживания  
СПТР - система поддержки технологических решений  
СХК – сельскохозяйственная культура  
ТП – технологический процесс  
УУ – устройство управления  
ФАР – фотосинтетически активная радиация  
ФП – функция принадлежности  
ЧМС – человеко-машинная система  
ЭС – экспертная система

ANFIS - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System  
IoT-приложение – аграрное IoT-приложение  
CF – Cloud Fraction (облачность)  
FAPAR – Fraction of Absorbed Photo synthetically Active Radiation  
FLC - Fuzzy Logic Controller  
HVAC – Heating, Ventilation, Air Condition  
IoT – Internet of Things  
LUE – Light Use Efficiency  
MRAC – Model Reference Adaptive Controller  
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index  
NPP – Net Primary Production  
PAR – Photo synthetically Active Radiation  
WSN – Wireless sensor network

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины с определениями:

**Автоматизированная система управления** – человеко-машинная система, реализующая автоматизированный сбор и переработку информации, необходимой для принятия решений по управлению объектом.

**Адаптивное управление** - совокупность методов теории управления, позволяющих синтезировать системы управления, которые имеют возможность изменять параметры регулятора или структуру регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления.

**База данных** – именованная совокупность структурированных и организованных данных, отображающая состояние объектов и их отношений в определенной предметной области.

**База знаний** – именованная совокупность организованных структурированных данных и знаний в определенной предметной области и логические правила обработки для получения необходимых знаний.

**Закон оптимума в биологии** – любой экологический фактор имеет определенные пределы положительного влияния на живые организмы. Закон определяет пределы (границы) действия фактора, который наиболее благоприятен для жизнедеятельности. Отклонения от оптимума определяют зону пессимума, в котором происходит угнетение организма.

**Идентификация объекта** – построение его математической модели, устанавливающей взаимосвязь между входными и выходными переменными по экспериментальным данным.

**Интеллектуальная система** – программно-техническая система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы. Структура интеллектуальной системы включает три основных блока – базу знаний, механизм вывода и интеллектуальный интерфейс.

**Кластеризация** – задача группировки множества объектов на подмножества (кластеры) таким образом, чтобы объекты из одного кластера были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров по какому-либо критерию.

**Корреляция (корреляционная зависимость)** – статистическая взаимосвязь двух или более величин. Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции.

**Лицо, принимающее решение** в теории принятия решений – субъект решения (командир, начальник, менеджер), наделённый определёнными полномочиями и несущий ответственность за последствия принятого и реализованного управленческого решения.

**Мониторинг** – постоянное наблюдение за определёнными процессами для оценки их состояния и прогнозов развития.

**Нейронная сеть** – математическая модель, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге.

**Нечеткая логика** – раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств, базирующийся на понятии нечеткого множества, впервые введенного Л. Заде как объекта с функцией принадлежности элемента к множеству, принимающей любые значения в интервале  $[0, 1]$ , а не только 0 или 1.

**Нечеткий логический контроллер** – контроллер (регулятор), построенный на базе нечеткой логики.

**Полная ситуация** на объекте управления - совокупность, состоящая из текущей ситуации, знаний о состоянии системы управления в данный момент и знаний о технологии управления.

**Решающее (корреляционное) правило** - правило, позволяющее выбрать решение, наиболее предпочтительное в каком-либо смысле. С помощью ее можно определить принадлежность объекта к заданному классу и применяется при решении задачи принятия решения.

**Смарт теплица** – это революция в сельском хозяйстве, которая создает саморегулирующий микроклимат, подходящий для роста растений, благодаря использованию датчиков, исполнительных механизмов и систем контроля и управления, которые оптимизируют условия роста и автоматизируют процесс выращивания.

**Ситуационное управление** – метод управления сложными системами различной природы, основанный на идеях теории искусственного интеллекта: представление знаний об объекте управления и способах управления им на уровне логико-лингвистических моделей, использование обучения и обобщения в качестве основных процедур при построении процедуры управления по текущим ситуациям, использование дедуктивных систем для построения многошаговых решений.

**Текущая ситуация** на объекте управления - совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени.

**Управление** – целенаправленное воздействие на объект управления или процесс, в результате чего происходит как качественное, так и количественное изменение переменных, определяющих состояние объекта или процесса.

**Урожайность** сельскохозяйственных культур - один из важнейших показателей эффективности всего агропромышленного комплекса, который определяется, как количество растениеводческой продукции, получаемой с единицы площади. Урожайность для культур открытого грунта рассчитывают в центнерах с гектара (ц/га), а в теплично-парниковом производстве — в кг с 1 м<sup>2</sup>.

**Эксперимент** – это метод научного познания, при помощи которого исследуются явления реально-предметной действительности в определенных (заданных), воспроизводимых условиях путем их контролируемого изменения.

**Экспертная система** – система искусственного интеллекта, включающая знания об определенной слабо структурированной и трудно формализуемой узкой предметной области и способная предлагать и объяснять пользователю разумные решения.

**IoT** или интернет вещей - сеть связанных через интернет объектов, способных собирать данные и обмениваться данными, поступающими со встроенных сервисов. Устройства, входящие в интернет вещей, — любые автономные устройства, подключённые к интернету, которые могут отслеживаться и/или управляться удалённо.

**WSN** или беспроводная сенсорная сеть – распределенная, самоорганизующая сеть множества датчиков и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством беспроводных каналов связи.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Анализ рынка овощей Республики Казахстан за последние несколько лет показал, что отечественный производитель не может обеспечить полностью внутренний спрос (только на 20%), несмотря на то, что с каждым годом растет валовый сбор и урожайность.

Основными причинами такого положения являются:

- не обеспеченность внутреннего спроса продукцией собственного производства;
- резко-континентальные климатические условия и маловодие, не позволяющие для круглогодичного выращивания овощной продукции;
- ограниченное количество орошаемых земель на юге Казахстана, выделяемых для выращивания овощной продукции;
- несовременные системы по выращиванию овощных культур;
- отсутствие развитой инфраструктуры по переработке овощных культур.

Цифровизация агробизнеса является приоритетным и актуальным направлением развитием агросектора нашей экономики и обеспечивает продовольственную безопасность страны. Стремительное сокращение доли сельского населения и его старение ставят перед государством проблемы закрепления и достойной занятости сельской молодежи путем привития навыков и умений высокотехнологичного агропромышленного производства.

Важнейшей компонентой такой трансформации является интенсификация производства, импортозамещение поставок ранних овощей с постоянным снижением разницы в комфортности жизни в городе и сельской местности.

Появление бюджетных микроконтроллерных элементов микро и малой автоматизации позволяют расширять области цифровизации фермерских хозяйств страны. Этому способствует активное изучение основ робототехники и интернета вещей на базе микроконтроллеров серии AVR, ESP32 в средних школах и сельских колледжах. Все это создает плодотворную почву для технологической интеграции отечественного агросектора в цифровое общество.

Сложность разработки и внедрения их в производство заключается в следующем: - Проблема качественного обеспечения непрерывного обслуживания теплицы; - Сложность моделирования и описания динамических процессов теплицы.

Во-первых, рассматриваемый объект управления – растение является биологической системой, являющийся живым организмом, который требует непрерывного ухода за собой. В связи с этим, процесс мониторинга и управления нельзя приостановить и запустить заново, как в производстве техники и оборудования – оно может погибнуть. Теплица как объект управления, является агроэкологической системой закрытого типа, в которой энергетические процессы не детерминированы и не имеют определенных граничных условий и позволяют выращивать культуры с учетом изменения параметров окружающей среды.

Во-вторых, сложность математического моделирования процессов агроэкосистемы лежит во взаимодействии физических, химических и биологических параметров объекта управления.

Известные математические модели теплиц можно разделить на три типа: а) модели, учитывающие только состояние среды (модели микроклимата); б) модели, учитывающие только состояние растения в течение вегетационного периода развития; в) модели, учитывающие и состояние растения, и состояние среды. Очевидно, что третий тип модели является очень трудоемким и сложным с точки зрения разработки.

Модели первого типа являются более простыми и легко реализуемыми. Большинство из них однофакторные, то есть предусматривают регулирование только одного технологического процесса (например температуры или полива). Поэтому они часто используются на практике и широко внедрены на рынке тепличного хозяйства. Недостаток моделей первого типа в том, что они не учитывают состояние растения, главного звена системы.

Модели второго типа имеют более сложную математическую интерпретацию и в основном используются в биологических исследованиях динамики роста, оценки перехода фаз, и т.д. Такие модели известны под названием “Почва-Растение-Атмосфера”. Сложность моделирования процессов агроэкосистем типа “Почва-Растение-Атмосфера” состоит в том, что они, во-первых, являются сложными разнородными системами, во-вторых, их разработка очень трудоемка и требует больших временных ресурсов.

Первые два типа моделей не могут дать целостного описания процессов выращивания растений в теплице. Поэтому возникла необходимость объединения возможностей предыдущих типов моделей в единую модель. В настоящей диссертационной работе предлагается модель и практическая реализация системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”, во-первых, объединяющая возможности моделей первого и второго типа; во-вторых, удовлетворяющая критерию цена-качество и требующая для реализации гораздо меньше затрат, чем рассмотренные модели.

Таким образом, актуальной проблемой агропромышленного комплекса РК является разработка и внедрение отечественных смарт-теплиц как IoT устройств, посезонно или круглогодично обеспечивающих население овощами и фруктами, и удовлетворяющих критерию Цена – качество.

**Степень разработанности темы.** Так как рассматриваемая проблема разработки интеллектуальных систем в области тепличного хозяйства является широкой и комплексной, целесообразно разделить ее на несколько областей: физиология растений, проблемы микроклимата в жизни растений, теоретические вопросы проектирования интеллектуальных систем, системы точного земледелия и проблемы идентификации состояния растения в теплицах, практические вопросы реализации интеллектуальных систем управления.

Основоположниками в области моделирования физиологических процессов роста и развития растения являются ученые Полуэктов Р.А., Дж. Торнли, Розен Р., Шевелуха В.С., Сиротенко О.Д., и др. Исследованию климатических

факторов и оптимальных условия в жизни растений посвящены работы Лысенко Т.Д., Вальтер Г., Зайцев Г.Н., Соколов Л.В., Лысенко С.А. и др.

Проблемой разработки систем точного земледелия, а также проблемой идентификации состояний растений в теплицах занимались Бородин И.Ф., Сейдж Э.П., Бондаренко Н.Ф., Михайленко И.М., Якушев В.П., и др.

Теоретическими вопросами проектирования интеллектуальных систем на базе нечеткой логики, нейронных сетей и гибридных сетей занимались Заде Л., Мамдани И., Сугено М., Ротштейн А.П., Янг З., Штовба С.Д., и др.

Исследованию вопросов разработки и практической реализации интеллектуальных систем управления, в частности, систем ситуационного управления и человеко-машинных систем посвящены труды Пospelова Д.А., Мелихов А.Н., Бернштейн Л., Новиков Д.А., Саати Т., и др.

Вопросами разработки интеллектуальных систем в области тепличного хозяйства занимались Д. Клапвайк, А. Удинк тен Кате, Солдатов В.В., Сетхи В.П., Реватхи С., Рафуддин С., Лизика С., Усман А., Коллотта М., Гассман О., Николоси Г., Алгарин С., Жомаа М. и др.

Большой вклад в развитие научной школы искусственного интеллекта в Казахстане внесли ученые Калимолдаев М.Н., Тукеев У.А., Мутанов Г.М., Дюсембаев А.Е., Амиргалиев Е.Н., и др.

**Объектом исследований** являются процессы роста и развития растения, состояния среды (микроклимат) внутри теплицы в период вегетации.

**Предметом исследования** является мониторинг процессов роста и развития растения, а также управление технологическими режимами теплицы на базе современных интеллектуальных технологий и IoT устройств.

**Цель работы** – разработка ситуационной интеллектуальной системы управления технологическими процессами теплицы на базе современных интеллектуальных технологий и IoT устройств и доступной для населения.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе научных задач использованы экспериментальные методы, методы ситуационного управления, нечеткой логики и нейронных сетей и теории автоматического регулирования. При проведении исследований работы нечеткого логического контроллера и нейроконтроллера в качестве инструментария использовался Matlab R2019b с графическим интерфейсом пользователя со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox. Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе теоретических результатов и формулируемых на их основе выводов обеспечивается строгостью производимых математических выкладок, базирующихся на методах экспериментальной биологии, теории автоматического регулирования, нечеткой логики, теории идентификации, теории принятия решений и ситуационного управления.

**Научная новизна:**

- впервые построена математическая модель экосистемы “Растение-СредаСитуация-Управление”;

- на базе построенной модели предложена структура общей экспертной системы для ситуационного управления теплицей;

- на базе построенной модели предложены алгоритм/алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений;
- разработана технологическая схема, которая реализована в виде полупромышленного прототипа смарт-теплицы;
- разработана функциональная схема IoT-устройства, позволяющая выполнять поставленные функциональные требования к системе.

**Практическая значимость** заключается в применении новой технологической схемы IoT-устройства, обеспечивающей функции мониторинга и нечеткого управления технологическими процессами управления ростом и развития растения в теплице на базе интеллектуальных технологии и IoT-устройств. В состав оборудования входят: бак, клапан полива, магистральный трубопровод, капельницы, датчик почвы, вентилятор, датчик температуры, прожектор, датчик света, блок управления, реле клапана полива, реле вентилятора, реле прожектора. Главным элементом системы является Блок управления (Устройство управления, УУ).

Технический результат работы заключается в применении новой технологической схемы IoT-устройства, обеспечивающей функции мониторинга и нечеткого управления технологическими процессами управления ростом и развития растения в теплице.

Модель системы была внедрена в теплицы КазНУ им. Аль-Фараби (Алматы), МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и Eco product (Актобе). По результатам внедрения были сформулированы предложения фермеру в виде рекомендации по выращиванию СХК в зависимости от условий Среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- обзор и анализ современных технологий точного земледелия, рынка импорта овощей и учет климатических условий Казахстана, анализ существующих математических методов и моделей смарт-управления теплицами;
- построение математической модели системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”, позволяющей формализацию задач смарт-управления теплиц в форме экспертной системы;
- разработка технологической схемы, позволяющей выполнять технологические режимы;
- разработка функциональной схемы IoT-устройства позволяющей выполнять функциональные требования к системе;
- разработка прототипа смарт-теплицы в виде IoT-устройства, удовлетворяющей критерию Цена – Качество;
- сравнительный анализ модели для различных климатических условий.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”;
2. Структура экспертной системы для ситуационного интеллектуального управления теплицей;

3. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решения на базе аппарата нечеткой логики и ситуационного управления;
4. Технологическая схема домашней теплицы;
5. Функциональная схема IoT-устройства.

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований были внедрены в исследовательскую теплицу КазНУ им. аль-Фараби. Апробация работы.

Основные положения и результаты работы доложены на:

XI Международной конференции "Математические, физические науки и инженерные приложения", 9-12 мая 2018, г. Давао, Филиппины; XIX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», 16-18 мая 2018, г. Уральск, Казахстан (2 статьи); IV международной конференции молодых ученых «Перспективы развития науки и образования», 10 декабря 2018, г. Нью-Йорк, США; IV международной конференции “Новые тенденции в технике, науке и технологии” (ICETEST-2020), 26-27 февраля 2020, г. Бангкок, Таиланд; международной научной конференции в области информационных технологий, посвященной 75-летию профессора У.А. Тулеева, 8 октября 2021 г; научном семинаре Факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, 13 марта 2020, г. Новосибирск, Россия.

**Публикации.** Теме диссертации посвящены 16 научных работ, в том числе 3 – в научных в изданиях КН МОН РК, 1 – в научных в изданиях КН МОН РФ, 7 – в материалах международных конференции, 2 – в научных журналах, входящих в базу данных Скопус, 1 - авторское свидетельство и 1 патент РК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Она изложена на 168 страницах, включая 85 рисунков, 40 таблиц и список литературы из 108 наименований.

Первая глава посвящена обзору современных технологии в тепличном хозяйстве и проблеме импорта овощей в Казахстане. Проведен обзор математических моделей возможности использования интеллектуальных технологий в тепличном хозяйстве. Вкратце описан обзор мировых производителей IoT технологии. В главе также рассматриваются основные технологические процессы в современных теплицах. Приводится анализ прогрессивных технологии и возможности их применения с точки зрения критерия цена - качество.

Во второй главе описывается постановка задачи исследования и принципы smart-управления теплицами. Главным образом, описывается влияние условий среды на рост и развитие растений и приводится закон оптимума – важнейший закон биологии, играющий ключевую роль в настоящем исследовании. Приводится формальное описание модели системы “Растение-СредаСитуация-Управление”, постановка задачи технологического управления на базе экспертной системы. Для решения поставленной задачи управления, модель приводится к задачам нечеткой идентификации и классификации типа

Мамдани и Сугено. В этой главе рассматриваются особенности использования модели системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” для идентификации текущей ситуации в суточном масштабе времени (задача 1), идентификации интегральной ситуации в биологическом масштабе времени (задача 2), определения моментов перехода фенофаз (задача 3) и ситуационного управления агротехническими мероприятиями (задача 5) и приводятся алгоритмы их решения.

Третья глава рассматривает методы и инструменты исследования объекта управления - теплицы. Определяются цели и задачи биологического эксперимента для исследования роста и развития растений в теплице. Эксперимент проводится научно-исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби. В главе описывается решение задачи синтеза регулятора на базе нечеткого логического контроллера (НЛК) для системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”. Определяются цели и задачи управления, выбирается конфигурация системы и функциональные требования к разработке НЛК, строится модель НЛК (задача 4), а также выбираются функциональная схема, схема технологического оборудования и сбора данных и облачного хранилища для смарт-теплицы.

Четвертая глава посвящена мониторингу и ситуационному управлению объекта управления. Приводится описание экспериментов: а) по мониторингу и управлению в режиме реального времени с использованием беспроводных и IoT технологии в домашней теплице; б) по мониторингу и управлению в режиме реального времени с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби. Приводится схема внедрения установки “Ақылды жылыжай” в исследовательскую теплицу КазНУ им. аль-Фараби, а также сравнительный анализ урожайности теплиц для трех регионов Казахстана: Алматы, Туркестана и Актобе. Определяется оценка работоспособности разработанной системы.

В пятой главе описывается принцип действия и руководство по эксплуатации IoT-устройства и мобильного приложения “Ақылды жылыжай”, на которые были получены патент и авторское свидетельство. Разработанное IoT-устройство является прототипом смарт-теплицы и удовлетворяет критерию Цена – Качество. Также формулируются выводы и рекомендации по выращиванию сельхозкультур в зависимости от условий среды.

# 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ПРОБЛЕМА ИМПОРТА ОВОЩЕЙ В КАЗАХСТАНЕ

## 1.1 Анализ внутреннего рынка овощей в Казахстане и проблема импорта

Цифровизация агробизнеса является приоритетным и актуальным направлением развитием агросектора нашей экономики и обеспечивает продовольственную безопасность страны [1]. Стремительное сокращение доли сельского населения и его старение ставят перед государством проблемы закрепления и достойной занятости сельской молодежи путем привития навыков и умений высокотехнологичного агропромышленного производства.

Важнейшей компонентой такой трансформации является интенсификация производства, импортозамещение поставок ранних овощей с постоянным снижением разницы в комфортности жизни в городе и сельской местности.

Появление бюджетных микроконтроллерных элементов микро и малой автоматизации позволяют расширять области цифровизации фермерских хозяйств страны. Этому способствует активное изучение основ робототехники и интернета вещей на базе микроконтроллеров серии AVR, ESP32 в средних школах и сельских колледжах. Все это создает плодотворную почву для технологической интеграции отечественного агросектора в цифровое общество [2, 3, 4].

В настоящее время в Казахстане развитию аграрного сектора и тепличных комплексов уделяется весьма большое внимание [5, 6]. Организация тепличного хозяйства и выращивание различных видов сельскохозяйственных культур является довольно выгодным бизнесом, к тому же, очень полезным. По данным Ассоциации теплиц Казахстана сегодня в стране насчитывается 9859 гектаров закрытого грунта, причем в эти объемы входят как промышленные тепличные комплексы, так и минитеплицы (рисунок 1.1).

В основном, тепличный бизнес в данное время развивается довольно быстро в южных регионах нашей страны. Дело в том, что потребность рынка требует, что выгоднее перевозить выращенный товар с юга на север, чем терпеть убытки от расходов на газ и электроэнергию в северных районах. Сезонный фактор сильно влияет на ценовую динамику овощной продукции в течение года. Рост цен на овощи в осенний период объясняется закладкой на зимнее хранение основной части урожая и связанным с этим уменьшением объема предложения продукции на рынке. На рост цен в зимний период влияние оказывают также издержки на хранение.

*Проблема обеспеченности* овощной продукцией в межсезонный период в последние годы решается путем расширения площадей закрытого грунта, в том числе за счет государственных инвестиций и увеличения валового сбора ранних овощей. Учитывая деградацию большинства построенных в советские годы теплиц и слабую техническую оснащенность имеющихся теплиц, отмечается низкая обеспеченность населения ранними овощами в период межсезонья

(20%). По данным Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан, на сегодняшний день в республике теплицы функционируют на площади 9859 га. В основном они специализируются на производстве томатов, огурцов и зелени.

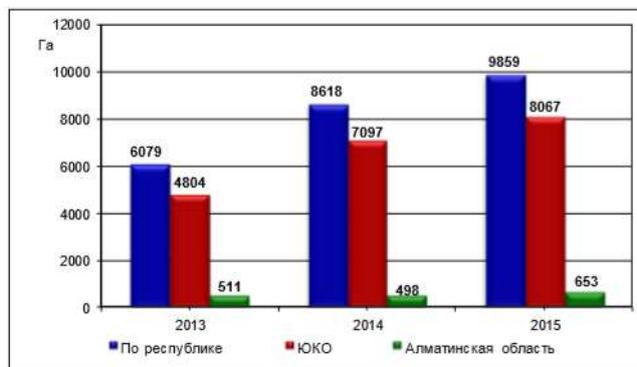


Рисунок 1.1 - Площадь теплиц в Казахстане, га

В 2013-2015 гг введены в эксплуатацию 3780 га площадей закрытого грунта, из них за счет собственных средств сельхозтоваропроизводителей построено 1570 га площадей закрытого грунта, средств АО «НУХ», «КазАгро» 960 га площадей закрытого грунта, средств местных исполнительных органов 103 га площадей закрытого грунта, средств других финансовых институтов 1147 га площадей закрытого грунта [4, с. 22].

В настоящее время на рассмотрении в Сенате находится проект закона о продовольственной безопасности, где предусмотрена норма по субсидированию овощей закрытого грунта. После принятия закона, данная норма «будет хорошим стимулом для развития тепличного хозяйства». Тепличная отрасль Казахстана, возможно, только начинает своё развитие и имеет перспективу в будущем, так как площади для построения данной отрасли предостаточно. АО «Национальный управляющий холдинг», «КазАгро» приступил к кредитованию мини тепличных хозяйств [4, с. 23].

Предполагаемая урожайность теплицы в 12 килограмм на квадратный метр позволяет делать прогноз о дополнительном производстве за счет реализации данной программы плодоовощной продукции в период межсезонья в объемах 1-1,5 тысяч тонн в год, а также создать дополнительно до 400 рабочих мест на селе [4, с.23].

План обеспечения потребностей внутреннего рынка в ранних овощах в период с 2012 по 2014 г.г составляет от 73 (в 2012 г) до 100 % (в 2014 г). По мнению специалистов Министерства сельского хозяйства РК, рост объемов производства овощей в 2014 году достиг 2 237,0 тыс. тонн против 2 185,0 тыс. тонн в 2012 году [4, с.24].

Наиболее перспективным для развития интенсивного плодоовощеводства являются Алматинская, Жамбылская, Южно-Казахстанская и Павлодарская области. Расчетная площадь внедрения интенсивных технологий в 4-х указанных областях оценивается в 43,2 тыс. га (см. таблицу 1.1).

Для массового введения в эксплуатацию новых теплиц - необходимы крупные инвестиции и в первую очередь, заинтересованность производителей в новых технологиях. Большая часть овощной продукции Казахстана выращивается на открытом грунте с комбинированным методом полива. Данная технология имеет серьезные недостатки, которые выражаются немалыми затратами воды и малой урожайностью [6, с.1].

Выращивание сельскохозяйственных культур в теплицах, по сравнению с выращиванием их в поле, имеет ряд преимуществ: - в теплицах процесс выращивания не зависит от климатических и погодных условий; - тепло и влага распределяются равномерно по всей площади теплицы; - теплица защищает культуры от вредного воздействия окружающей среды; - полив тепличных растений осуществляется чистой водой. Теплицы, построенные по современным технологиям, нужны производителям сельскохозяйственной продукции для выживания в условиях жесткой конкуренции со стороны конкурентов. Уменьшение себестоимости продукции в теплицах осуществляется за счет увеличения количества производимой продукции при одновременном снижении затрат на производство.

*Рынок овощных культур и проблема импорта.* В целях исследования проблемы импорта овощей был проведен обзор рынка овощей. В таблице 1.1 показаны статистические данные за 2012 – 2016 гг.

За период с 2012 г. по 2016 г. валовый сбор овощей в республике постепенно растет и достиг в 2016 году 3 795,2 тыс. тонн. Основными областями, традиционно выращивающими овощи, являются Алматинская (944,2 тыс. тонн), ЮКО (944,2 тыс. тонн) и Жамбылская (718,8 тыс. тонн) области. Общая доля трех областей составляет 68,70% от валового сбора в целом по стране (см. таблицу 1.1).

Динамика средней урожайности показывает равномерный ежегодный рост, что коррелируется с валовым сбором овощей в целом по стране.

Таблица 1.1 Урожайность овощей открытого грунта по данным КС Министерства национальной экономики РК (в ц/га)

Регионы	2012	2013	2014	2015	2016
Республика Казахстан	234,0	238,7	243,0	245,8	250,0
Акмолинская	125,6	139,4	142,0	143,4	161,1
Актюбинская	145,2	174,2	179,6	174,7	160,9
Алматинская	276,6	278,9	286,2	291,9	290,0
Атырауская	234,1	236,3	259,6	282,6	279,4
Западно-Казахстанская	145,0	146,7	145,4	141,9	138,7
Жамбылская	222,3	225,5	239,9	246,5	263,9
Карагандинская	307,1	298,8	313,7	314,0	311,6
Костанайская	267,6	301,6	313,3	313,0	320,3
Кызылординская	170,8	172,5	158,3	154,3	165,8

Продолжение таблицы 1.1

Регионы	2012	2013	2014	2015	2016
Мангистауская	110,1	183,3	86,1	94,9	98,2
Южно-Казахстанская	217,2	209,0	201,6	204,8	205,4
Павлодарская	257,3	294,4	316,0	324,6	329,3
Северо-Казахстанская	352,6	371,2	374,4	380,4	386,4
Восточно Казахстанская	251,4	252,8	260,6	256,6	276,8
г. Астана	219,9	249,5	220,3	213,9	182,0
г. Алматы	247,1	222,9	222,7	222,9	225,2

Импорт овощей за анализируемый период в разрезе продукции достаточно волатильный. Только в 2016 года наблюдается динамика снижение импорта по всем основным позициям (рисунок 1.2). Существенное снижение импорта в 2016 году зафиксировано по позициям «Морковь, репа, салат из свеклы, кальцит, сельдерей, редис и аналогичные пищевые корни» на 77,89% и «Капуста, цветная капуста, кольраби и аналогичная съедобная брасса» на 52,18% [7, 8].

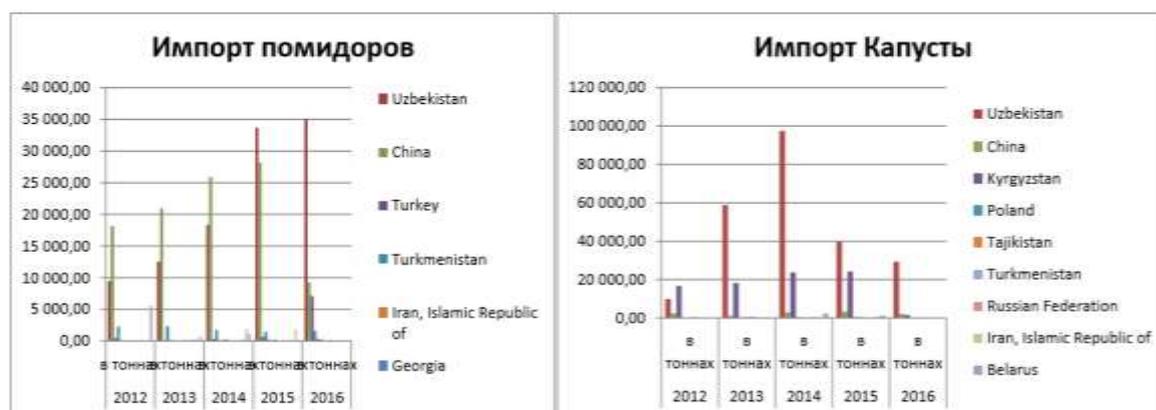


Рисунок 1.2 Экспорт и импорт помидоров и капусты в период 2012 – 2016 гг.

Таким образом, анализ рынка овощей в нашей стране и учет физических и климатических условий Казахстана [9-14] показывает, что отечественный производитель не может обеспечить овощами и фруктами полностью все население из-за следующих причин:

- не обеспеченности внутреннего спроса продукцией собственного производства;
- резко-континентальных климатических условий;
- ограниченного количества орошаемых земель, пригодных для выращивания овощной продукции;
- неразвитой технологической системы по выращиванию овощных культур;
- отсутствия развитой инфраструктуры по переработке овощных культур.

## 1.2 Факторы жизни и факторы среды растения и закон оптимума в биологии

1.2.1 Факторы жизни растений. В результате исследований [15-18], выполненных биологами, физиологами, агрометеорологами и другими специалистами, получены ценные сведения об отношении растений к различным климатическим факторам. Большинство агроклиматических закономерностей базируются на двух биологических законах, имеющих исключительное значение: *равнозначность факторов жизни* и *неравноценность факторов среды*.

Оба эти закона не противоречат друг другу, так как факторы жизни и факторы среды - разные понятия. По этому поводу Т. Д. Лысенко писал: «Внешняя среда, в которой развивается данное растение, и условия, необходимые растению для прохождения всего цикла развития, так и отдельных стадий развития далеко не тождественны» [15, с. 16].

К факторам жизни растений относятся тепло, свет, влагу, воздух и питательные вещества. *Равнозначность факторов жизни* означает, что ни один из них не может быть заменен другим. Например, свет не может быть заменен теплом, тепло не может быть заменено влагой и т. д.

Сущность второго биологического закона сводится к тому, что многочисленные факторы среды, характеризующие климат, оказывают на растения *неравноценное* воздействие. Поэтому, исходя из двух указанных законов значительно упрощается подход к оценке климатических элементов в агроклиматологии.

Рассмотрим подробно факторы, жизненно необходимые для растений: тепло, свет, воздух, вода, питание. Все эти факторы одинаково необходимы и выполняют определенные функции в жизни растений.

Для всех организмов **воздух** - это основа жизни. Из газов, составляющих атмосферный воздух, следует отдельно оценить кислород, азот, углекислый газ.

Кислород ( $O_2$ ) необходим растениям для дыхания. В процессе дыхания происходит окисление накопленных в растениях питательных веществ, создается энергия для всех жизненных процессов растительного организма. Дыхание - это сложная цепь окислительно-восстановительных процессов.

Углекислый газ ( $CO_2$ ) необходим растениям для образования органического вещества в процессе фотосинтеза. Исключительное значение  $CO_2$  для растений видно из того, что сухое вещество растений состоит на 45—50% из углерода.

Азот ( $N_2$ ) необходим растениям как элемент питания. Без него не может проходить синтез белковых веществ, следовательно, не может строиться протоплазма живой клетки. Крупный советский микробиолог В. Л. Омелянский писал: «Азот дороже с общебиологической точки зрения, чем самые редкие из благородных металлов». Однако азот воздуха могут использовать только некоторые растения, имеющие на своих корнях особые клубеньки с бактериями, которые помогают усваивать молекулярный азот (бобовые, из древесных пород — сосна).

С в е т является источником энергии для всех живых организмов на земле. Оценивая значение света в жизни растений, обычно различают три аспекта этой проблемы: влияние спектрального состава, интенсивности и продолжительности освещения.

Все важнейшие физиологические процессы (проращивание семян, фотосинтез, синтез пигментов, фотопериодизм и пр.) определяются в основном световой частью солнечного спектра. Среди указанных процессов наибольшее значение имеет ф о т о с и н т е з.

Часть спектра солнечного света, непосредственно участвующую в фотосинтезе, называют *фотосинтетически активной радиацией (ФАР)*. Величину ФАР обычно ограничивают пределами длин волн 0,38-0,71 мкм. Физиологическое действие невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучей менее изучено, хотя отдельные аспекты влияния этих частей солнечного спектра на жизнь растений существенны. Так, Клебс наблюдал, что синие и фиолетовые лучи стимулируют процессы клеточного деления, но задерживают вторую фазу роста клеток — их растяжение. Красные лучи, наоборот, усиливают линейный рост органов растений, в то время как процессы клеточного деления заметно подавлены.

Помимо реакции растений на интенсивность и спектральный состав радиации, растения реагируют также на продолжительность освещения. Реакция растений на продолжительность освещения получила название *фотопериодизма*. Следует помнить, что потребность растений в определенной продолжительности освещения проявляется только в стадии развития, которая называется *световой*.

Т е п л о также является необходимым фактором жизни. Давно установлено, что температуры воздуха и почвы, как показатели теплообеспеченности, определяют жизненные процессы, происходящие в растениях. Биофизические и биохимические реакции в организме растений протекают тем быстрее, чем выше температура (разумеется, до определенного уровня). Температура воздуха и почвы определяет темпы развития растений и длительность периода вегетации; кроме того, она является и одним из факторов роста.

В многочисленных работах биологов и агрометеорологов были получены зависимости скорости развития растений от среднесуточных температур воздуха, выявлены пределы температур, вредные для растений. Показано, что на рост и развитие растений большое влияние оказывает суточная амплитуда колебаний температуры: чем она больше, тем в целом быстрее идет процесс развития и роста. Величина амплитуды колебаний температуры воздуха влияет также на качество урожая.

Растениям для оптимального роста и развития требуется определенное сочетание дневных и ночных температур. Это явление получило название *термопериодизма* растений [16]. Поскольку потребность в тепле у различных растений и их сортов меняется в больших пределах и сами ресурсы тепла изменчивы в пространстве и времени, в агроклиматологии учету тепла отводится первостепенное место.

**В л а г а** - один из основных факторов жизни. Она имеет большое значение для развития растений, однако в наибольшей степени от нее зависят рост и величина урожая. Избыточное и недостаточное количество влаги вредно сказывается на растениях, ибо в обоих случаях растения не могут полностью использовать ресурсы тепла для накопления своей массы и создания оптимального урожая. Так, при малом количестве влаги растения используют лишь ту часть термических ресурсов, которая обеспечена этой влагой. Примером в данном случае могут быть эфемеры в зоне пустынь и полупустынь. При большом количестве влаги в почве часть тепла без пользы для растений расходуется на непродуктивное испарение с поверхности почвы. Ресурсы влаги очень изменчивы как по территории, так и во времени. Поэтому всестороннее изучение их для сельскохозяйственного производства имеет исключительное значение. В агроклиматологии этому вопросу уделяется не меньшее внимание, чем ресурсам тепла.

### 1.2.2 Факторы среды и агроклиматические показатели среды

Приведем краткое описание факторов среды [15, с. 16-22], которых необходимо поддерживать в течение всего вегетационного периода. Они выражаются через агроклиматические показатели.

**Т е п л о в о й р е ж и м.** Тепло необходимо растениям во все периоды их роста и развития. Требования к теплу у различных культур неодинаковы и зависят от происхождения, вида, биологии, фазы развития и возраста растения. Температурный режим измеряется количеством тепла и продолжительностью воздействия определённой температуры. Холодный воздух приводит к замедлению физиологических и биохимических процессов — уменьшению интенсивности фотосинтеза, дыхания, выработки и распределения органических веществ. С повышением температуры эти процессы активизируются. При переохлаждении грунта, корни начинают плохо усваивать воду, что приводит к их гниению и гибели растения.

**С в е т о в о й р е ж и м.** Основной источник света - солнце. Только на свету растения создают из воды и углекислого газа органические соединения. Продолжительность освещения сильно влияет на рост и развитие растений. Требования к условиям освещения у растений не одинаковы. Искусственно укорачивая или удлиняя световой день (фотопериод), можно повысить урожай и значительно улучшить его качество.

**В о д н ы й р е ж и м.** Относительная влажность не только почвы, но и воздуха необходима растению на протяжении всей его жизни. Образовавшиеся корешки всасывают ее из почвы вместе с растворенными в ней минеральными солями. Вода (по объему) является главной составной частью растений. Она участвует в создании органических веществ и в растворенном виде разносит их по растению. Благодаря воде растворяется углекислый газ, высвобождается кислород, происходит обмен веществ, обеспечивается нужная температура растения. При достаточном запасе влаги в почве рост, развитие и

плодообразование протекают нормально; недостаток влаги резко снижает урожай и качество продукции.

**В о з д у ш н ы й р е ж и м.** Из воздуха растения получают необходимый им углекислый газ, который является единственным источником углеродного питания. Содержание углекислого газа в воздухе ничтожно и составляет 0,03%. Обогащение воздуха углекислым газом идет в основном благодаря выделению его из почвы. Большую роль в образовании и выделении почвой углекислого газа играют органические и минеральные удобрения, вносимые в почву. Чем энергичнее в почве процессы жизнедеятельности микроорганизмов, тем активнее разлагаются органические вещества, а следовательно, тем больше углекислого газа выделяется в приземный слой воздуха. Другой источник пополнения воздуха углекислым газом — живые существа, выделяющие его при дыхании. Повышение содержания углекислого газа в воздухе положительно сказывается на всех процессах в растениях, особенно ускоряет плодоношение.

**А г р о к л и м а т и ч е с к и е п о к а з а т е л и** растений. Потребность сельскохозяйственных объектов в климатических условиях среды местообитания за весь период вегетации или за отдельные его отрезки можно выразить количественно через агроклиматические показатели. Под агроклиматическими показателями понимают количественные выражения связи роста, развития, состояния и продуктивности объектов сельскохозяйственного производства с факторами климата.

Таким образом, агроклиматические показатели могут отражать не только потребность объектов в определенных условиях климата, но и реакцию их на конкретное значение одного климатического элемента или их комплекс.

В настоящее время для характеристики роста и развития растений используют следующие агроклиматические показатели [15, с.22-26]:

- 1) продолжительность вегетационного периода и его подпериодов;
- 2) суммы температур и средние температуры за вегетационный период или его отдельные отрезки;
- 3) критические (низкие и высокие) температуры, повреждающие растения;
- 4) оптимальные пределы температур, необходимые для нормального роста и развития растений;
- 5) показатели, учитывающие фотопериодизм растений;
- 6) суммы осадков, запасы продуктивной влаги и другие показатели увлажнения почвы;
- 7) показатели устойчивости растений к засухе;
- 8) показатели зимостойкости, холодостойкости и морозостойкости растений;
- 9) показатели интенсивности освещения в растительной среде;
- 10) показатели, связывающие урожай с климатическими элементами.

Кроме этих данных, в агроклиматологии необходимо учитывать жизненный ритм развития растений, характеризующийся такими показателями, как порядок чередования фенологических фаз, время наступления цветения и плодоношения, особенности зимнего покоя и т. д. В зависимости от

конкретных задач, которые поставлены перед исследователем, используются разные показатели.

### 1.2.3 Фазы развития и роста растения и закон оптимума

Закон оптимума и нормы выращивания играют большую роль в жизни растений [17, 18].

Общий характер развития и роста растения выражается сигмоидной функцией (Закон Ю. Сакса), состоящей из четырех элементов (рисунок 1.3а): лаг-периода (фаза прорастания), внешне проявляющего слабо, когда идут процессы дифференциации, подготавливающие последующий рост (1), фаза интенсивного роста (2), фаза замедленного роста (3) и фаза стационарного состояния (4). Рост и развитие растения и от внешних условий. Чем ближе к оптимуму, тем короче и лаг-период и круче логарифмическая часть кривой [17, с. 22-24].

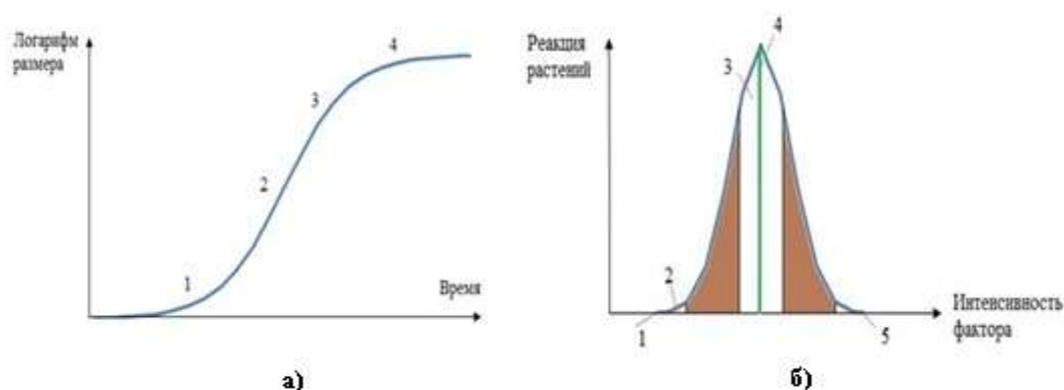


Рисунок 1.3. Кривая роста и закон оптимума.

а) Динамика роста растения (фенофазы): 1—лаг-период; 2—фаза интенсивного роста; 3—фаза замедленного роста; 4—фаза стационарного состояния.

б) Закон оптимума и реакция растений на факторы внешней среды: 1—минимум; 2—зона пессимума; 3—зона оптимума; 4—оптимум; 5—максимум.

З а к о н о п т и м у м а [19-25] указывает, что любой экологический фактор имеет определенные пределы положительного влияния на живые объекты. При отклонении от них наступает угнетение организмов, а по достижении критических значений — гибель. Например, растения плохо переносят и сильную жару, и сильные морозы, для большинства из них оптимальны средние температуры. Одинаково неблагоприятны для них засухи и постоянные проливные дожди. Закон оптимума указывает на важность меры воздействия каждого фактора на жизнеспособность организма. Графически эта зависимость выражена оптимальной (логистической функцией) кривой, где по горизонтали указывается интенсивность воздействия фактора, а по вертикали — степень благоприятности его воздействия (рисунок 1.4б).

В центре этой кривой располагается *зона оптимума*. При оптимальных значениях фактора наблюдаются наилучшие показатели жизнедеятельности растений: они активно растут, питаются, размножаются. Чем больше

отклонение фактора от этих показателей, тем менее это благоприятно для растений. На схеме по обе стороны от зоны оптимума располагаются зоны пессимума (или зоны угнетения). В месте пересечения кривой с горизонтальной осью находятся две критические точки — минимума и максимума. Они соответствуют крайним значениям фактора, за пределами которых наступает смерть организма. Расстояние между критическими точками показывает степень выносливости организмов по отношению к изменениям данного фактора, или его толерантность [17, с. 23].

### **1.3 Обзор математических моделей управления микроклиматом теплицы (модели среды)**

Системы микроклимата в научной литературе объединяются под общим названием HVAC (Heating, Ventilation, Air Condition). Сделаем анализ обзорных статей по этим системам [26-31]. Рассмотренные в них модели можно разделить на три класса.

*Модели белого ящика* – построены на физических принципах термо-, гидро- и газодинамики. Эти модели учитывают только состояние среды и состоят из нескольких сложных дифференциальных уравнений, в которых использованы многочисленные коэффициенты, учитывающие геометрию здания, тепловые свойства ограждающих конструкций, инсоляцию и т.д. Все параметры и коэффициенты моделей известны, они либо вычисляются, либо измеряются. Такие модели громоздки, требуют больших вычислительных ресурсов и временных затрат [32-36].

Другой вид моделей – учитывает также состояние человека, то есть его чувствительность к тепловым и влажностным условиям на основе показателя комфортности [37, 38].

*Модели черного ящика* – не используют в явном виде физические принципы при построении модели. Известны только входные и выходные параметры модели. Такая модель является некоторой аппроксимацией наблюдаемых процессов. К таким моделям можно отнести всевозможные модели на основе PID-регуляторов и нейронных сетей [39, 40].

*Модели серого ящика* – построены частично на физических принципах. Не все параметры такой модели известны, они не могут быть вычислены или измерены. По сути – это гибридные модели, сочетающие особенности моделей первого и второго типа. К ним относятся модели на основе четкой [41, 42], нечеткой логики [43-47], нейро-нечеткое моделирование [48-50], мультиагентные системы и системы на генетических алгоритмах [51, 52].

В таблице 1.2 приводится классификация и их сравнительный анализ.

Таблица 1.2 Достоинства и недостатки моделей управления микроклиматом

Модели	Преимущества Недостатки	Преимущества Недостатки	Тип модели
Классические дифференциальные уравнения теплового баланса [32-36]	Наглядная расчетная схема, надежность и точность результатов, возможность корректировки расчетных формул и учета дополнительных факторов (влажность и др.)	Сложность и громоздкость вычислений, необходимость идентификации большого числа параметров	Белого ящика
Адаптивная модель [37, 38]	Учитывает изменения наружного климата, хорошая устойчивость	Сложность и трудоемкость при реализации	Белого ящика
PID управление [39, 40]	Быстродействие, точное удержание заданной температуры	Проблема подбора коэффициентов модели, малая точность, трудоемкость настройки, ошибки при больших отклонениях от номинальных значений параметров	Черного ящика
Релейное Управление [41, 42]	Быстродействие, удержание заданной температуры в указанных пределах	Простота настройки и эксплуатации	Серого ящика
Управление на основе нечеткой логики [43-47]	Высокая точность, устойчивость, быстродействие, позволяет управлять нелинейными системами с динамически изменяющимися параметрами	Сложность настройки и составления базы нечетких правил. Экспоненциальный рост сложности вычислений при увеличении количества входных переменных	Серого ящика
Управление на основе искусственных нейронных сетей [48]	Обработка большого количества входных данных, надежное прогнозирование, не требуется предварительная информация о здании или климатической подсистеме	Требуется большое количество экспериментальных данных для высококачественного прогноза, длительность процесса обучения	Черного ящика
Нейро-нечеткие системы управления [49-50]	управление сложными нелинейными динамическими объектами и синтез для них нелинейных законов управления	Можно использовать только ограниченное число входных переменных, длительный процесс обучения	Серого ящика

Продолжение таблицы 1.2

Модели	Преимущества Недостатки	Преимущества Недостатки	Тип модели
Мультиагентные системы управления [51]	Гибкость – агенты могут быть дополнены и модифицированы. Способность к самовосстановлению и устойчивость к сбоям	Большое количество разрозненных агентов делает систему трудно управляемой	Черного ящика
Генетические алгоритмы [52]	Решение задач оптимизации очень большой размерности при отсутствии упорядоченности исходных данных	Трудность в нахождении точного глобального оптимума, длительное время работы алгоритма, сложность программного кода	Черного ящика

*В настоящей работе рассматриваются гибридные модели, то есть построенные на нечеткой логике и искусственных нейронных сетях (модели серого ящика). Эти модели более гибки в управлении, надежны и обеспечивают снижение энергопотребления до 30%.*

## **1.4 Обзор моделей агроэкосистем (модели роста и развития растений)**

### **1.4.1 Модели агроэкосистем**

Агроэкологические модели отражают влияние почвенных и погодных условий на рост и развитие растения и формирование конечного урожая в период вегетации.

*Основной целью создания прикладных агроэкологических моделей является их использование в системах поддержки технологических решений (СПТР). Эту роль они должны выполнять наряду с экспертными системами, дополняя и уточняя рекомендации, выдаваемые этими системами в ходе вегетационного процесса. При этом модели должны обеспечить возможность проигрывания различных сценариев погоды в компьютерном эксперименте до его конкретной реализации в полевых условиях.*

Растение является центральной частью агроэкосистемы не только пространственно, но и функционально [53]. Действительно, конечной целью промышленного сельскохозяйственного производства является получение урожая. А он формируется из органов монокультуры, составляющей посев в рассматриваемой агроэкосистеме. Ценными могут являться как генеративные, так и вегетативные органы – листья (для кормовых трав), колосья (для злаков), плоды (для ягодных культур), клубни (для картофеля) и даже корни (для корнеплодов).

В классическом понимании **р о с т** – это процесс новообразования элементов структуры организма, **р а з в и т и е** - изменения в новообразовании, обусловленные прохождением жизненного цикла [54]. Простыми словами, рост определяется как совокупность количественных изменений, а развитие – как

совокупность качественных изменений структуры в течение всего жизненного цикла растения.

К р е г у л я ц и о н н ы м относят процессы, которые инициируют распознаваемые *качественные* изменения в структуре или поведении организма растения в зависимости от текущего внутреннего состояния или складывающихся внешних условий. При этом предполагается, что процессы м е т а б о л и з м а (транспорта и преобразования вещества и энергии) отвечают в основном за *количественные* изменения.

В таблице 1.3 приводятся существующие подходы к моделированию регуляторных процессов.

Таблица 1.3 Подходы и модели регуляции

Подходы и методы	Модели и схемы
Теория устойчивости. Триггерные схемы	Схема Моно-Жакоба и метод Торнли [55]
Термодинамический подход. Нестационарные системы	Пригожин, Зотин
Теория автоматов. Клеточные автоматы	Ейген, Винклер, Аптер
Формальная символическая логика	Батыгин, Демьянчук
Принцип оптимальности в биологии	Розен [56], Полуэктов, Тооминг, Сиротенко [57], Фурсова и др.

Здесь самым распространенным подходом является принцип оптимальности в биологии. Он основан на следующем [55, 56]:

- Р а с т е н и е рассматривается как сложная открытая динамическая система с определенной целью функционирования;
- Ц е л ь формируется в интерпретируемых терминах воспроизводства наиболее многочисленного и жизнеспособного потомства;
- Законы м е т а б о л и з м а известны и неизменны. Они представляют ограничения, формирующие допустимый набор траекторий развития;
- Конкретный и с с л е д у е м ы й процесс регуляции интерпретируется как программа управления метаболизмом;
- Целью регуляции (у п р а в л е н и я) является достижение оптимального показателя поставленной задачи, то есть она служит решением некоторой задачи оптимизации.

В математическом моделировании используются два подхода: *теоретический* и *эмпирический*. Теоретический подход предлагает рассмотрение сути описываемых процессов на языке физически или биологически интерпретируемых дифференциальных уравнений. Подход не требует избыточного набора опытных данных для идентификации модели. Большинство используемых моделей имеют прозрачный физический или биологический смысл.

Эмпирический подход характеризуется эвристическим описанием процессов. При этом применяются регрессионные соотношения, уравнения аллометрии, функции стресса, и т.д. Такое формальное описание на логическом уровне может хорошо отражать свойства реальной системы в терминах

“возмущение – реакция” в ограниченном классе внешних факторов. При эмпирическом подходе моделируемый объект рассматривается как “серый ящик”. Определяющие поведение системы ищутся в классе заранее заданных, качественно или логически обоснованных эвристических функции, параметры которых идентифицируются по фактически измерениям.

В настоящей работе используется второй подход - эмпирический.

#### 1.4.2 Модель “Почва – Растение – Атмосфера” и система имитационного моделирования Agrotool

Растения обитают в двух средах – в почве (подземная часть) и в приземном воздухе (надземная часть). Растения, растущие в естественных условиях природы, образуют сообщества – посевы. Они совместно с обитающими в почве микроорганизмами и т.д. образуют агроэкосистемы, играющие огромную роль в круговороте воды, энергии и минеральных веществ на Земле.

В агроэкосистеме этот круговорот осуществляется при обязательном участии Человека. Как известно, целью выращивания культурных растений является получение хозяйственно-ценной продукции. На достижение этой и направлена вся совокупность *технологических воздействии* на агроэкосистему.

В работе особое внимание уделяется системе имитационного моделирования Agrotool, так как она объединяет все рассмотренные выше модели процессов метаболизма и регуляции и реализует их в трех режимах времени, то есть до (прогноз будущего), сейчас (в реальном времени) и после (оценка прошлого) в виде единой программы. Система позволяет решать три класса задач:

- Анализ эффективности действия удобрений и других технологических мероприятий в прошлых сезонах вегетации;
- Оценка текущего состояния посева;
- Прогноз будущего развития растения при тех или иных внешних воздействиях.

Рассмотрим динамическую модель системы Agrotool, структура которой позволяет воспроизводить весь ход продукционного процесса культур, начиная от посева и кончая уборкой урожая. На вход модели подаются параметры контролируемых воздействий (агротехнических мероприятий: полива, и т.д.) и параметры неконтролируемых возмущений (погода). Влияя на условия среды, эти изменения приводят к изменению системы: вариации температуры и водного статуса почвы, прорастанию семян, росту органов, и в конечном счете, к формированию урожая.

Модель системы “Почва – Растение – Атмосфера” в дискретной форме имеет вид [54, с.14]:

$$x(k+1) = f(x(k), a, u(k), w(k)), x(0) = x_0, \quad (1.1)$$

где  $x$  – вектор состояния модели;  $a$  - вектор параметров;  $u$  – вектор контролируемых внешних воздействий (агротехника);  $w$  - вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода);  $k$  – временной шаг модели;  $x(0)$  – начальные условия модели.

Вектор состояний модели включает всю совокупность переменных системы: влагозапас в почве, глубина проникновения корней в почву, высота растений, биомасса отдельных органов, и т.д. К параметрам относятся постоянные величины в процессе счета: агрофизические константы почвы, максимальная интенсивность фотосинтеза, и т.д. Временной шаг (шаг счета) равен одним суткам (24 часам).

Для запуска модели нужно ввести значения всех параметров, данные о погоде и агротехнике и начальные условия. На начальном этапе значения некоторых параметров неизвестны. Их определение производится в ходе решения задачи *параметрической идентификации*. Для этого используются результаты специально поставленных экспериментов или полевых опытов.

Таким образом, система “Почва – Растение – Атмосфера” состоит из трех главных блоков, которые включают в себе подблоки, реализующие соответствующий процесс [54, с.277 - 278]:

1) Б л о к “П о ч в а” – описывает процессы, протекающие в почвенном слое, включающие динамику влаго- и тепло- переноса в почве, трансформации и переноса соединений азота в почве, выбора норм и сроков орошения, выбора доз азотных удобрений подкормок.

2) Б л о к “Р а с т е н и е” – описывает процессы, протекающие в растений, включающие процессы развития растения (расчет сроков наступления фенофаз), прогноза темпов развития растения, прогноза урожая, распределения накопленных продуктов фотосинтеза по органам растения.

3) Б л о к “А т м о с ф е р а” – описывает процессы, протекающие в воздушном слое, включающие турбулентный режим посева, радиационный режим посева, фотосинтез и фотодыхание, транспирация растений и испарение влаги.

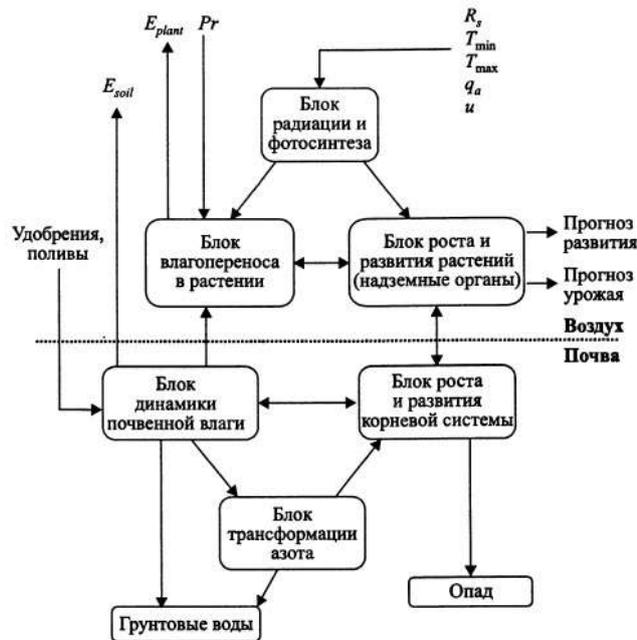


Рисунок 1.4 Модель Полуэктова Р. А. (имитационная программа Agrotool разработана группой специалистов Агрофизического института)

Блок-схема модели приведена на рисунке 1.4. Модель имеет суточный временной шаг, за исключением подблока фотосинтеза, в котором реализован часовой шаг. Иначе говоря, накопленные в процессе фотосинтеза ассимиляты рассчитываются с шагом, равным одному часу. После этого они суммируются за время светового дня. Накопленные за сутки суммарные ассимиляты являются входной переменной ростового подблока модели.

В качестве входных погодных данных используется соединяющий набор метеоданных: минимальная  $T_{min}$  и максимальная  $T_{max}$  температура воздуха, минимальная относительная влажность  $q_a$  воздуха, осадки  $w$ , скорость ветра и длительность  $R_s$  солнечного сияния. Задаются также начальные условия:  $t_0$  дата посева и  $Pr$  влагозапас в метровом слое почвы (до посева и в день посева).

Сложность моделирования процессов агроэкосистем описывается в [55-59]. Например, модель “Почва-Растение-Атмосфера” включает большое количество подсистем различной физической, химической и биологической природы и реализация такой системы очень трудоемка и потребует десятки лет.

На основе модели “Почва-Растение-Атмосфера” была реализована программно-техническая система Agrotool [54, с.276], она предназначена для использования в системах принятия технологических решений (СПТР). Поэтому в ее состав не включены интеллектуальные средства обработки информации, как нечеткие системы и нейронные сети. Она является лишь инструментом для выработки тех или иных решений и выступает в качестве интеллектуального ядра, позволяющего оценить последствия управляющих воздействий на агроэкосистему.

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость в разработке моделей, обеспечивающих и интеллектуальную обработку данных. Целью

настоящей работы и является разработка последней системы, удовлетворяющей цена-качество.

### 1.4.3 Модель расчета урожайности сельскохозяйственной культуры Лысенко С.А.

Урожайность сельскохозяйственных культур (СХК) — один из важнейших показателей эффективности всего агропромышленного комплекса, учитываемый при планировании импортно-экспортных операций на рынке сельхозпродукции. Стандартные методы сбора информации об урожайности на уровне страны и ее административных единиц часто субъективны и не обеспечивают необходимой оперативности и заблаговременности. С развитием технологий дистанционного зондирования Земли из космоса появилась возможность проводить мониторинг состояния посевов на обширных территориях оперативно и с минимальными финансовыми затратами.

Подробно рассмотрим модель Лысенко для расчета урожайности сельскохозяйственной культуры на  $i$ - сутки вегетационного периода [60]:

$$Y = \gamma \sum_{i=1}^N F_{TOA,i} \times NDVI_i \times \eta_1(T_i) \times \eta_2(W_i) \times (1 - R(T_i)), \quad (1.4)$$

где  $\gamma$  - эмпирический коэффициент, зависящий от региона,  $NDVI_i$  – вегетационный индекс растения.

Уравнение (1.4) описывает прирост биомассы за заданный интервал времени:

$$NPP_i = PAR_i \times FAPAR_i \times LUE(T_i, W_i, CO_2, \dots) \times (1 - R_i), \quad (1.5)$$

где  $i$  – номер расчетного периода,  $NPP_i$  – чистая первичная продукция органического вещества (гр. сухой биомассы/м<sup>2</sup>/период),  $PAR_i$  - энергия солнечного излучения, поступающего за заданный отрезок времени на поверхность,  $FAPAR_i$  - доля ФАР фотосинтетически активной радиации, поглощаемая пигментами зеленого листа,  $LUE$  – эффективность преобразования поглощенной растительностью ФАР в органическое вещество, которое зависит от метеорологических условий:  $T_i$  – температура воздуха,  $W_i$  – содержание влаги в почве,  $CO_2$  – концентрация углекислого газа в атмосфере,  $R_i$  – доля затрат органического вещества на дыхание живой массы.

Функции, входящие в уравнение (1.5) приведены ниже. Эффективность использования солнечной радиации для фотосинтеза задается в виде произведения двух функции  $\eta_1$  и  $\eta_2$ . Функция  $\eta_1$  определяет оптимум температуры и зависит от типа растительности. Функция  $\eta_2$  определяет оптимум влажности почвы.

$$\eta_1(T) = \exp\left\{-a((T - T_{opt})/10)^2\right\}, \quad (1.6)$$

где  $T$  и  $T_{opt}$  – фактическая и оптимальная температура воздуха.

$$\eta_2(W) = 1 - [(W - W_{opt}) / W_{opt}]^2, \quad (1.7)$$

где  $W$  и  $W_{opt}$  – фактическая и оптимальная влажность почвы.

Затраты биомассы на дыхание  $R(T)$  рассчитываются в зависимости от температуры воздуха  $T$  и базисной температуры дыхания  $T_R$ .

$$R(T) = R_0 \cdot 2^{(T-T_R)/10}, \quad (1.8)$$

$$F_{BOA} = F_{TOA}(t_d)[A\sqrt{T_{max} - T_{min}} + B\sqrt{1 - CF}], \quad (1.9)$$

где  $F_{BOA}$  – поток полной солнечной радиации (прямой и рассеянной) на нижней границе атмосферы,  $F_{TOA}$  – средний поток солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы за день,  $t_d$  – время в днях с начала года,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  – максимальная и минимальная дневная температура воздуха,  $CF$  – облачность,  $A$  и  $B$  – эмпирические константы, зависящие от географических координат.

$$F_{TOA}(t_d) = F_0 [1 + 0.033 \cos(\frac{360t_d}{365})] \cos \varphi, \quad (1.10)$$

где  $F_0 = 1367$  Вт/м<sup>2</sup> – солнечная постоянная,  $\cos \varphi$  – средний косинус зенитного угла Солнца в данное время года.

Преимущество модели в том, что она использует данные спутниковых измерений вегетационного индекса растений, коррелирующих с урожайностью.

### **1.5 Технологии интеллектуальной обработки данных на основе нечеткой логики и нейронных сетей**

Так как в настоящей работе рассматриваются только модели черного и серого ящика, основанные на интеллектуальных технологиях обработки данных. Рассмотрим их подробнее.

Мониторинг и управление процессами микроклимата теплиц приходится осуществлять в условиях информационной неопределенности [61, 62]. Указанная неопределенность выражается в отсутствии точных математических моделей, описывающих характер изменения контролируемых параметров и их взаимовлияние. Кроме того, ведение технологических процессов в теплицах характеризуется наличием значительного числа непрогнозируемых возмущений. При названных обстоятельствах применение традиционных методов контроля не является эффективным. В частности, известные системы контроля, использующие эмпирические зависимости между влажностью и температурой воздуха в теплице, не позволяют добиться высокой точности контроля указанной влажности воздуха.

Поэтому на сегодняшний день для преодоления указанной проблемы весьма эффективным представляется использование систем контроля, основанных на современных средствах вычислительной техники и интеллектуальных технологиях анализа информации и принятия решений. Кроме того,

использование интеллектуальных технологий обработки информации в системах контроля параметров микроклимата позволяет добиться высокой эффективности контроля указанных параметров, даже, при наличии весьма ограниченной информации о контролируемых объектах.

Использование н е й р о н н ы х с е т е й в системах контроля и управления. Идея разработки и создания нейронных сетей (НС), в том числе и в системах контроля технологических параметров, опирается на известные положения функционирования биологического нейрона [63-65].

Обычно НС состоит из множества, связанных между собой нейронов, количество связей может составлять тысячи.

Благодаря нелинейности функций активации и большому числу настраиваемых коэффициентов (параметров) НС может выполнять достаточно точно нелинейное отображение множества входных сигналов во множество выходных. Процедура идентификации параметров называется "о б у ч е н и е м" сети. Для "обучения" нейронной сети обычно используются методы градиентного поиска минимума критериальной функции  $\varepsilon = (y^* - y)$ , зависящей от параметров нейронов, где  $y$  - текущее значение выхода НС,  $y^*$ - заданное значение выхода НС.

Недостатком НС является представление выходной информации в специальном виде, которое может существенно отличаться от возможной содержательной интерпретации существующих взаимосвязей. Кроме того, реализация нейронных сетей требует использования больших компьютерных мощностей, что не всегда оправдано.

Для решения описанной выше задачи весьма эффективным представляется использование методов н е ч е т к о й л о г и к и, в частности метода нечеткого логического вывода [66-69].

Использование нечеткой логики в идентификации сложных нелинейных зависимостей обладает следующими достоинствами:

- алгоритм идентификации на основе нечеткого логического вывода более прост для понимания, чем аналогичные алгоритмы на основе дифференциальных или разностных уравнений;
- простота реализации по сравнению с традиционными математическими методами идентификации;
- сравнительно небольшой объем вычислений.

В основе теории нечеткой логики лежит понятие нечеткой и лингвистической переменной. Это обстоятельство позволяет использовать в нечеткой логике понятные высказывания "мало", "много", "норма" и позволяет эффективно использовать априорную информацию, получаемую от экспертов в привычной для них лингвистической форме.

Использование только нечеткой логики, или только нейронных сетей в прикладных задачах, ведет к ограничению использования их возможности. Поэтому правомерным является подход, который использует все их возможности, объединяя их в общую сеть. Такие сети получили название гибридных сетей. На практике широко используется гибридная сеть ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), предложенная Янгом [70].

В настоящее время создан ряд программных продуктов для практического использования нечетких множеств, позволяющих синтезировать модели нечетких множеств, не имея квалификации программиста. Один из них - это программная среда Matlab, которая обеспечена наиболее развитыми пакетами Simulink и Fuzzy Logic Toolbox [71].

## 1.6 Технологические процессы и умное управление в современных теплицах

Приведем определение “Смарт теплица” – это революция в сельском хозяйстве, которая создает саморегулирующий микроклимат, подходящий для роста растений, благодаря использованию датчиков, исполнительных механизмов и систем контроля и управления, которые оптимизируют условия роста и автоматизируют процесс выращивания [72, 73].

Внедрение умных технологий в тепличное хозяйство требует от фермера научного подхода: необходимо правильно настроить сбор данных, уметь их анализировать и принимать оперативные решения, исходя из экономических параметров.

«Умные» технологии, применяемые в тепличном хозяйстве можно объединить в четыре больших кластера [74]:

1. Точное сельское хозяйство (навигационные системы, дистанционное зондирование (ДЗЗ) и геоинформационные системы (ГИС), дифференциальное внесение удобрений);

2. Сельскохозяйственные роботы (беспилотные летательные аппараты, дроны для слежения за состоянием полей и сбором урожая, умные сенсорные датчики).

3. IoT-платформы/IoT-приложения (контроль данных, поступающих с датчиков, техники и других устройств);

4. Big Data (анализ данных, получаемых с датчиков для составления точного прогноза и стратегии).

Подробно рассмотрим третий кластер – *Аграрные IoT-платформы и IoT-приложения*. Они позволяют **автоматизировать весь цикл** сельскохозяйственных операций по выращиванию растений. Обязательными составляющими таких решений являются:

1. Периферийное оборудование (датчики, сенсоры).

2. Каналы связи (спутниковая связь GPS/ГЛОНАСС, LPWAN, LTE, 3G, GPRS, GSM).

3. IoT-платформы (web-платформы для создания отраслевых приложений).

4. IoT-приложения (приложения для ИТ-платформ, самостоятельные приложения для конкретного оборудования).

В современных смарт теплицах реализуются следующие технологические процессы (ТП) [75]: орошение, освещение, вентиляция, отопление. Они обеспечивают оптимальные условия роста и развития растений, которые были рассмотрены в пункте 1.2.

*Система орошения.* Одно из перспективных направлений совершенствования технологии полива в промышленных теплицах заключается в применении капельного орошения (рисунок 1.5).

Принцип капельного орошения заключается в подаче требуемого количества влаги и питательных веществ непосредственно к корневой зоне растений, что позволяет обеспечить оптимальный водно-воздушный и питательный режимы тепличного грунта (субстрата), позволяет растениям индивидуально получать питательные вещества, повышает урожайность, сокращает расход воды и удобрений, снижает заболеваемость растений и возможность распространения болезней.

Растворный узел предназначен для приготовления питательного раствора заданной концентрации (ЕС) и с оптимальным значением рН, путём смешивания с водой двух или более маточных растворов и кислоты.

Качественное и непрерывное смешение происходит в регулируемых смесителях. Компьютер контролирует параметры питательного раствора и поддерживает их на заданном уровне.

Распределительная сеть обеспечивает равномерное поступление раствора к каждому растению с помощью комплекса трубопроводов и капельниц. Питательный раствор из растворного узла поступает в магистральный ПВХ трубопровод. Далее через регулировочные вентили и электромагнитные клапаны, управляемые компьютером, раствор поступает в раздаточный трубопровод, проложенный по краям теплицы.



Рисунок 1.5 Система капельного орошения

*Система освещения: двойное экранирование и досвечивание.* Система зашторивания является одной из важных составляющей современной теплицы, влияющей на микроклимат и обеспечивающей ее экономичность. С помощью зашторивания можно регулировать освещенность, температуру и влажность.

Тепличные комплексы оснащены горизонтальными и вертикальными экранами. Горизонтальное зашторивание, располагается вверху теплицы, под кровлей; вертикальное зашторивание закрывает боковое остекление теплицы. Использование двойного экрана обеспечивает улучшение микроклимата теплицы. Таким образом, в теплые дни можно избежать сильного солнечного облучения растений и также значительно экономить тепло, особенно в

холодные периоды. Затенение производственных площадей создает также благоприятные условия труда.

Ассимиляционное освещение (досветка). В зимнее время естественного освещения часто бывает недостаточно для нормального роста. Соотношение между количеством получаемого дневного света и потребностью в дополнительном искусственном освещении нуждается в тщательном изучении. Дополнение естественного освещения искусственным ассимиляционным может вызвать значительный рост продуктивности (рисунок 1.6). Искусственный свет, используемый в целях ассимиляционного освещения, должен удовлетворять двум важным критериям: источник света должен иметь высокий световой поток и свет должен иметь правильный спектральный состав.



Рисунок 1.6 Система освещения – досветки

*Система отопления.* Современные, экономичные и надежные системы отопления состоят из теплообменника, преобразующий пар в горячую воду, и сети трубопроводов состоящих из 4-х контуров отопления в теплицах (рисунок 1.7). Предусматривается обогрев крыши, торцов, лотков для слива осадков, ростовой зоны.

Нижний уровень отопления – труборельсовый, служащий одновременно для передвижения тележек для сбора продукции. В расчетах системы отопления принимается реальный перепад наружных температур, который обеспечит работоспособность всего тепличного комплекса в любом регионе. Требование к этим системам - безаварийная эксплуатация при простом обслуживании.



Рисунок 1.7 Система отопления

*Система охлаждения (туманообразования).* Данная система позволяет поднять уровень влажности и понизить температуру в теплице. При дозировании  $\text{CO}_2$  в теплице появляется возможность достижения более высокого уровня  $\text{CO}_2$  за счёт меньшего открытия вентиляционных форточек.

Вследствие использования специальных распылительных форсунок высокого давления размер капелек микроскопичен, т.о. они испаряются прежде, чем достигнут растений, что предотвращает их от намокания.

*Система вентиляции.* Для создания оптимальной температуры и влажности воздуха в теплице существуют две системы вентиляции: естественная (путем открывания и закрывания форточек на крыше теплиц) (рисунок 1.8), и принудительная (вентиляторы, установленные внутри теплицы, которые перемещают воздух).

Использование вентиляторов циркуляции воздуха – наилучшее решение для контроля климата в теплицах. Циркуляция воздуха позволяет предотвратить образование холодных или горячих зон внутри теплицы, гарантируя оптимальное управление микроклиматом. Особенно актуальна циркуляция воздуха в зимний период при редком открытии форточек, когда нужно минимизировать разницу температуры и влажности в разных точках теплицы. Циркуляция воздуха стимулирует рост, уменьшает заболеваемость, связанную с влажностью, и предотвращает разницу в развитии растений.



Рисунок 1.8 Система естественной вентиляции

Обзор схем реализации систем управления микроклиматом и их сравнительная характеристика приводится в таблице 1.4 [76].

Таблица 1.4 Схемы реализации систем микроклимата теплиц

Аналоговая схема	Цифровая схема	Микропроцессорная схема		Миконтроллерная схема	
		Автономная	Встроенная	Микроавто-Матизация	Комплексная автоматизация
КТ-1, УТ12У3 (СССР)	ТРМ138, ТСМ-50 (СССР)	Овен ПЛК-150, Ремиконт Р-130 (Россия)	Xiomi (Китай)	Siemens LOGO! (Германия) Arduino Uno, Arduino Mega (Италия), ESP2866, ESP 32 (Китай), Raspberry Pi (Великобритания)	Siemens Simatic S7 (Германия)

Обзор отечественного рынка IoT-приложений показал, что отечественные агрофирмы используют в основном зарубежное оборудование. Нередко затраты на оборудование превышают затраты на строительство самих теплиц. Поэтому внутренний агрорынок *нуждается в отечественных доступных IoT устройствах.*

### 1.7 Прогрессивные технологии в тепличном хозяйстве и возможности их применения с точки зрения критерия цена - качество

Известно, что ключевым требованием к разработке и внедрению смарт-теплиц является критерий *цена/качество*. Очевидно, чем выше качество, тем выше стоимость разработки и наоборот. Необходимо разработать систему, обеспечивающую и требуемое качество и низкую цену одновременно.

Одной из ключевых проблем разработки современных теплиц является построение системы, удовлетворяющей критерию цена/качество [77]:

- 1 – повышение качества обслуживания (точность и быстрдействие);
- 2 – снижение стоимости затрат на строительство и оборудование (доступность широкому пользователю) теплицы.

Таблица 1.5 Прогрессивные технологии в тепличном хозяйстве

Технология	Функция в области ИТ	Достоинства и недостатки (по критерию цена-качество)	Доступность широкому пользователю
------------	----------------------	--	-----------------------------------

Фитомониторинг [78, 79]	Контроль ТП	Повышается качество за счет непрерывного контроля всех процессов роста и развития растения. Цена относительно дорогая.	Пока нет массового производства и широкого применения технологии.
Точное земледелие и капельное орошение [80-83]	Контроль и управление ТП	Повышается точность управления водным режимом и снижение потерь водных ресурсов (примерно на 30-60%). Цена доступная.	Да.
Интеллектуальные технологии на ПЛК [84-86], IoT-устройства [87-91]	Контроль и Управление ТП	Автоматизация труда, точность и быстрота обработки данных. Сложность разработки. Требует особых знаний. Стоимость разработки относительно дорогая, если сделать заказ специалисту.	Пока нет.
Гидропоника/ Аэропоника [92, 93]	*Эти технологии не относятся к ИТ технологиям.	Повышает качество получения урожая посредством выращивания растений в воде/воздухе. Требует особых знаний в области биологии и специального оборудования. Цена относительно дорогая.	Нет.
Генная инженерия [23, с. 163]	*Эти технологии не относятся к ИТ технологиям.	Повышает качество получения сортов культур. Требует особых знаний в области биологии и специального оборудования. Цена относительно дорогая.	Нет.

В таблице 1.5 приведены прогрессивные технологии в тепличном хозяйстве. Среди них фитомониторинг занимает особое место.

Фитомониторинг – одна из передовых достижений в тепличном хозяйстве, которая выполняет непосредственный и непрерывный контроль за процессом роста растений, направленный на усовершенствование управляемых факторов урожайности. По мнению экспертов, в ближайшем будущем именно применение фитомониторинга станет мировым стандартом развитого сельского хозяйства [79, с.3].

Эта технология включает в себя три составляющие: 1 – регулярный визуальный осмотр специалистами, отборы образцов растений, оценка общего состояния; 2 – систематические лабораторные анализы растений, почвы, поливной воды; 3 - непрерывная обработка информации, поступающей из станций фитомониторинга (датчиков контроля). Но, однако широкое внедрение последней технологии ограничено несколькими причинами. Растение – это живой организм, реализующий несколько функции – поддержание стационарного внутреннего состояния (иммунитет), с одной стороны, приспособление и адаптация к внешним условиям (выживание). Поэтому до сих пор существует проблема сложности анализа состояния растения

(биологическая проблема), и сложности разработки оборудования для контроля состояния растения (техническая проблема).

Из сказанных причин большинство недорогих теплиц используют схемы управления без учета состояния объекта исследования – растения. Это большой недостаток таких систем [29, с. 389].

В таблицах 1.6 и 1.7 приводится список использованных технологических решений для реализации предлагаемой умной теплицы [29, с. 392; 76, с. 403].

Учитывая достоинства и недостатки рассмотренных схем и технологий, для реализации системы управления теплицей предлагается использовать интеллектуальные технологии и современные IoT устройства [77, с. 4].

Таблица 1.6 Сравнительный анализ схем реализации систем микроклимата

Критерий	Аналого- вая схема	Цифровая схема	Микропроцессорная схема		Миконтроллерная схема	
			Автономная	Встроенная	Микро- автомати- зация	Комплексная автоматизация
Точность	низкая	Низкая	высокая	высокая	высокая	высокая
Простота использования и надежность	низкая	Низкая	средняя	высокая	высокая	высокая
Энергосбережение	-	-	есть	есть	Есть	есть
Цена	низкая	низкая	средняя	средняя	средняя	высокая
Связь и передача данных	-	-	средняя	высокая	высокая	высокая
Быстродействие и хранение данных	-	-	средняя	высокая	высокая	высокая
Перепрограммирование	-	-	есть	есть	есть	есть
Универсальность	-	-	низкая	средняя	средняя	высокая

Таблица 1.7 Технологические решения, обеспечивающие критерий цена-качество в настоящей модели

Технологические решения	Цена -> min	Качество -> max
Соблюдение агротехнических норм	*	Контроль ТП по охлаждению, поливу и освещению теплицы.
Минимизация размеров теплицы - минитеплица	Экономия ресурсов и энергии.	*
Применение	Экономия трудовых	1 – Оценка качества роста растения;

интеллектуальных технологий	ресурсов.	2 – Умное управление ТП Микроклимата.
Использование технологии фитомониторинга	*Зависит от рационального использования технологии и ресурсов	Качество контроля обеспечивается с помощью экспертной системы 1 экспертной системы.
Использование точного земледелия и капельного орошения	Экономия водных ресурсов.	Точное распределение водных ресурсов.
Использование подручных материалов (пластик ПВХ, пленка, и т.д.)	Экономия строительных материалов.	*Зависит от рационального использования технологии и ресурсов
Использование открытого ПО Open Source	Доступность и открытость разработки ПО.	*Зависит от рационального использования технологии и ресурсов

### Выводы по первой главе

В первой главе был проведен анализ рынка овощей РК, обзор моделей агроэкосистем (рост и развитие растений), моделей микроклимата теплиц, модели урожайности СХК. Подробно описана модель “Почва – Растение - Атмосфера” Полуэктова Р.А., модель Лысенко С.А. для расчета урожайности СХК в зависимости от условий окружающей среды.

Также рассматриваются прогрессивные технологии в тепличном хозяйстве и возможности их применения с точки зрения критерия цена – качество.

Анализ рынка овощей показал, что отечественный производитель может обеспечить овощами и фруктами только 20% населения. Чтобы полностью круглый год обеспечить население нужно построить более 150 га промышленных теплиц. Это говорит о том, что существующая проблема импорта в Казахстане является актуальной.

По результатам первой главы можно сделать следующие **рекомендации**:

- для решения проблемы импорта в Казахстане необходимо наладить производство отечественных, доступных широкому населению систем автоматизации контроля и управления ТП теплицы.
- построить математическую модель “Растение – Среда – Ситуация - Управление” в виде экспертной системы, позволяющей выполнять идентификацию текущей ситуации в условиях нечеткой информации и в зависимости от этой ситуации принимать эффективное решение;
- для реализации смарт-системы управления теплицей предлагается использовать интеллектуальные технологии и современные IoT устройства.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МОДЕЛЬ “РАСТЕНИЕ – СРЕДА – СИТУАЦИЯ - УПРАВЛЕНИЕ”

### 2.1 Постановка задачи принятия решения с помощью экспертной системы и алгоритм ее обучения

#### 2.1.1 Структура нечеткого логического вывода

Задачи идентификации, то есть построения математической модели по результатам наблюдений, являются важными прикладными задачами во многих областях науки и техники. В современной теории идентификации все более важную роль играют методы, использующие лингвистическую информацию при построении нелинейных зависимостей [69, с. 9].

Известно, что нечеткий логический вывод - это аппроксимация зависимости «входы-выход» модели на основе лингвистических высказываний типа «ЕСЛИ-ТО» и операций над нечеткими множествами. Структура модели нечеткого логического вывода содержит блоки (рисунок 2.1):

- *фаззификатор* преобразует фиксированный вектор влияющих факторов  $X$  в вектор нечетких множеств  $\tilde{X}$ , необходимых для выполнения нечеткого вывода;
- *нечеткая база знаний* содержит сведения о зависимости  $Y = f(X)$  в виде лингвистических правил типа “IF – THEN”;
- *машина нечеткого логического вывода* основе правил Базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества  $\tilde{Y}$ , соответствующего нечетким значениям входных переменных  $\tilde{X}$ ;
- *дефаззификатор* преобразует выходное нечеткое множество  $\tilde{Y}$  в четкое число  $Y$ .

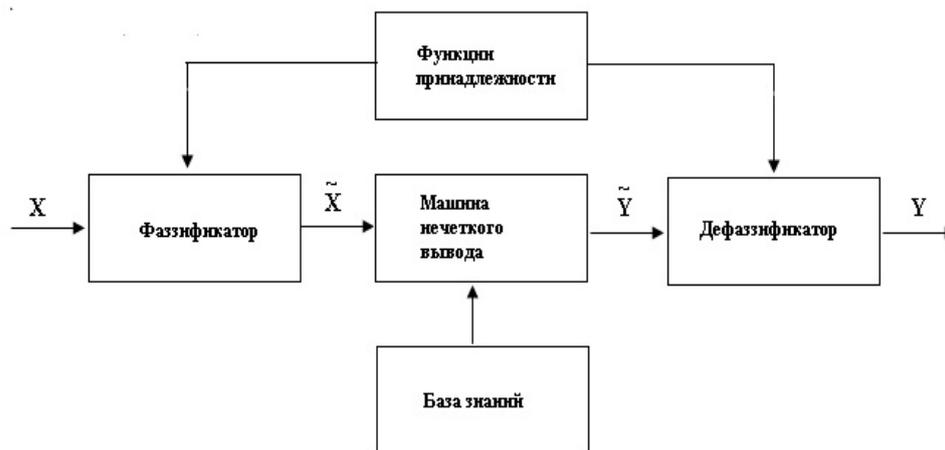


Рисунок 2.1 Структура нечеткого логического вывода

Задача идентификации решается в два этапа.

Первый этап - *структурная идентификация* - представляет собой формирование нечеткой базы знаний, которая грубо отражает взаимосвязь между входами и выходом модели с помощью лингвистических правил

«ЕСЛИ-ТО». Лингвистические правила генерируются экспертом, либо получаются в результате экстракции нечетких знаний из экспериментальных данных.

Между первым и вторым этапом осуществляется *нечеткий логический вывод* на основе правил Базы знаний, сгенерированных на первом этапе.

На втором этапе проводится *параметрическая идентификация* исследуемой зависимости путем нахождения таких параметров нечеткой базы знаний, которые минимизируют отклонение модельных и экспериментальных результатов.

### 2.1.2 Постановка задачи принятия решения с помощью экспертной системы

Заданы *экспертные матрицы знаний* (ЭМЗ) моделей двух типов: Мамдани (непрерывный выход) и Сугено (дискретный выход).

ЭМЗ модели первого типа описывает зависимость между входами и непрерывным выходом объекта управления с помощью правил [69, с. 10]:

$$\begin{aligned}
 &u_{j=1,1}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j1}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j1}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j1})] \text{ (с весом } w_{11}) \\
 &\quad \text{ТО } y \in d_1 \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &u_{j=1,2}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j2})] \text{ (с весом } w_{12}) \\
 &\quad \text{ТО } y \in d_1 \\
 &\quad \dots \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &u_{j=2,1}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j1})] \text{ (с весом } w_{21}) \\
 &\quad \text{ТО } y \in d_2 \\
 &u_{j=2,2}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ AND } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j2})] \text{ (с весом } w_{22}) \\
 &\quad \text{ТО } y \in d_2 \\
 &\quad \dots \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &\dots \dots \dots \\
 &u_{jp}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,jk(j)}) \text{ И } (x_2 = a_{2,jk(j)}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,jk(j)})] \text{ (с весом } w_{jp}) \\
 &\quad \text{ТО } y \in d_j = [y_{j-1}, y_j), \text{ для всех } j = \overline{1, m}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

(2.2) можно записать в компактной форме:

$$u_{jp}: \bigcup_{p=1}^{k_j} \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \rightarrow y \in d_j \tag{2.2}$$

Введем обозначения для ЭМЗ (2.1, 2.2) в виде:

- *выходной переменной*  $y$ , определенной на  $[y, \bar{y}]$ , которая делится на  $m$  подынтервалов, где находятся решения  $d_j, j = \overline{1, m}$ :

$$[y, \bar{y}] = [y, y_1) \cup [y_1, y_2) \cup \dots \cup [y_{j-1}, y_j) \cup \dots \cup [y_{m-1}, \bar{y}) \tag{2.3}$$

- множества входных переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;
- терм-множества  $A_i$  входной переменной  $x_i, i = \overline{1, n}, A_i = \{\text{очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая}\}$ ;
- диапазонов изменений каждой входной переменной  $x_i \in [x_i, \overline{x_i}], i = \overline{1, n}$ ;
- функции принадлежности (ФП) входных переменных  $X$ , позволяющих представить переменные  $x_i, i = \overline{1, n}$  в виде нечетких множеств

$$a_i^{jp} = \int_{x_i}^{\overline{x_i}} \mu_{jp}(x_i) / x_i, x_i \in [x_i, \overline{x_i}]; \quad (2.4)$$

- ФП выходной переменной  $\mu(d_j), (j = \overline{1, m})$  в виде нечетких множеств;
- правил баз знаний  $u_{jp} \in U$ , характеризующихся определенным весом  $w_{jp}$  и параметрами ФП, входящих в эти правила.

ЭМЗ модели второго типа описывает зависимость между входами и дискретным выходом объекта управления с помощью правил [69, с. 10]:

$$\begin{aligned}
 &u_{j=1,1}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j1}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j1}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j1})] \text{ (с весом } w_{11}) \\
 &\quad \text{ТО } y = d_1 \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &u_{j=1,2}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j2})] \text{ (с весом } w_{12}) \\
 &\quad \text{ТО } y = d_1 \\
 &\quad \dots \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &u_{j=2,1}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j1})] \text{ (с весом } w_{21}) \\
 &\quad \text{ТО } y = d_2 \\
 &u_{j=2,2}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,j2}) \text{ AND } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j2})] \text{ (с весом } w_{22}) \\
 &\quad \text{ТО } y = d_2 \\
 &\quad \dots \qquad \qquad \qquad \text{ИЛИ} \\
 &u_{jp}: \text{ЕСЛИ } [(x_1 = a_{1,jk(j)}) \text{ И } (x_2 = a_{2,jk(j)}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,jk(j)})] \text{ (с весом } w_{jp}) \\
 &\quad \text{ТО } y = d_j, j = \overline{1, m} \qquad \qquad \qquad (2.5)
 \end{aligned}$$

(2.5) можно записать в компактной форме:

$$U_{jp}: \bigcup_{p=1}^k \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \rightarrow y = d_j \quad (2.6)$$

Введем обозначения для ЭМЗ (2.5, 2.6) в виде:

- множества решений  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, j = \overline{1, m}$ , соответствующих выходной переменной  $y$ .
- множества входных переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;

- терм-множества  $A_i$  входной переменной  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $A_i = \{\text{очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая}\}$ ;
- диапазонов изменений каждой входной переменной  $x_i \in [x_i^-, x_i^+]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;
- функции принадлежности (ФП), позволяющих представить переменные  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  в виде нечетких множеств вида (2.4)
- правил баз знаний  $u_{jp} \in U$ , характеризующихся определенным весом  $w_{jp}$  и параметрами ФП, входящих в эти правила.

### 2.1.3 Алгоритмы принятия решения с помощью экспертной системы

Построим алгоритм принятия решения с помощью ЭМЗ типа Мамдани для  $y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ , которые соответствуют вектору фиксированных значений входных переменных  $X_0 = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$  с помощью заданной ЭМЗ вида (2.1) - (2.2). Он состоит из шагов:

- 1) фиксация вектора значений входных переменных  $X_0 = \langle x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} \rangle$ ;
- 2) задание функции принадлежности  $\mu^{jp}(x_i)$ ;
- 3) формирование БЗ (матрица знаний вида (2.1));
- 4) составление системы логических уравнений вида на основе:

$$\mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigvee_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j = \overline{1, m} \quad (2.7)$$

5) расчет значений ФП  $\mu^{jp}(x_i)$  при фиксированных значениях входных переменных  $\langle x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} \rangle$ , при выборе, например, гауссовой функции принадлежности ее значение будет:

$$\mu^{jp}(X_0, P(b, c)) = \frac{1}{1 + \left( \frac{X_0 - b_i^{jp}}{c_i^{jp}} \right)^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad p = \overline{1, k_j} \quad (2.8)$$

6) вычисление функции принадлежности выхода  $\mu^{d_j}(y)$  классу  $d_j \in [y_{j-1}, y_j]$  ( $j = \overline{1, m}$ ) на основе (2.8). При этом логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над ФП заменяются на операции *min* и *max*:

$$\mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) = \max_{p=1, k_j} \left\{ \min_{i=1, n} \left[ \mu^{jp}(X_0) \right] \right\} \quad (2.9)$$

7) в качестве решения  $d_j^*$  выбирают класс с максимальной степенью принадлежности:

$$\mu^{d_j^*}(y) = \arg \max_{\{d_1, d_2, \dots, d_m\}} \max_{j=1, m} (\mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})) \quad (2.10)$$

8) определение значения выхода модели  $y \in D$  с помощью операции дефаззификации:

$$y = \frac{d_1 \mu^{d_1}(y) + d_2 \mu^{d_2}(y) + \dots + d_{m-1} \mu^{d_{m-1}}(y) + d_m \mu^{d_m}(y)}{\mu^{d_1}(y) + \mu^{d_2}(y) + \dots + \mu^{d_m}(y)} \quad (2.11)$$

Рассмотрим алгоритм принятия решения с помощью экспертной системы типа Сугено. Построим алгоритм принятия решения для  $y = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ , которые соответствуют вектору фиксированных значений входных переменных  $X_0 = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$  с помощью заданной ЭМЗ вида (2.5) - (2.6). Он состоит из шагов:

- 1) фиксация вектора значений входных переменных  $X_0 = \langle x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} \rangle$ ;
- 2) задание функции принадлежности входных переменных  $\mu^{jp}(x_i)$ .
- 3) формирование БЗ (матрица знаний вида (2.5));
- 4) составление системы логических уравнений вида на основе (2.1):

$$\mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigvee_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j = \overline{1, m} \quad (2.12)$$

5) расчет значений ФП  $\mu^{jp}(x_i)$  при фиксированных значениях входных переменных  $\langle x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} \rangle$  при выборе, например, гауссовой функции принадлежности ее значение будет:

$$\mu^{jp}(X_0, P(b, c)) = \frac{1}{1 + \left( \frac{X_0 - b_i^{jp}}{c_i^{jp}} \right)^2}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k_j} \quad (2.13)$$

6) вычисление функции принадлежности  $\mu^{d_j}(y)$  выхода  $y$  классу  $d_j \in [y_{j-1}, y_j]$  ( $j = \overline{1, m}$ ) на основе (2.11). При этом логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над ФП заменяются на операции *min* и *max*:

$$\mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) = \max_{p=1, k_j} \left\{ \min_{i=1, n} \left[ \mu^{jp}(X_0) \right] \right\} \quad (2.14)$$

7) в качестве решения  $d_j^*$  выбирают класс с максимальной степенью принадлежности:

$$\mu^{d_j^*}(y) = \arg \max_{\{d_1, d_2, \dots, d_m\}} \left( \mu^{d_j}(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) \right) \quad (2.15)$$

#### 2.1.4 Параметрическая идентификация и обучение гибридной сети

Рассмотрим задачу параметрической идентификации гибридной сети и алгоритм ее обучения. Гибридная сеть представляет собой нейро-нечеткую сеть, объединяющуюся в себя и нечеткую систему (экспертную систему) и нейронную сеть.

Задача параметрической идентификации состоит в нахождении нечеткой модели  $F$ , обеспечивающей минимум среднеквадратического отклонения (СКО) по формуле

$$\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M [Y_r - F(I, O, X_r)]^2 \rightarrow \min, \quad (2.16)$$

где  $I$  – входной вектор параметров ФП входной переменной,  $O$  – вектор параметров ФП выходной переменной,  $(X_r, y_r)$  – выборка данных;  $X_r = (X_{r1}, X_{r1}, \dots, X_{rn})$  – вектор входов;  $Y_r$  – выход в  $r$ -паре ( $r = \overline{1, M}$ );  $M$  – объем выборки.

Задача решается в два прохода: прямой и обратный ход. На прямом ходе определяется теоретический выход (значения выхода модели  $y$ ), а на обратном ходе – по вычисленным ошибкам среднеквадратического отклонения ошибка между теоретическим и практическим выходами (обучающейся выборкой) корректируются веса правил и параметры ФП.

Алгоритм параметрической идентификации:

1) Задается объект управления вида

$$y = F(X_r, I, O, W), \quad (2.17)$$

для которого связь “входы ( $x_i$ ) – выход ( $y$ )” можно выразить в виде экспертной матрицы (базы) знаний.

Эта экспертная БЗ отличается от обычной БЗ (2.1, 2.5) тем, что содержит дополнительно веса  $W$ . Значение весов  $W$  – число в диапазоне  $[0, 1]$ , характеризующее меру уверенности эксперта по определенному высказыванию,  $P$  – вектор параметров ФП входной переменной  $X$ .

2) Задается обучающая выборка  $(X_r, y_r)$ ,  $r = \overline{1, M}$ , где  $X_r = (X_{r1}, X_{r1}, \dots, X_{rn})$  – вектор входов и  $y_r$  – выход в  $r$ -паре;  $M$  – объем выборки.

3) Задается гибридная (нейро-нечеткая) сеть ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) (рисунок 2.2) [70, с. 52]:

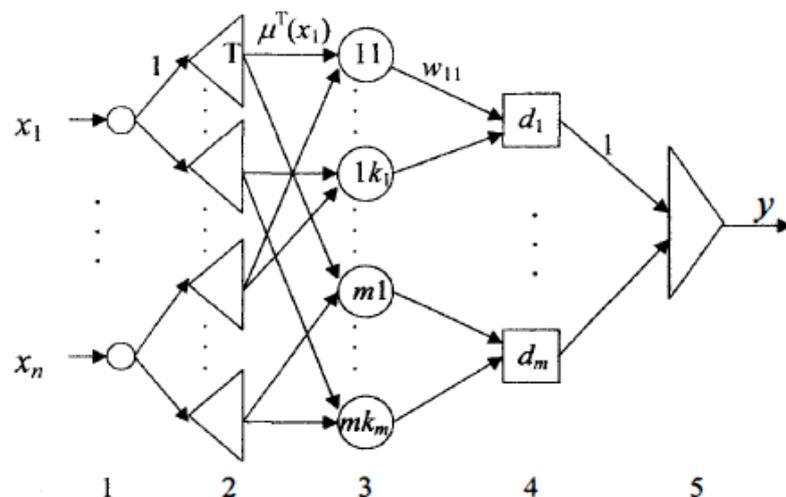


Рисунок 2.2. Структура гибридной сети ANFIS

4) Прямой ход - определяются значения выхода модели  $y$ , соответствующие заданной архитектуре гибридной сети.

ANFIS-сеть функционирует следующим образом:

Слой 1. Каждый узел первого слоя представляет один терм с колоколообразной функцией принадлежности. Входы сети  $x_1, x_2, \dots, x_n$  соединены только со своими термами. Количество узлов первого слоя равно сумме мощностей терм-множеств входных переменных. На выход узла подается степень принадлежности значения входной переменной соответствующему нечеткому терму:

$$\mu_r(x_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c}{a} \right|^{2b}}, \quad (2.18)$$

где  $a, b, c$  – настраиваемые параметры функции принадлежности.

Слой 2. Количество узлов второго слоя равно  $m$ . Каждый узел этого слоя соответствует одному нечеткому правилу. Узел второго слоя соединен с теми узлами, которые формируют антеценты соответствующего правила. Следовательно, каждый узел второго слоя может принимать от 1 до  $n$  сигналов. Выходом узла является степень выполнения правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов. Обозначим выходы узлов этого слоя через  $\tau_{r=1,m}$ .

Слой 3. Количество узлов второго слоя также равно  $m$ . Каждый узел этого слоя рассчитывает относительную степень выполнения нечеткого правила по формуле:

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=1,m} \tau_j}. \quad (2.19)$$

Слой 4. Количество узлов четвертого слоя также равно  $m$ . Каждый узел соединен с одним узлом третьего слоя, а также со всеми входами сети. Он рассчитывает вклад одного нечеткого правила в выход сети по формуле:

$$y_r = \tau_r^* + (b_{0,r} + b_{1,r} x_1 + \dots + b_{n,r} x_n). \quad (2.20)$$

Слой 5. Единственный узел этого слоя суммирует вклады всех правил:

$$y = y_1 + \dots + y_r + \dots + y_m. \quad (2.21)$$

5) Определяются ошибки СКО на основе (2.16).

6) Обратный ход – определяются параметры настройки гибридной сети по формулам, используя алгоритм обратного распространения ошибки (АРО):

$$w_{jp}(t+1) = w_{jp}(t) - \eta \frac{\partial E_t}{\partial w_{jp}(t)} \quad (2.22)$$

$$c_i^{jp}(t+1) = c_i^{jp}(t) - \eta \frac{\partial E_t}{\partial c_i^{jp}(t)} \quad (2.23)$$

$$b_i^{jp}(t+1) = b_i^{jp}(t) - \eta \frac{\partial E_t}{\partial b_i^{jp}(t)} \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = k_j. \quad (2.24)$$

где  $w_{jp}(t), c_i^{jp}(t), b_i^{jp}(t)$  - искомые параметры объекта: веса правил ( $w$ ) и параметры ФП ( $b, c$ ) на  $t$ -м шаге обучения;  $\eta$  – скорость обучения,  $t$  – количество итерации обучения.

## 2.2 Модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление”

### 2.2.1 Принцип ситуационного управления

Как было сказано в главе 1, рассматриваемые в настоящей работе объекты исследования имеют сложную структуру и природу, и для управления которых использование традиционных схем и методов ТАУ является нецелесообразным. Проблема состоит в самом описании объекта управления, учета в этом описании не только его специфической структуры и функционирования, но и различных ситуации в ходе эволюции во времени. Требуется создать такой подход, который на едином языке давал бы возможность описать как сам объект управления и его функционирования, так и процедуру управления им.

Приведем определения основных понятий, используемые в ситуационном управлении, данные основоположником этого метода Д.А. Поспеловым [94].

*Ситуационное управление* – метод управления сложными системами различной природы, основанный на идеях теории искусственного интеллекта: представление знаний об объекте управления и способах управления им на уровне логико-лингвистических моделей, использование обучения и обобщения в качестве основных процедур при построении процедуры управления по текущим ситуациям [94, с. 26].

Определение 1 – *текущей ситуацией* на объекте управления называется совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени.

Определение 2 – *полной ситуацией* на объекте управления называется совокупность, состоящую из текущей ситуации, знаний о состоянии системы управления в данный момент и знаний о технологии управления.

В заданной полной ситуации  $S_{\Pi}$ , текущей ситуации  $S_{Ti}$  ( $i$  – номер текущей ситуации) и доступных вариантах управления  $U_k$  ( $k$  – номер технологического решения), элементарный акт управления будет описан как:

$$S_{\Pi}: S_{Ti} \xrightarrow{U_k} S_{Tj} \quad (2.25)$$

Смысл этого выражения следующий. Если на объекте сложилась ситуация  $S_{Ti}(X, G)$ , определяемая полной ситуацией  $S_{\Pi} = \langle S_{Ti}, S_{donj}, U_k, S_{opt} \rangle$  допускают использование управляющего воздействия  $U_k$ , то оно применяется, и текущая ситуация  $S_{Ti}$  превращается в новую ситуацию  $S_{donj}(X, G)$ , близкую к оптималь -

ной ситуации  $S_{opt}(X, G, U)$ . Такие правила преобразования называются *решающими* (РП) или *корреляционными правилами*. Полный список РП задает возможности системы управления воздействовать на процессы, протекающие в объекте.

Решающее правило является более сложным правилом, оно состоит из двух обычных правил (рисунок 2.3). Первая часть РП – правило, выполняющее идентификацию текущей ситуации, то есть соотнесение текущей ситуации к конкретному виду целевой (допустимой) ситуации. Вторая часть РП – правило, выполняющее операцию принятия решения, то есть выбор конкретного режима управления в соответствии с этой допустимой ситуацией.

Таким образом, *ситуационное управление* – это есть отображение, сопоставляющее паре “текущая ситуация – целевая ситуация” пару “требуемый результат – управление  $U_k$ ”.

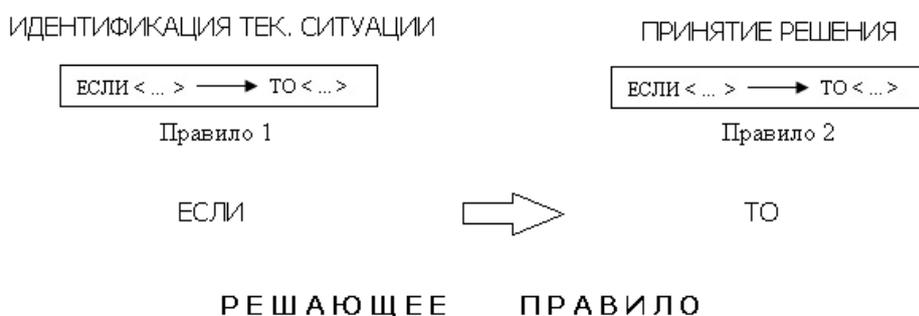


Рисунок 2.3 Структура решающего правила

В задаче управления имеется следующая цепочка: Описание объекта управления  $\rightarrow$  Формирование критерия управления  $\rightarrow$  Синтез и Проектирование САУ. Так сложилось, что в классической ТАУ основное внимание было уделено исследованию только третьего элемента цепочки, то есть задаче с и н т е з а (метода и алгоритма управления) у п р а в л е н и я, когда сам объект и критерий управления им был заранее известным и описанным в точных терминах. Оптимизация управления была центральной проблемой традиционных САУ. И лишь на последнем этапе ее развития внимание специалистов переместилось на проблему идентификации объекта управления и формулирования критерия качества управления [95].

### 2.2.2 Постановка задачи ситуационного управления и критерий оптимальности

На основе опыта и знаний экспертов [96-98] была сформирована с и т у а ц и о н н а я экспертная матрица знаний в виде:

- множества возмущении Среды  $G = (g_1, g_2, g_3, g_4), i = \overline{1,4}$ ;
- множества состояний Среды  $X = (x_1, x_2, x_3), i = \overline{1,3}$ ;

- терм-множества состояний Среды  $T_X = \{\text{минимум; субоптимум\_левый; оптимум; субоптимум\_правый; максимум}\}$ ;
- функции принадлежности  $\mu(X)$ , определяющей принадлежность состояний Среды  $X$  терму  $T_X$ ;
- множества состояний Объекта  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_3), j = \overline{1,3}$ ;
- терм - множества состояний Объекта  $T_Y = \{\text{минимум; субоптимум\_левый; оптимум; субоптимум\_правый; максимум}\}$ ;
- функции принадлежности  $\mu(Y)$ , определяющей принадлежность состояний Объекта  $Y$  терму  $T_Y$ ;
- параметр  $\gamma$  – порог, задающий степень уверенности эксперта в предложенной оценке,  $\gamma \in [0,5 \dots 1]$ ;
- множества типовых ситуации  $S_s = \{s_1, s_2, \dots, s_s\}, i = \overline{1,s}$ , объединяющая все допустимые и запрещенные ситуации ( $S_s = S_{don} \cup S_z$ );
- множества допустимых ситуации  $S_{don} = \{s_1, s_2, \dots, s_\delta\}, k = \overline{1,\delta}$ , описывающие допустимые условия и нормы ОУ ( $S_{don} \cap S_z = \emptyset$ );
- оптимальной ситуации  $s_{opt} \in S_{don}$  описывающего условия внутри оптимума, имеющего единственный терм  $T_{opt} = \{\text{оптимум}\}$ ;
- множества запрещенных (недопустимых) ситуации  $S_z = S_s - S_{don}$ ;
- терм-множества типовых ситуации  $T_s = \{\text{минимум; субоптимум\_левый; оптимум; субоптимум\_правый; максимум}\}$ ;
- терм-множества допустимых ситуации  $T_\delta = \{\text{субоптимум\_левый; оптимум; субоптимум\_правый}\}$ ;
- терм-множества запрещенных ситуации  $T_z = \{\text{минимум; максимум}\}$ ;
- множества интегральных типовых ситуации  $S_{int} = \{s_{int1}, s_{int2}, \dots, s_{ints}\}$ , объединяющая все допустимые и запрещенные ситуации ( $S_s = S_{idon} \cup S_z$ );
- множества интегральных допустимых ситуации  $S_{idon} = \{s_{int1}, s_{int2}, \dots, s_{int\delta}\}$ ,  $k = \overline{1,\delta}$ , описывающие допустимые условия и нормы ОУ ( $S_{idon} \cap S_{iz} = \emptyset$ );
- интегральной оптимальной ситуации  $s_{iopt} \in S_{idon}$  описывающего условия внутри оптимума, имеющего единственный терм  $T_{opt} = \{\text{оптимум}\}$ ;
- множества интегральных запрещенных (недопустимых) ситуации  $S_{intz} = S_{ints} - S_{idon}$ ;
- функции принадлежности  $\lambda(S, S_{don}, \gamma)$ , определяющей принадлежность текущей ситуации  $S$  к множеству допустимых ситуации  $S_\delta$ ;
- функции принадлежности  $\lambda(S_{int}, S_{idon}, \gamma)$ , определяющей принадлежность интегральной ситуации  $S_{int}$  к множеству интегральных допустимых ситуации  $S_{idon}$ ;
- множества режимов управления (технологических решений)  $U^t = \{u_1^t, u_2^t, u_3^t\}, r = \overline{1,3}$ , имеющих значения {включить; выключить} описывающих состояния технологического оборудования;
- критерия эффективности (результативности) управления  $K(U)$ ;
- множества типовых управляющих решений (решающих правил)

$U_s^a = \{u_1^a, u_2^a, \dots, u_s^a\}$ ,  $k = \overline{1, s}$ , принимающего значения {проводить; не проводить} для выполнения  $k$ -го агротехнического мероприятия и объединяющие все допустимые и недопустимые решения ( $U_s^a = U_{\delta}^a \cup U_z^a$ );

- множества допустимых решений  $U_{\delta}^a = \{u_1^a, u_2^a, \dots, u_{\delta}^a\}$ ,  $k = \overline{1, \delta}$ , реализующие допустимые решения ( $S_{\delta} \cap S_z = \emptyset$ );
- множества недопустимых решений  $U_z^a = U_s^a - U_{\delta}^a$ ;
- эффективного решения  $u_{opt} \in U_{don}^a$ , реализующего приемлемое, с точки зрения эксперта решение.

Ситуационная ЭМЗ представляет собой ЭМЗ типа Мамдани (2.1)–(2.2), дополненную необходимыми условиями и критериями для описания Объекта управления в зависимости от различных ситуации.

Модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” задается в виде кортежа [98, с. 111]:

$$\langle G, X, Y, S, S_{don}, S_{opt}, S_{int}, S_{iopt}, S_{idon}, \hat{S}, \hat{S}_{int}, \gamma, U, K, t \rangle, \quad (2.26)$$

где  $X(G)$  – состояние Среды в зависимости от возмущений;

$Y(X)$  - состояние Растения в зависимости от состояния Среды;

$\hat{X} = \langle X, T_X, \mu(X), t \rangle$  - оценка текущего состояния Среды  $X$  с помощью терма  $T_X$ ;

$\hat{Y} = \langle Y, T_Y, \mu(Y), t \rangle$  - оценка текущего состояния Объекта  $Y$  с помощью терма  $T_Y$ ;

$S = \langle X, T_X; Y, T_Y, t \rangle$  – текущая ситуация, описывающая состояния Среды  $X$  и Объекта  $Y$  с помощью термов  $T_X$  и  $T_Y$ ;

$\hat{S} = \langle S, T_s, \lambda(S, \gamma); t \rangle$  – оценка текущей ситуации  $\hat{S}$  с помощью терма  $T_s$ ;

$S_{int} = \langle X, T_X; Y, T_Y; t \rangle$  – интегральная ситуация, описывающая интегральные состояния Среды  $X$  и Объекта  $Y$  с помощью термов  $T_X$  и  $T_Y$ ;

$\hat{S}_{int} = \langle S, T_s, \lambda(S_{int}, \gamma), t \rangle$  – оценка интегральной ситуации с помощью терма  $T_s$ ;

$S_{don} = \langle X, Y, t \rangle$  - допустимая ситуация, близкая к оптимальной  $s_{opt}$ ;

$S_{iopt} = \langle X, Y, t \rangle$  - допустимая интегральная ситуация, близкая к оптимальной  $s_{iopt}$ ;

$U(\hat{S}) = \langle U^t, U^a \rangle$  – управляющее решение (режим управления) в виде технологических  $U^t$  и агротехнических операции  $U^a$  в зависимости от оценки  $\hat{S}$ ;

$K(U)$  - критерий эффективности (результативности) управления;

$t = \langle t_i, t_{bi} \rangle$  – время (дискретное и биологическое дискретное).

Модель системы (2.26) с учетом обучения ЭС принимает вид:

$$\langle Y, (X_r, y_r), M, U, K, E \rangle, \quad (2.27)$$

где  $Y$  – выход модели,  $(X_r, y_r)$  – выборка данных;  $X_r = (X_{r1}, X_{r1}, \dots, X_{rn})$  – вектор входов;  $y_r$  – выход в  $r$ -паре ( $r = \overline{1, M}$ );  $M$  – объем выборки,  $K(U)$  – критерий эффективности (результативности) управления;  $E$  – ошибка обучения ЭС.

Цель ситуационной ЭС – идентификация объекта управления через оценку текущей ситуации /интегральной ситуации  $S(t_i)/S_{int}(t_{bi})$  и выбор (принятие) решения  $U(t_i) / U(t_{bi})$  в зависимости от этой оценки.

Каждая текущая ситуация  $S(X(t_i), Y(t_i))$  представляет совокупность всех сведений о структуре ОУ и его функционировании в данный момент и описывается фиксированным вектором состояний Среды  $X(t_i) = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$  и вектором состояний Растения  $Y(t_i) = \langle y_1, y_2, y_3 \rangle$ .

Каждая интегральная ситуация  $S_{int}(X(t_{bi}), Y(t_{bi}))$  ( $J=1,2,3$ )) представляет совокупность всех сведений о структуре ОУ и его функционировании в определенный период  $J$ -фазы развития и описывается фиксированным вектором состояний Среды  $X(t_{bi}) = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$  и вектором состояний Растения  $Y(t_{bi}) = \langle y_1, y_2, y_3 \rangle$ .

Идентификация (оценка) текущей ситуации  $S(X(t_i), Y(t_i))$  осуществляется посредством включения/не включения ее во множество допустимых ситуации  $S_{don}(X, Y)$  и определяется как функция:

$$\hat{S}(S(X, Y)) = \bigwedge_{x_i \in X, y_j \in Y} (\lambda(S(X, Y)) \rightarrow \lambda(S_{don}(X, Y))) \quad (2.28)$$

где  $\wedge$  – операция конъюнкции,  $\lambda(S)$  и  $\lambda(S_{don})$  – ФП текущей и допустимой ситуации.

Идентификация (оценка) интегральной ситуации  $S_{int}(X(t_{bi}(J=1,2,3)))$  осуществляется посредством включения/не включения ее во множество допустимых ситуации  $S_{idon}$  и определяется как функция:

$$\hat{S}_{int}(S_{int}(X, Y)) (J=1,2,3) = \bigwedge_{x_i \in X, y_j \in Y} (\lambda(S_{int}(X, Y)) (J=1,2,3) \rightarrow \lambda(S_{idon}(X, Y)) (J=1,2,3)) \quad (2.29)$$

где  $\wedge$  – операция конъюнкции,  $\lambda(S_{int})$  и  $\lambda(S_{idon})$  – ФП текущей и допустимой интегральной ситуации.

Ситуационная модель имеет условия а) для технологического решения (четкое управление) и б) для агротехнического решения (нечеткое управление).

Требуется построить с и т у а ц и о н н у ю ЭС таким образом, чтобы  
- по условию а)

1.1) оценка текущей ситуации  $S(X(t_i), Y(t_i))$  выполнялась по критерию:

$$\hat{S}(S(X, 0)) = \begin{cases} S \subset S_{don}, \lambda(S, S_{don}) \geq \gamma \\ S \not\subset S_{don}, \lambda(S, S_{don}) < \gamma \end{cases} \quad (2.30)$$

1.2) выбор технологического режима управления Среды определялся по критерию:

$$\mathbf{u}_i^t(\hat{S}) = \begin{cases} 0, S(X,0) \subset S_{\hat{c}on}(X,0) \\ 1, S(X,0) \not\subset S_{\hat{c}on}(X,0) \end{cases} \quad (2.31)$$

- по условию б)

2.1) оценка и выбор набора  $jk$ -допустимых текущих/интегральных ситуации  $\{S(X, Y(t_{bi}))/S_{int}(X, Y(t_{bi}))\}$  по  $j$ -состоянию Объекта по  $k$ -мероприятию осуществлялся по критерию:

$$\hat{S} \{S(X, Y_{jk})\} = \begin{cases} S \subset S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk}), \lambda(S, S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk})) \geq \gamma \\ S \not\subset S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk}), \lambda(S, S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk})) < \gamma \end{cases} \quad (2.32)$$

2.2) выбор набора  $jk$ -допустимых управлений  $\{\mathbf{u}^a(X, Y_{jk})\} \subseteq U_{\hat{c}}(S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk}))$  по  $j$ -состоянию Объекта в зависимости от набора ситуации  $\{S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk})\}$  осуществлялся по критерию:

$$\{\mathbf{u}^a(\hat{S})\} = \begin{cases} 0, S(X, Y_{jk}) \subset S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk}) \\ 1, S(X, Y_{jk}) \not\subset S_{i\hat{c}on}(X, Y_{jk}) \end{cases} \quad (2.33)$$

2.3) выбор эффективного управления  $\mathbf{u}^{a*}$  из набора допустимых управлений  $\{\mathbf{u}^a(X, Y_{jk})\}$  по критерию эффективности управления:

$$K(\mathbf{u}^a) = \max_{\mathbf{u}^a \in U_{\hat{c}}} \lambda(\mathbf{u}^a(X, Y_{jk})) \quad (2.34)$$

$$\mathbf{u}^{a*} = \arg \max_{k=1, r} K(\mathbf{u}^a(X, Y_{jk})), \quad (2.35)$$

где  $\lambda(\mathbf{u}^a)$  – ФП допустимого управления (мероприятия).

3) при обучении ЭС разность между предлагаемым решением ЭС (теория) и экспериментальными данными (практика) была минимальной:

$$E = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M [Y_r - Y]^2 \rightarrow \min \quad (2.36)$$

### 2.2.3 Описание модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление”

Рассмотренные в первой главе факторы жизни, факторы среды составляют процесс существования растений в пространстве, а фазы развития и роста - процесс существования растений во времени. Причем этот процесс является единым и непрерывным во времени и подчиняется двум фундаментальным законам биологии – закону *оптимума* и закону *(кривой) роста*.

Это означает, что рост и развитие растений в течение всего периода вегетации должны соответствовать нормам и условиям оптимума, измеряемые и сравниваемые с помощью приведенных агроклиматическим показателей.

Есть известная поговорка “что посеешь то и пожнешь”, представляющее собой четкое утверждение “ЕСЛИ - ТО”. В нашем случае это обозначает, что

каким будет уход за растением (в х о д): соблюдение условий оптимума Среды и Растения, таким будет и получаемый в итоге урожай (в ы х о д).

Следовательно, формальное описание этой поговорки - утверждения подчиняется *закону сохранения энергии*. Суть последнего закона заключается в том, что количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую:

$$W = \text{const}, \quad (2.37)$$

где  $W$  равна сумме входной  $W_{\text{in}}$  и выходной  $W_{\text{out}}$  энергии. В качестве  $W_{\text{in}}$  будут выступать все входные переменные и в качестве  $W_{\text{out}}$  – все выходные переменные модели (2.25)-(2.35). Конечным выходом модели является показатель урожайности уз.

При построении модели эти три закона, условия и нормы оптимума берутся за основу. Факторы жизни определяют состояние Растения. Факторы Среды влияют на состояние Растения, то есть являются возмущением. Таким образом, факторы Среды – это вход, а состояние Растения – это выход. Их единство проявляется в неразрывном процессе, обеспечивающем одновременное соблюдение условий оптимума среды текущим условиям жизни. Задача состоит в математическом описании приведенного процесса в течение всего вегетационного периода.

В диссертационной работе предлагается модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” как практический аналог известной модели биологической системы “Почва-Растение-Атмосфера”, рассмотренной в первой главе. Отличие разработанной модели от последней заключается в том, что она является *человеко-машинной системой* с рациональным использованием функции подготовки (Компьютер) и функции принятия решения (Человек) [99, 100]. То есть процесс работы включает два этапа. На первом этапе выполняется обработка данных мониторинга с помощью компьютера (оценка состояния среды и растения). На втором этапе принимается, корректируется решение на основе знаний эксперта.

Модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” состоит из блоков: Среда, Растение, Ситуация и управление [98, с. 110].

1 – Блок Среда характеризует состояние микроклимата в реальном масштабе времени (Атмосфера – температура воздуха (дневная/ночная), относительная влажность воздуха; Почва – относительная влажность почвы; Свет – освещенность). Состояние Среды описывается вектором  $X$ .

2 – Блок Растение является главным блоком системы (Объект управления) и характеризует состояние растения (органов) в виде показателей: индекс вегетации (NDVI) для листьев (фаза 1), число завязей (фаза 2), число (масса) плодов (фаза 3). Важным показателем является урожайность, определяющий конечный результат процесса выращивания. Для получения высокой урожайности необходимо соблюдение условий, близких к оптимальным: оптимум температуры/оптимум влажности/оптимум полученной радиации (NDVI). Состояние Растения описывается вектором  $Y$ .

3 – Блок Ситуация-Управление характеризует совокупность состояний Среды и Объекта, т.е. текущую ситуацию  $S$  и в зависимости от этой ситуации осуществляет управление. Управляющие решения реализуются в виде двух типов операции: *технологические* и *агротехнические*.

К технологическим операциям относятся операции управления технологическими режимами (вентиляция, освещение, капельное орошение). К агротехническим операциям относятся мероприятия по уходу за растением: обработка почвы (рыхление, мульчирование), внесение удобрений, защита от сорняков (прополка), формирование растений (обрезка, прищипка, пасынкование и подвязывание), и в конечном счете, сбор урожая.

В этом блоке также рассчитываются интегральные показатели Среды и Растения. К интегральным показателям Среды относятся: Суммарная эффективная дневная/ночная температура (теплопериод), суммарная эффективная освещенность и фотопериод.

К интегральным показателям Растения относятся вегетация (интегральный показатель NDVI) в первой фазе, число завязей – во второй фазе, число плодов – в третьей фазе, и в конечном счете – показатель урожайности за весь вегетационный период.

Математическая модель системы относится к классу непрерывно-дискретных (гибридных) систем. Это говорит о том, что система характеризуется как непрерывным, так и дискретным поведением. Несмотря на то, что в любой физической системе время  $t$  является непрерывной, можно говорить о дискретных моментах времени  $t(i, b_i)$  как подмножестве значений непрерывного времени.

Разработанная модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” и процесс режимного управления в соответствии от конкретной ситуации приведена на рисунке 2.4. Перед началом моделирования выполняется операция перевода непрерывного времени в дискретное:  $t \rightarrow t(i, b_i)$ . Например, процессы в Блоке Среда описываются в суточном масштабе времени  $t(i)$ , то есть имеют состояние День и Ночь. А процессы Блока Растение в биологическом масштабе времени  $t(b_i)$ , это значит, что во время процесса выращивания растение имеет три фазы (фенофазы): Рассада  $\rightarrow$  Цветение  $\rightarrow$  Плодоношение.

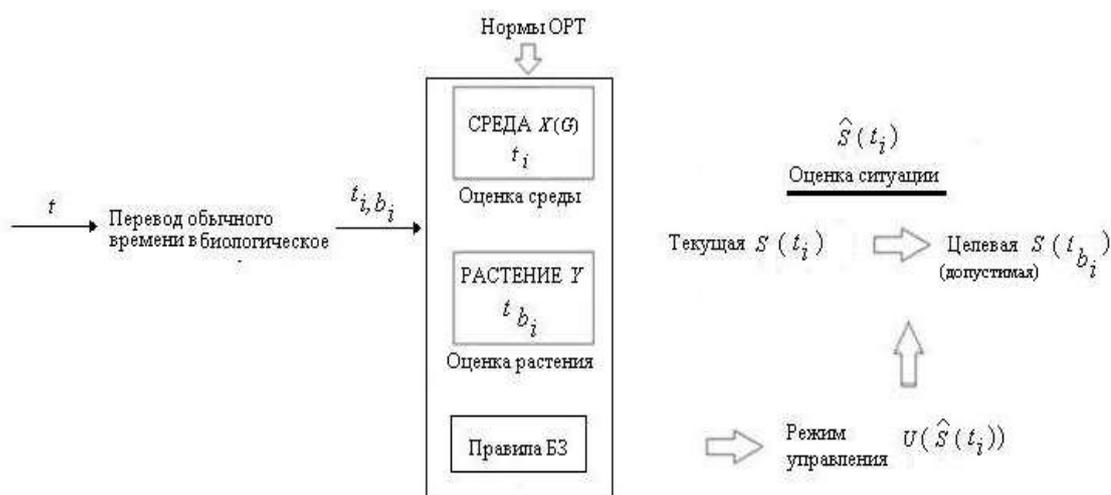


Рисунок 2.4 Модель системы “Растение- Среда-Ситуация-Управление” и режимное управление

В зависимости от определенного состояния среды и состояния растения осуществляется переход системы из одного режима в другой. Эти определенные состояния являются ситуациями (событиями). Они определяют *режимы управления*. Есть два вида режимов: а) биологические, которые описывают переход растения из одной фаз в другую; и б) технологические, описывающие переход из одного технологического процесса в другой. Условия перехода из одного режима в другой определяются соответствующими биологическими и технологическими нормами только в дискретные моменты времени  $t(i, bi)$  и представляют собой булевы функции  $D(t_i)$ ,  $J(t_{bi})$ :

$$D(t_i) = \begin{cases} 1, t = t^{восх} \\ 0, t = t^{зах} \end{cases}, \quad (2.38)$$

$$J(t_{bi}) = \begin{cases} 1, t = t^* \\ 2, t = t^{**} \\ 3, t = t^{***} \end{cases}, \quad (2.39)$$

где  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$  - моменты наступления 1, 2, 3-й фазы развития растения;  $t^{восх}$ ,  $t^{зах}$  - моменты восхода и захода солнца;  $t$  – время обычное непрерывное;  $D(t_i)$  – время дискретное (суточное),  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  – номер дня;  $J(t_{bi})$  – время дискретное (биологическое);  $J = 1, 2, 3$  - номер фенофазы.

Модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” (2.26) – (2.39) реализована в виде экспертной системы (ЭС). Ее ядром является база знаний, она строится на основе знаний эксперта и оформляется в виде правил. В нашем случае БЗ замещает математическую модель объекта управления. При этом успех решения задачи во многом обеспечивается структурой и содержанием БЗ, а также алгоритмами их обработки.

В таблицах 2.1-2.6 приведены значения норм среды и растения (База данных оптимума).

В таблицах 2.7-2.16 показаны результаты структурной идентификации для приведенных задач, были выбраны тип модели, методы фаззификации/дефаззификации/агрегации и импликации, построены структура

и правила Базы знаний AQILDI\_JILJAY, AQILDI\_PLANT, FIS\_CONTROL\_REAL\_TIME, FIS\_CONTROL\_OFFLINE, входящие в состав общей экспертной системы, а также виды функции принадлежности для каждой логвистической переменной.

Таблица 2.1 Значения нормы среды  $S_{don} < X(D(t_i)), 0 >$

Дневная норма температуры, С $S_{don}(x_1(D(t_i)=1))$	Ночная норма температуры, С $S_{don}(x_1(D(t_i)=0))$	Норма освещенности, кДж/см <sup>2</sup> $S_{don}(x_2(t_i))$	Норма влажности почвы, % $S_{don}(x_3(t_i))^1$
[20; 24]	[15; 18]	[3; 5]	[60; 70]

Таблица 2.2 Значения интегральных норм среды  $S_{iopt}(X(D(t_i)), J(t_{bi}), 0)$

Суммарная эффективная дневная температура, С $S_{idon}(\sum x_1^{эфф}(D(t_i)=1), J(t_{bi}))$	Суммарная эффективная ночная температура, С $S_{idon}(\sum x_1^{эфф}(D(t_i)=0), J(t_{bi}))$	Суммарная эффективная освещенность, кДж/см <sup>2</sup> $S_{idon}(\sum x_2^{эфф}(D(t_i)=1), J(t_{bi}))$	Фотопериод за весь вегетационный период, час $S_{idon}(\sum t_i^{эфф})$
800	500	1100	700

Таблица 2.3 Значения нормы растения  $S_{don} < 0, Y(D(t_{bi})) >$

Число настоящих листьев, шт $S_{don}(y_1(D(t_i)=1))$	Число завязей, шт $S_{don}(y_2(D(t_i)=1))$	Число плодов, шт $S_{don}(y_3(D(t_i)=1))$
4	[5 .. 7]	[5 .. 7]

Таблица 2.4 Значения интегральных норм растения  $S_{opt} < 0, Y(D(t_{bi})) >$

Средний индекс вегетации, % $S_{idon}(M(y_1(D(t_{bi}), J=1)))$	Суммарное число завязей/м <sup>2</sup> , шт $S_{idon}(\sum y_2(D(t_{bi}), (J=2)))$	Суммарное число плодов/м <sup>2</sup> , шт $S_{idon}(\sum y_3(D(t_{bi}), (J=3)))$
---	---	--

<sup>1</sup> Была использована в качестве  $S_{don}(x_3(t_i))$  и суточная норма капельного полива, л\*сут/м<sup>2</sup>, имеющий значение оптимума = 5.

в начале - [0,5 ÷ 0,7]	[90 .. 100]	[90 .. 100]
в конце - [0,3 ÷ 0,35]		

Таблица 2.5 Интервалы времени наступления фазы роста растения  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$

Фаза 1	Момент перехода к фазе 2	Фаза 2	Момент перехода к фазе 3	Фаза 3
$t_{bi} \in [0 \div T_{j=1})$ Рост и развитие рассады (основной индикатор - вегетация)	$t_{opt}^{**}$ Образование новых завязей	$t_{bi} \in [T_{j=1} \div T_{j=2})$ Рост числа завязей и появление новых зеленцов (основной индикатор – число зеленцов)	$t_{opt}^{***}$ Появление новых плодов	$t_{bi} \in [T_{j=2} \div T_{j=3}]$ образование новых зеленцов (основной индикатор - урожайность (масса плодов))
$T_{j=1} \in [0 \div 20..25]$	$t^{**} \in 30...35$	$T_{j=1} \in [30...45]$	$t^{**} \in 45...50$	$T_{j=1} \in [45...90]$

Таблица 2.6 Условия наступления фазы роста растения  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$

$t_{opt}^{**}$	$t_{opt}^{***}$
Достижение оптимумов фотопериоду и вегетации  $t_{bi} (J=1,2) = t^{**} (x_3, y_1 (t_{bi}))$	Одновременное достижение всех оптимумов по вегетации, теплопериоду и фотопериоду  $t_{bi} (J=1,2,3) = t^{***} (x_1, x_2, x_3, x_4; y_1, y_2, y_3 (t_{bi}))$
$\wedge S_{iopt} (X(D(t_i), J(t_{bi})), Y(D(t_i), J(t_{bi})))$	$\wedge S_{iopt} (X(D(t_i), J(t_{bi})), Y(D(t_i), J(t_{bi})))$

Таблица 2.7 Выбор параметров структуры баз знаний AQILDI\_JILIJAY и AQILDI\_PLANT

Функция ЭС	Методы нечеткого вывода	Число входов	Число выходов	Число правил БЗ
Оптимум 1 (FIS_OPT1)*	Методы фаззификации: Метод И – min Метод ИЛИ – max Метод импликации - min Метод агрегации – max Метод дефаззификации – centroid	2	1	2
Оптимум 2 (FIS_OPT2)*		1	1	2
Оптимум 3 (FIS_OPT3)*		3	1	2
Оптимум 4 (AQILDI_JILIJAY)		6	1	9
Режимы управления в реальном времени	Методы фаззификации:	2	1	2
		1	1	2

(AQILDI_JILIJAY) и биологическом оффлайн режиме (AQILDI_PLANT)	Метод И – prod Метод ИЛИ – probor Метод импликации - min Метод агрегации – max Метод дефаззификации – wtaver	3	1	2
		6	1	3
Всего		24	8	24

Таблица 2.8 Выбор параметров функции принадлежности для БЗ  
AQILDI\_JILIJAY (идентификация текущей ситуации)

Функция ЭС	Лингвистическая переменная	Интервалы значений термов	Тип функции принадлежности	Обозначение и границы переменной
Идентификация воздушной среды (FIS_OPT1)	Температура воздуха, С	H = [5 40] L = [5 20] Opt = [4 20]	gaussmf	AuaTemp ∈ [0..40]
	Относительная влажность воздуха, %	H = [8 90] L = [8 20] Opt = [8 55]	gaussmf	AuaYlgal ∈ [20..90]
	OPT1	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	AUA ∈ [0..1]
Идентификация среды освещения (FIS_OPT2)	Освещенность, kDj/sm2	H = [0.8 6] L = [0.8 1] Opt = [0.6 3.5]	gaussmf	Ligth ∈ [0..7]
	OPT2	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	JARIQ ∈ [0..1]
Идентификация почвенной среды (FIS_OPT3)	Относительная влажность почвы, %	H = [8 90] L = [8 20] Opt = [8 55]	gaussmf	Top_Ylgal ∈ [20..90]
	OPT3	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	TOPYRAQ ∈ [0..1]

Таблица 2.9 Выбор параметров функции принадлежности для базы знаний AQILDI\_PLANT (управление технологическими режимами)

Функция ЭС	Лингвистическая переменная	Интервалы значений термов	Тип функции принадлежности	Обозначение и границы переменной
------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------------

Управление воздушной средой	Оптимум температуры воздуха, С	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1] On = 1 Off = 0	gaussmf  constant	AUA ∈ [0..1]  Jeldetu = [On Off] (режим вентиляции)
Управление Средой освещения	Оптимум освещенности, kDj/sm2	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1] On = 1 Off = 0	gaussmf  constant	JARIQ ∈ [0..1]  Jariq = [On Off] (режим освещения)
Управление почвенной средой	Оптимум влажности почвы, %	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1] On = 1 Off = 0	gaussmf  constant	ТОPIRAQ ∈ [0..1]  Suaru = [On Off] (режим полива)
Uaqit	Время полива, час	K = [20 20]	smf	K ∈ [0..23]

Таблица 2.10 Выбор параметров функции принадлежности для базы знаний AQILDI\_PLANT

Функция ЭС	Лингвистическая переменная	Интервалы значений термов	Тип функции принадлежности	Обозначение и границы переменной
Достижение теплопериода	Теплопериод, С	J1 = [162.5 0] J2 = [130 650] J3 = [162.5 1300]	gaussmf	Teploperiod ∈ [0...1300]
Достижение фотопериода	Фотопериод, час	J1 = [80 0] J2 = [80 350] J3 = [80 700]	gaussmf	Fotoperiod ∈ [0...700]
Достижение вегетации	Вегетация	J1 = [0.085 0.7] J2 = [0.08 0.45] J3 = [0.085 0.2]	gaussmf	Veget ∈ [0...1]
Рост листьев	Число листьев, шт	J1 = [3.4 4] J2 = [3.4 16] J3 = [3.4 28]	gaussmf	Japiraq ∈ [0...30]

Рост завязей	Число завязей, шт	J1 = [17 0] J2 = [17 50] J3 = [17 100]	gaussmf	Tuin ∈ [0...100]
Рост плодов	Число плодов, шт	J1 = [17 0] J2 = [17 50] J3 = [17 100]	gaussmf	Onim ∈ [0...100]
Наступление моментов перехода фаз	Время, дни	J1 = [5 0] J2 = [5 28] J3 = [5 45]	gaussmf	Uaqit ∈ [0...80]
ФАЗА 1	Идентификация фазы 1	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	Phaza1 ∈ [0...1]
ФАЗА 2	Идентификация фазы 2	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	Phaza2 ∈ [0...1]
ФАЗА 3	Идентификация фазы 3	Z = [0.17 0] Opt = [0.17 1]	gaussmf	Phaza3 ∈ [0...1]

Таблица 2.11 Правила БЗ AQILDI\_JILIJAY для идентификации текущей ситуации в суточном времени

	ЕСЛИ	ТО
Правило 1	AuaTemp = Opt AND AuaYlgal = Opt	AUA = OPT
Правило 2	AuaTemp = Lo AND AuaYlgal = Hi	AUA = Z
Правило 3	AuaTemp = Hi AND AuaYlgal = Lo	AUA = Z
Правило 4	Ligth = Opt	JARIQ = OPT
Правило 5	Ligth = Lo	JARIQ = Z
Правило 6	TopYlgal = Opt	TOPIRAQ = OPT
Правило 7	TopYlgal = Lo	TOPIRAQ = Z
Правило 8	Ligth = Hi	JARIQ = Z

Таблица 2.12 Правила БЗ AQILDI\_JILIJAY для управления в суточном времени

Правила	ЕСЛИ	ТО
Правило 1	AUA = OPT	Jeldetu = off (выкл вентилятор)
Правило 2	JARIQ = OPT	Jariq = off (выкл прожектор)
Правило 3	TOPIRAQ = OPT AND Uaqit = not K	Suagu = off (выкл клапан)
Правило 4	TOPIRAQ = Z AND Uaqit = K	Suagu = on (вкл вентилятор)

Правило 5	AUA = Z	Jeldetu = on (вкл прожектор)
Правило 6	JARIQ = Z AND Uaqit = K	Jariq = on (вкл клапан)

Таблица 2.13 Правила БЗ AQILDI\_PLANT для идентификации текущей ситуации в биологическом времени

Правила	ЕСЛИ	ТО
Правило 1	Teploperiod = J1 AND Fotoperiod = J1 AND Veget = J1 AND Japiraq = J1 AND Uaqit = J1	Phaza1 = OPT
Правило 2	Uaqit = not J1	Phaza1 = Z
Правило 3	Teploperiod = J2 AND Fotoperiod = J2 AND Veget = J2 AND Japiraq = J2 AND Tuin = J2 AND Uaqit = J2	Phaza2 = OPT
Правило 4	Uaqit = not J2	Phaza2 = Z
Правило 5	Teploperiod = J3 AND Fotoperiod = J3 AND Veget = J3 AND Japiraq = J3 AND Tuin = J3 AND Onim = J3 Uaqit = J3	Phaza3 = OPT
Правило 6	Uaqit = not J3	Phaza3 = Z

Таблица 2.14 Правила БЗ AQILDI\_PLANT для управления в биологическом времени (поиск мероприятия для  $j$ -й фазы)

Правила	ЕСЛИ	ТО
Правило 1	J1 = OPT	K1 = off (мероприятий нет в фазе1)
Правило 2	J2 = OPT	K2 = off (мероприятий нет в фазе2)
Правило 3	J3 = OPT	K3 = off (мероприятий нет в фазе3)
Правило 4	J1 = Z	K1 = on (допустимые мероприятия фазы 1)
Правило 5	J2 = Z	K2 = on (допустимые мероприятия фазы 2)
Правило 6	J3 = Z	K3 = on (допустимые мероприятия фазы 3)

Таблица 2.15 Правила БЗ AQILDI\_PLANT для управления в биологическом времени (поиск  $k$ -го мероприятия)

Правила	ЕСЛИ	ТО
Правило 1	Фаза развития растения находится в первой ( $J=1$ ) фазе и состояние почвы НЕ соответствует норме	Выбор $j=1; k=1$ -го мероприятия
Правило 2	Состояние бокового стебля (пасынка) НЕ соответствует норме	Выбор $j=2,3; k=2$ -го мероприятия
Правило 3	Листья мешает действию солнечного света и количество их НЕ соответствует норме	Выбор $j=2,3; k=3$ -го мероприятия
Правило 4	Фаза развития растения достигла второй ( $J=2$ ) фазы и состояние главного стебля (длина) превышает норму	Выбор $j=2,3; k=4$ -го мероприятия
Правило 5	Фаза развития растения находится в третьей фазе ( $J=3$ ) и состояние главного стебля (длина) достигла высоты теплицы	Выбор $j=3; k=5$ -го мероприятия
Правило 6	Пришло время подкормки	Выбор $j=2,3; k=6$ -го мероприятия
Правило 7	Фаза развития растения находится в третьей фазе ( $J=3$ ) и все состояния среды и растения соответствует норме (спелость)	Выбор $j=3, k=7$ -го мероприятия

Таблица 2.16 Список агротехнических мероприятий

Фенофазы	Список мероприятий	Номер $jk$ -го мероприятия
Выполняются в фазе 1 ( $j=1$ )	Мульчирование	K11
Выполняются в фазе 2 ( $j=2$ )	Ф о р м и р о в а н и е растения (в 1 стебель): - Пасынкование - Срез лишних листьев - Подвязывание Мульчирование Подкормка	K22 K23 K24 K21 K26
Выполняются в фазе 3 ( $j=3$ )	Ф о р м и р о в а н и е растения (в 1 стебель): - Пасынкование - Срез лишних листьев - Подвязывание - Прищипка Подкормка Сбор урожая	K32 K33 K34 K35 K36 K37

## 2.3 Использование модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление” для решения задач идентификации и управления

### 2.3.1 Структура и функциональная схема экспертной системы модели

Разработанная модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” позволяет решить два типа задач: оценка состояния объекта (среды и растения) и выбор режима управления для НЛК.

Для оценки состояния объекта используются блок Среда и блок Растение. Регулятор (НЛК) реализует функцию выбора технологического управления в зависимости от ситуации в блоке Ситуация-Управление.

В соответствии со схемой ситуационного управления (рисунок 2.1), блоки Анализатора и Классификатора выполняют функцию оценки состояния среды в суточном и биологическом масштабе времени. Коррелятор, имеющий в своем составе Базу данных оптимума и хранящий значения  $OPT_i$  и  $OPT_{ib}$  сравнивает их с определенными в блоках Анализатора и Классификатора текущими / интегральными оценками  $\hat{S} = \langle X, T_X; Y, T_Y, t \rangle$  и  $\hat{S}_{int} = \langle X, T_X, T_s, \lambda(S_{int}, \gamma), t \rangle$  и на основе правил Баз знаний эксперта, находит соответствующий режим технологического и агротехнического управления.

Следует отметить, что в модели (2.25) - (2.38) не применяются блоки Экстраполятора и случайного выбора, так как при оценке ситуации в биологическом масштабе времени берется апостериорная информация о развитии растения и не прогнозируется априори.

Во второй главе, на этапе структурной идентификации были выбраны структура и определены параметры всех БЗ. Все эти базы входят в Общую Экспертную систему AQILDI\_JILJAY (рисунок 2.7). Для решения поставленных задач используются данные из таблиц 2.1-2.16.

Ниже описываются и решаются следующие задачи:

задача 1 - идентификация текущей ситуации в суточном масштабе времени;

задача 2 - идентификация интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени;

задача 3 - определение моментов перехода из одной фазы в другую;

задача 4 - ситуационное управление технологическими режимами;

задача 5 - ситуационное управление агротехническими мероприятиями теплицы.

В этом пункте приведена постановка задач 1,2,3 и 5. Постановка задачи 4 приведена в третьей главе.

Рассмотрим схему идентификации текущей ситуации, описываемыми тремя состояниями Среды  $i=1,2,3$  (рисунок 2.5). Для определения оценки оптимума строится дерево решений с помощью системы нечеткого вывода  $FIS1 \rightarrow FIS\_OPT1 (i=1)$ ,  $FIS1 \rightarrow FIS\_OPT2 (i=2)$ ,  $FIS1 \rightarrow FIS\_OPT3 (i=3)$ .

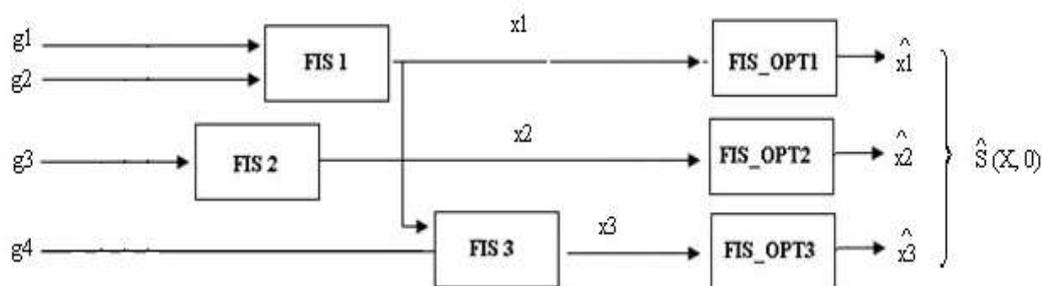


Рисунок 2.5 Функциональная схема общей экспертной системы, описывающей состояние Среды - AQILDI\_JILIJAY

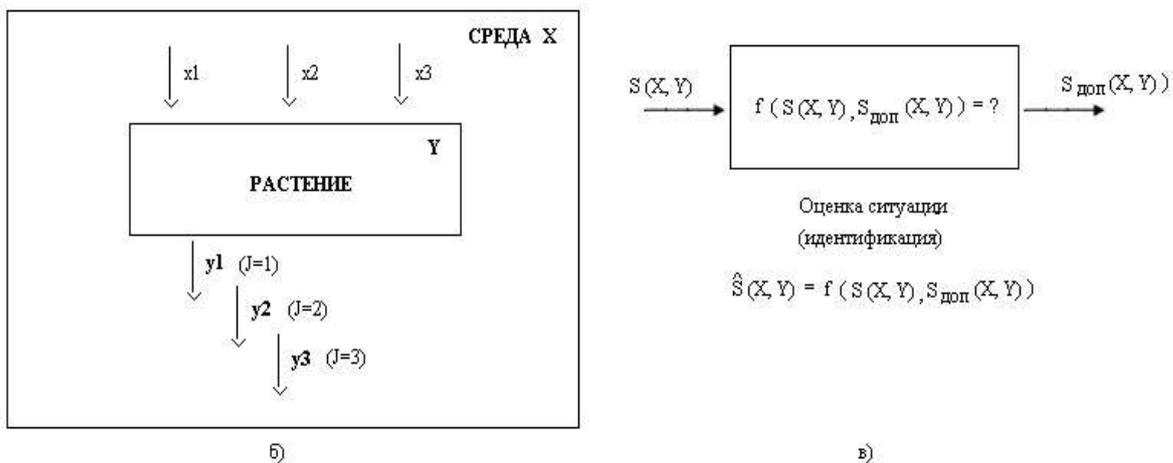


Рисунок 2.6 Связь между входными и выходными состояниями ОУ

Таким образом, все эти процессы в системе определяются текущими ситуациями  $S(X, Y(X))$  и интегральными ситуациями  $S_{int}(X, Y(X))$  для соответствующей фазы ( $J=1,2,3$ ) модели (2.25)-(2.38), которые имеют входные состояния Среды:  $X=\{x_1 D(t_i)=1, x_2 D(t_i)=1\}$  для ( $i=1$ ) (состояние воздуха днем);  $X=\{x_1 D(t_i)=0, x_2 D(t_i)=0\}$  для ( $p=1$ ) (состояние воздуха ночью);  $X = \{x_3 D(t_i)=1\}$  для ( $i=2$ ) (состояние освещенности);  $X = \{x_1 D(t_i)=1, x_2 D(t_i)=1; x_4 D(t_i)=1\}$  ( $i=3$ ) (состояние почвы днем) и выходные состояния Растения:  $Y \{y_1(X); y_2(X); y_3(X)\}$  (рисунок 2.6а). Причем все выходы описывают закон оптимума (рисунок 1.3б) и выражаются через сигмоидальную функцию.

Задачи оценки текущей ситуации в суточном масштабе времени и оценки интегральной ситуации в биологическом масштабе времени (рисунок 2.6б) приводятся к задаче нечеткой идентификации.

### 2.3.2 Идентификация текущей ситуации в суточном масштабе времени (задача 1)

З а д а е т с я ситуационная ЭМЗ вида (2.26). Т р е б у е т с я построить алгоритм, реализующий последовательность операции по идентификации текущей ситуации  $S(X(G), 0) = \langle X(G), T_X; 0, 0, t_i \rangle$ , соответствующего вектору фиксированных значений состояний Среды  $X = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$ .

Алгоритм решения состоит из двух этапов: на первом этапе выполняется

идентификация ситуации Среды по трем состояниям  $i = 1, 2, 3$ ; на втором - идентификация текущей ситуации, объединяющая эти состояния.

Рассмотрим первый процесс - управления состоянием воздушной среды. Из схемы на рисунке 2.7 имеем два входа: температура воздуха  $g_1$  и влажность воздуха  $g_2$ . В этом случае задача идентификации текущей ситуации по результатам наблюдений  $X_0 (i=1) = (g_1, g_2)$  будет иметь вид:

$$P^t = f(X_{i=1} = (g_1, g_2)) = ? \quad (2.40)$$

Решается задача нечеткой идентификации. Задается ЭМЗ типа Мамдани (2.1) – (2.4). Задаются множества входных и выходных переменных с соответствующими ФП и термами. Реализуется алгоритм принятия решения ЭС типа Сугено из п. 2.1.3. Правила БЗ берутся из таблиц 2.7 – 2.16.

В результате реализации алгоритма находится оценка состояния воздушной среды  $\hat{X} = \langle X (i=1), T_x, \mu (X), t \rangle$ , определяющая меру принадлежности текущего состояния оптимуму воздушной среды  $X_{don} (i=1)$ .

Рассмотрим теперь второй процесс - управления состоянием среды освещения.

Из схемы на рисунке 2.7 имеем один вход: освещенность  $g_3$ . В этом случае задача идентификации текущей ситуации по результатам наблюдений  $X = (g_3)$  будет иметь вид:

$$P^t = f(X_{i=2} = (g_3)) = ? \quad (2.41)$$

Решается задача нечеткой идентификации. Задается ЭМЗ типа Мамдани (2.1) – (2.4). Задаются множества входных и выходных переменных с соответствующими ФП и термами. Реализуется алгоритм принятия решения ЭС типа Сугено из п. 2.1.3. Правила БЗ берутся из таблиц 2.7 – 2.16.

В результате реализации алгоритма находится оценка состояния среды освещения  $\hat{X} = \langle X (i=2), T_x, \mu (X), t_i \rangle$ , определяющая меру принадлежности текущего состояния оптимуму среды освещения  $X_{don} (i=2)$ .

Аналогичным образом решается задача идентификации третьего процесса - управления состоянием почвенной среды.

Из схемы на рисунке 2.7 имеем три входа: температура воздуха  $x_1$ , влажность воздуха  $x_2$  и освещенность  $x_3$ . В этом случае задача идентификации текущей ситуации по результатам наблюдений  $X (G) = (g_1, g_2, g_3)$  будет иметь вид:

$$P^t = f(X_{i=3} = (g_1, g_2, g_3)) = ? \quad (2.42)$$

Решается задача нечеткой идентификации. Задается ЭМЗ типа Мамдани (2.1) – (2.4). Задаются множества входных и выходных переменных с соответствующими ФП и термами. Реализуется алгоритм принятия решения ЭС типа Сугено из п. 2.1.3. Правила БЗ берутся из таблиц 2.7 – 2.16.

В результате реализации алгоритма находится оценка состояния среды освещения  $\hat{X} = \langle X (i=3), T_X, \mu(X), t_i \rangle$ , определяющая меру принадлежности текущего состояния оптимуму почвенной среды  $X_{don} (i=3)$ .

Рассмотрим теперь задачу идентификации общей текущей ситуации

$S (X (i=1,2,3), 0)$ , охватывающую все состояния  $i$  в фиксированный момент времени  $t_i$ . Так как здесь рассматривается только состояние Среда, текущая ситуация  $S$  будет вектором  $\langle X, T_X; 0, 0, t_i \rangle$  без включения состояний  $Y$ .

Идентификация (оценка) текущей ситуации  $S(X(G))$  определяется с помощью функции  $\lambda (S(X(G)), S_{\partial}(X))$  (2.29) по критерию (2.30) из п 2.2.2.

Задается параметр  $\gamma$ , задающий степень уверенности эксперта в предложенной оценке, он равен 0.8. Реализуется рассмотренный выше алгоритм нечеткой идентификации. В результате применения алгоритма находится оценка  $\hat{S} (S(X(G)))$ , показывающая степень принадлежности ситуации  $S(X(G))$  множеству допустимых ситуации  $S_{\partial}(X)$  по всем трем состояниям.

В зависимости от определенной оценки  $\hat{S} (S(X(G)))$  выбирается соответствующий режим технологического управления, который будет описано в п. 2.3.

### 2.3.3 Алгоритм решения задачи идентификации текущей ситуации в суточном масштабе времени (задача 1)

Построим алгоритм решения задачи идентификации текущей ситуации на основе описанной задачи в предыдущем пункте. Он выполняется следующим образом:

- 1) Задание норм Среда (табл. 2.1-2.4);
- 2) Задание структуры, правил баз знаний и параметров функции принадлежностей (табл. 2.5-2.14);
- 3) Задание ситуационной ЭМЗ (2.26).
- 4) Задание ЭМЗ типа Сугено (2.1) – (2.4).
- 5) Задание исходных данных состояния Среда;
- 6) Перевод обычного времени в дискретное с помощью формулы (2.38);
- 7) Определение оценки ситуации Среда по первому состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=1), T_X, \mu (X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 8) Определение оценки ситуации Среда по второму состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=2), T_X, \mu (X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 9) Определение оценки ситуации Среда по третьему состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=3), T_X, \mu (X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 10) Задание параметра идентификации  $\gamma, \gamma \in [0,5 \dots 1]$ ;

11) Определение оценки текущей ситуации Среды  $\hat{S} \langle X(G), 0 \rangle$  с помощью функции  $\lambda (S(X(G), 0), S_0(X))$  (2.28) по критерию (2.30).

#### 2.3.4 Идентификация интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени (задача 2)

З а д а е т с я ситуационная ЭМЗ вида (2.26). Т р е б у е т с я построить алгоритм, реализующий последовательность операции по идентификации объекта управления  $\hat{S}_{int}(X(t_{bi}), Y(t_{bi}))$  ( $J=1,2,3$ ), которому соответствует векторы фиксированных значений входных  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$  и выходных состояний объекта  $Y = \langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$  по каждой  $J$ -фазе.

Алгоритм решения состоит из двух этапов: на первом этапе выполняется идентификация ОУ в суточном времени  $t_i$ ; на втором - идентификация ОУ в биологическом времени  $t_{bi}$ .

Идентификация ОУ в суточном времени  $t_i$  выполняется через каждые сутки, а идентификация ОУ в биологическом времени  $t_{bi}$  выполняется в определенные фазы развития (фенофазы)  $J = 1,2,3$  через интегральные показатели Среды и Растения.

Задается местоположение района, где выращивается СХК (географическая широта и долгота), агроклиматические условия климата (максимальная/минимальная температура, влажность воздуха, освещенность, NDVI, теплопериод, фотопериод, и т.д.). Эти данные задают нормы и условия Среды, и формируют правила БЗ.

Задается конкретный вид ОУ – вид / сорт растения, его биологическая характеристика (вегетационный период, показатель урожайности, фазы роста и развития, оптимальное число завязей, листьев, длина/вес плода, и т.д.). Эти характеристики задают оптимальные условия и нормы выращивания растения, и формируют правила БЗ.

Перед выполнением идентификации осуществляется сначала перевод непрерывного времени в дискретный суточный, затем в дискретный биологический для каждой фазы развития  $J = 1,2,3$ . Подынтервалы времени  $t_{bi} \in [0 \div T_{j=1}) \cup [T_{j=1} \div T_{j=2}) \cup [T_{j=2} \div T_{j=3}]$ . Моменты перехода фенофаз  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$  определяют границы этих подынтервалов.

Вычисление интегральных показателей среды и расчет моментов перехода  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$  рассматривается в задаче 3.

Процедура решения задачи аналогичная, как в предыдущем пункте. Она относится также к нечеткой идентификации ЭС типа Мамдани (2.1) – (2.4). Задаются множества входных и выходных переменных с соответствующими ФП и термами. Реализуется алгоритм принятия решения ЭС типа Сугено из п. 2.1.3. Правила БЗ берутся из таблиц 2.7 – 2.16.

В результате реализации алгоритма находится оценка ОУ  $\hat{S}_{int}(X(t_{bi}), Y(t_{bi}))$  ( $J=1,2,3$ ), определяющая меру принадлежности соответствующего фазы развития растения оптимуму  $S_{idon}(X_{opt}, Y_{opt}(J = 1,2,3))$ .

В зависимости от определенной оценки  $\hat{S}_{int}(X(t_{bi}), Y(t_{bi}))$  выбирается соответствующее агротехническое мероприятие, которое будет описано в п. 2.3.

### 2.3.5 Алгоритм решения задачи идентификации интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени (задача 2)

Построим алгоритм решения задачи идентификации объекта управления на основе описанной задачи в предыдущем пункте. Он выполняется следующим образом:

- 1) Задание норм Среды и Растения (табл. 2.1-2.6);
- 2) Задание структуры, правил баз знаний и параметров функции принадлежности (табл. 2.5-2.14);
- 3) Задание ситуационной ЭМЗ (2.26).
- 4) Задание ЭМЗ типа Сугено (2.1) – (2.4).
- 5) Задание исходных данных состояния Среды;
- 6) Задание исходных данных состояния Растения;
- 7) Перевод обычного времени в дискретное  $D(t_i)$  с помощью формулы (2.38);
- 8) Перевод обычного времени в дискретное биологическое  $J(t_{bi})$  с помощью формулы (2.39);
- 9) Вычисление интегральной оценки ситуации объекта управления в период  $\hat{S}_{int}(t_{bi} \in [0 \div T_{j=1}])$  по критерию (2.29):

$$\hat{S}_{int}(X_{i=1,n}(t_{bi}), Y_{j=1,m}(t_{bi})) = \bigwedge_{t_i=0 \div t_{bi}} \hat{S}(S(X_i(t_{bi}), Y_j(t_i=0))) \quad (2.43)$$

Здесь используются все текущие ситуации Среды по всем ( $i = \overline{1, n}$ ) состояниям, которые заранее определены в п. 2.3.3:  $\hat{S}(S(X_i, Y_j(t_0))), \hat{S}(S(X_i, Y_j(t_1))), \dots, \hat{S}(S(X_i, Y_j(t_{bi})))$ .

- 10) Вычисление интегральной оценки ситуации объекта управления в период  $\hat{S}_{int}(t_{bi} \in [T_{j=1} \div T_{j=2}])$  по формуле (2.43);

- 11) Вычисление интегральной оценки ситуации в течение  $\hat{S}_{int}(t_{bi} \in [T_{j=2} \div T_{j=3}])$  аналогично по формуле (2.43).

### 2.3.6 Определение моментов перехода фенофаз (задача 3)

З а д а е т с я ситуационная ЭМЗ вида (2.26). Т р е б у е т с я построить алгоритм, реализующий последовательность операции по определению моментов  $t^*, t^{**}, t^{***}$ , определяющие условия перехода фаз развития Растения.

Задаются все данные об объекте управления: место выращивается СХК (географическая широта и долгота), агроклиматические условия климата (максимальная/минимальная температура, влажность воздуха, освещенность, NDVI, теплопериод, фотопериод, и т.д.); вид/сорт растения и его биологическая

характеристика (вегетационный период, показатель урожайности, фазы роста и развития, оптимальное число завязей, листьев, длина/вес плода, и т.д.), которые задают оптимальные условия и нормы выращивания растения, и формируют правила БЗ.

Перед выполнением идентификации осуществляется сначала перевод непрерывного времени в дискретный суточный, затем в дискретный биологический для каждой фазы развития  $J = 1, 2, 3$ . Подынтервалы времени  $t_{bi} \in [0 \div T_{j=1}) \cup [T_{j=1} \div T_{j=2}) \cup [T_{j=2} \div T_{j=3}]$ . Моменты перехода фенофаз  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$  определяют границы этих подынтервалов.

Вычисление интегральных показателей среды и расчет моментов перехода  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$  рассчитываются на основе уже определенных показателей суточного времени.

Алгоритм решения состоит из трех этапов: определение момента перехода фазы 1, фазы 2 и фазы 3 в биологическом времени  $t_{bi}$ .

Условие перехода из фазы 1 в фазу 2 – освещенность (состояние Среды) и достижение порога вегетации (состояние Растения). Условие перехода из фазы 2 в фазу 3 – одновременное достижение значения теплопериода (состояние Среды) и фотопериода (состояние Растения).

В результате реализации алгоритма находятся моменты  $t^*$ ,  $t^{**}$ ,  $t^{***}$ . Эти моменты определяют технологические режимы управления и выбор агротехнических управлений, описанных в главе 3.

### 2.3.7 Алгоритм решения задачи моментов перехода фенофаз (задача 3)

Построим алгоритм решения задачи моментов перехода фаз объекта управления в биологическом масштабе времени. Будут использованы результаты предыдущей задачи. Алгоритм выполняется следующим образом:

- 1) Задание норм Среды и Растения (табл. 2.1-2.6);
- 2) Задание структуры, правил баз знаний и параметров функции принадлежности (табл. 2.5-2.14);
- 3) Задание ситуационной ЭМЗ (2.26).
- 4) Задание ЭМЗ типа Сугено (2.1) – (2.4).
- 5) Задание исходных данных состояния Среды;
- 6) Задание исходных данных состояния Растения;
- 7) Перевод обычного времени в дискретное  $D(t_i)$  с помощью формулы (2.38);
- 8) Перевод обычного времени в дискретное биологическое  $J(t_{bi})$  с помощью формулы (2.39);
- 9) Вычисление показателей Среды:

#### 9.1 Определение показателей эффективных дневных/ночных температур:

$$x_1^{\text{эфф}}(D(t_i) = 1) = \begin{cases} 1, & x_1^{\text{эфф}} \in x_{1, \text{opt}}^{\text{эфф}}(D(t_i) = 1) \\ 0, & x_1^{\text{эфф}} \notin x_{1, \text{opt}}^{\text{эфф}}(D(t_i) = 0) \end{cases} \quad (2.44)$$

$$x_1^{\text{эфф}} (D(t_i) = 0) = \begin{cases} 1, x_1^{\text{эфф}} \in x_{1,\text{opt}}^{\text{эфф}} (D(t_i) = 1) \\ 0, x_1^{\text{эфф}} \notin x_{1,\text{opt}}^{\text{эфф}} (D(t_i) = 0) \end{cases} \quad (2.45)$$

где  $x_1^{\text{эфф}} (D(t_i))$  – эффективные дневные/ночные температуры;

9.2 Определение показателя эффективной освещенности:

$$x_2^{\text{эфф}} (D(t_i) = 1) = \begin{cases} 1, x_3^{\text{эфф}} \in x_{3,\text{opt}}^{\text{эфф}} (D(t_i) = 1) \\ 0, x_3^{\text{эфф}} \notin x_{3,\text{opt}}^{\text{эфф}} (D(t_i) = 1) \end{cases} \quad (2.46)$$

где  $x_2^{\text{эфф}} (D(t_i))$  – эффективная освещенность;

10) Вычисление интегральных показателей среды и расчет моментов перехода из фазы 1 в фазу 2, то есть в  $t_{\text{bi}} \in [0 \div T_{j=1}) \cup [T_{j=1} \div T_{j=2})$ :

10.1 Расчет фотопериода:

$$T1 = S(\sum x_2^{\text{эфф}} * t_i, J(t_{\text{bi}})) \text{ и } B1 = 1, \text{ если}$$

$$S(\sum x_2^{\text{эфф}} * t_i, J(t_{\text{bi}})) \geq S_{\text{iopt}}(\sum x_2^{\text{эфф}} * t_i) \quad (2.47)$$

10.2 Расчет суммарной вегетации:

$$T2 = \text{veg} \text{ и } B2 = 1, \text{ если } \prod_{t_u=0}^{T-1} y_1(t_i) \in S_{\text{iopt}}(Y_1(D(t_i) = 1), J(t_{\text{bi}})) \quad (2.48)$$

10.3 Расчет момента  $t^{**}$  наступления фазы 2:

$$t_{\text{bi}} (J=1,2) = t^{**} (x_2, y_1(t_{\text{bi}})), \text{ если } f(B1, B2) = 1 \quad (2.49)$$

где  $f(B1, B2)$  – булева функция, определяемая как конъюнкция

$$f(B1, B2) = \wedge (B1, B2) \quad (2.50)$$

11) Вычисление интегральных показателей среды и расчет моментов перехода из фазы 2 в фазу 3, то есть в  $t_{\text{bi}} \in [T_{j=1} \div T_{j=2}) \cup (T_{j=2} \div T_{j=3})$ :

11.1 Расчет суммы эффективных дневных температур:

$$T3 = S(\sum x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=1), J(t_{\text{bi}})) \text{ и } B3=1, \text{ если}$$

$$S(\sum x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=1), J(t_{\text{bi}})) \geq S_{\text{iopt}}(\sum x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=1), J(t_{\text{bi}})) \quad (2.51)$$

11.2 Расчет суммы эффективных ночных температур:

$$T4 = S_{\text{iopt}}(x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=0), J(t_{\text{bi}})) \text{ и } B4 = 1, \text{ если}$$

$$S(\sum x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=0), J(t_{\text{bi}})) \geq S_{\text{iopt}}(\sum x_1^{\text{эфф}} (D(t_i)=0), J(t_{\text{bi}})) \quad (2.52)$$

### 11.3 Расчет нормы полива:

$$T5 = S(\sum x_3^{\text{эфф}}(D(t_i)=1), J(t_{bi})) \text{ и } B5 = 1, \text{ если} \\ S(\sum x_3^{\text{эфф}}(D(t_i)=1), J(t_{bi})) \geq S_{\text{опт}}(\sum x_3^{\text{эфф}}(D(t_i)=1), J(t_{bi})) \quad (2.53)$$

### 11.4 Расчет значения теплопериода:

$$TEMP = T3 + T4 \quad (2.54)$$

### 11.5 Расчет момента $t^{***}$ наступления фазы 3:

$$t_{bi}(J=1,2,3) = t^{***}(x_1, x_2, x_3(t_{bi})), \text{ если } f(B1, B2, B3, B4, B5) = 1 \quad (2.55)$$

где  $f(B1, B2, B3, B4, B5)$  – булева функция, определяемая как конъюнкция

$$f(B1, B2, B3, B4, B5) = \wedge(B1, B2, B3, B4, B5) \quad (2.56)$$

### 2.3.8 Ситуационное управление агротехническими мероприятиями (задача 5)

З а д а е т с я ситуационная ЭМЗ вида (2.26). Т р е б у е т с я построить алгоритм, реализующий последовательность операции по выбору управляющих решений  $\{u_k^a\}$ ,  $k = \overline{1, s}$  в зависимости от оценки текущей ситуации  $\hat{S}(0, Y(t_i))$ .

В данном случае каждому управляющему решению соответствует соответствующее  $k$ - агротехническое мероприятие (таблица 2.14).

Исходными данными для этой задачи являются результаты решения задачи идентификации текущей ситуации, поставленной в п. 2.3.1 и 2.3.2.

Алгоритм решения задачи состоит из двух этапов:

а) выбираются  $k$ -допустимые решения  $\{u^a(S)\} \in U_{\partial}^a$  из множества типовых решений  $\{u_k^a\} \in U_k^a$ , которые являются более предпочтительными в текущей ситуации  $S(0, Y(t_i))$ ;

б) из допустимых решений  $\{u^a(S)\}$  выбирается одно эффективное управление  $u_k^{a*} \in U_{\partial}^a$ , наиболее оптимально реализующее с точки зрения эксперта исход текущей ситуации  $S(0, Y(t_i))$ ,

Исход в данном случае понимается как близкий к оптимуму результат:

$$S(0, Y(t_i)) \rightarrow S_{\text{дон}}(0, Y(t_i)).$$

Задается конкретный вид ОУ – вид / сорт растения, его биологическая характеристика (вегетационный период, показатель урожайности, фазы роста и развития, оптимальное число завязей, листьев, длина/вес плода, и т.д.). Задается район, где выращивается СХК (географическая широта и долгота), агроклиматические условия климата.

Т р е б у е т с я найти эффективное управление  $u_k^{a*}$  из набора допустимых управлений  $\{u^a(S)\}$  по критерию эффективности управления (2.34), аргумент которого является максимум функции (2.35).

Для сравнения допустимых решений используется метод парных сравнений, представляющий процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар. Этот метод отличается от метода непосредственной оценки тем, что в последнем методе выполняется упорядочивание всех объектов сразу. Поэтому метод парных сравнений представляет более простую задачу для эксперта [98].

А л г о р и т м с и т у а ц и о н н о г о у п р а в л е н и я а г р о т е х н и ч е с к и м и м е р о п р и я т и я м и т е п л и ц ы .

- 1) Задание норм Среды и Растения (табл. 2.1-2.6);
- 2) Задание структуры, правил баз знаний и параметров функции принадлежности (табл. 2.7-2.16);
- 3) Задание ситуационной ЭМЗ (2.26).
- 4) Задание ЭМЗ типа Сугено (2.1) – (2.4).
- 5) Задание исходных данных состояния Среды;
- 6) Перевод обычного времени в дискретное с помощью формулы (2.38);
- 7) Задание параметра идентификации  $\gamma, \gamma \in [0,5 \dots 1]$ ;
- 8) Определение оценки текущей ситуации Среды  $\hat{S} \langle 0, Y(t_i) \rangle$  с помощью функции  $\lambda (S(0, Y(t_i)), S_{\partial}(Y))$  (2.28) по критерию (2.30);
- 9) выбор набора  $k$ -допустимых управлений  $\{u^a(S)\} \in U_{\partial}^a$  из множества типовых решений  $\{u_k^a\} \in U_k^a$ , которые являются более предпочтительными в текущей ситуации  $S(0, Y(t_i))$  по критерию (2.33);
- 10) Попарное сравнение допустимых решений  $\{u^a(S)\}$  между собой, используя метод парных сравнений и выбор эффективного управления  $u_k^{a*} \in \{u^a(S)\}$  по критерию (2.34) и (2.35).

## Выводы по второй главе

Во второй главе была рассмотрена постановка задачи принятия решения с помощью экспертной системы и алгоритм ее обучения. Была построена модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” системы, состоящая из трех блоков: Растение (модель объекта), Среда (модель возмущения), Ситуация-Управление (модель регулятора в виде НЛК).

Недостаток рассмотренной в первой главе модели Полуэктова Р.А. “Почва-Растение-Атмосфера” в сложном математическом описании и больших временных ресурсах для ее реализации. Предлагаемая в работе модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” и реализованная на ее основе система “Ақылды жылыжай” в отличие от последней не требует точной математической модели и позволяет работать в условиях нечеткой информации.

Последняя модель описывается в виде экспертной системы, структура которой включает базы знаний: AQILDI\_JILJAY, AQILDI\_PLANT, FIS\_CONTROL\_REAL\_TIME, FIS\_CONTROL\_OFFLINE. Эта структура позволяет решить следующие задачи:

- 1 - идентификация текущей ситуации в суточном масштабе времени;

2 - идентификация интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени;

3 - определение моментов перехода из одной фазы в другую;

4 - ситуационное управление технологическими режимами;

5 - ситуационное управление агротехническими мероприятиями теплицы.

Разработаны алгоритмы интеллектуальной поддержки решений вышеизложенных пяти задач. Первые три задачи относятся к задачам идентификации, четвертая и пятая задачи – к задачам принятия решений.

По результатам второй главы можно сделать следующие **рекомендации**:

- для исследования объекта управления (Растения) и возмущений (Среды) и применить методы биологического эксперимента;
- в качестве Регулятора применить Компенсатор возмущений для каждого канала возмущения, позволяющего компенсировать возмущения в статическом режиме;
- в качестве Регулятора в условиях нечеткой информации применить Нечеткий логический контроллер, объединяющий все три канала компенсации возмущений в единую логику управления.

## 3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

### 3.1 Биологический эксперимент для исследования роста и развития растений в теплице

Перед проведением любого эксперимента определяются его цель и задачи. Это может быть оценка роста растений, возможностей новых сортов, технологий или элементов технологий, и т. д. Решить поставленные задачи можно с помощью лабораторных, вегетационных, рекогносцировочных, лабораторно-полевых и производственно-полевых опытов [19, с. 142].

После составления по общепринятой методике схемы опыта и выбора участка под опыт принимают решение о *конфигурации, размере делянок и повторности опыта*. Последнее зависит от овощной культуры, вида опыта, места его закладки (в открытом или в защищенном грунте), от используемой техники и т. п.

Дать хорошую оценку результатам исследований можно лишь при наличии данных *наблюдений за характером роста и развития растений* на всем протяжении опытов на основе анализа метеорологических условий. К обязательным наблюдениям при проведении большинства экспериментов относятся *метеорологические* (температура и влажность почвы и воздуха, освещенность) и *фенологические*. Учитывают полевую всхожесть каждый день после появления всходов и густоту стояния растений. Через 10...20 дней проводят *фенологические наблюдения*. Для этого в 3...4 повторениях по каждому варианту выделяют пробы по 5... 10 растений (подряд, исключая больные и поврежденные). При проведении наблюдений принимают во внимание такие показатели, как число и длина листьев (иногда и их площадь), масса листьев или плодов, соотношение и число мужских и женских цветков, длина основных и боковых побегов, корней, размеры и масса (сухая и сырая) корнеплодов, луковиц, плодов, динамика их нарастания и другие показатели. Отмечают также появление, распространение болезней и вредителей, засоренность посевов, отклонения от нормы в характере роста и развития растений. Выясняют причины этих отклонений, случайность или их закономерную обусловленность.

*Уборку и учет урожая* на всех делянках опыта проводят одним способом (если способ уборки не является вариантом опыта) и желательно за один день. В крайнем случае на второй день убирают урожай на одной или нескольких повторностях (целиком все варианты повторности). Уборку ведут по повторениям, а не по вариантам, то есть сначала убирают делянки всех вариантов (по отдельности) одного, затем другого и последующих повторений.

Среднюю массу корнеплодов, плодов растений семейства Пасленовые, огурца, луковиц определяют из средней пробы, взятой с двух несмежных повторений. Масса такой пробы обычно не превышает 5...10 кг.

Для уверенности в достоверности полученных результатов исследований, в эффективности изучаемых приемов, сортов и т.д., проводят их

статистическую оценку. Этому предшествует группировка полученных данных в таблицы в соизмеримых для каждого показателя единицах (кг/м, т/га и т. д.). В таблицах данные группируют в соответствии со схемой опыта (по вариантам и повторениям).

Важной задачей эксперимента является определение **минимального** (достаточного) **объема выборки  $n$**  из общего числа наблюдений, то есть из генеральной совокупности  $N$ . Здесь  $n$  – количество выбранных растений для статической обработки. Объем выборки определяется по формуле [101]:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2},$$

где  $t$  - коэффициент доверия (выбираем из таблицы функции Лапласа),  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение,  $\delta$  - точность оценки.

При заданных  $N = 400$ ;  $t = 1.3$ ;  $\sigma = 2$ ;  $\delta = 0.25$ ;  $\bar{x} = 6$ ;  $p = 0.8$  объем выборки  $n$  равен 108. В случае теплицы КазНУ им. Аль-Фараби, где посажено 400 растений, будет достаточно выбрать 108 растений для полного описания общей генеральной совокупности.

Результаты лабораторных и лабораторно-полевых исследований обрабатывают чаще путем расчета средних показателей (среднего арифметического  $M$ ). Для оценки точности этого показателя вычисляют ошибку среднего арифметического, относительную ошибку, или, точность опыта. Хорошей считается точность опыта не выше 3%, допустимой - не больше 5%. Расчеты ведут в соответствии с методикой опытного дела.

Средние данные по всхожести, росту, урожайности и другим показателям следует вычислять на основе одинакового числа повторений. *Статистическую обработку* полученных данных (прежде всего урожайности) проводят, как правило, методом дисперсионного анализа с использованием компьютера, что ускоряет обработку полученных данных, снижает вероятность ошибки при расчете, облегчает накопление данных и сравнительную оценку результатов различных экспериментов, включая исследования прошлых лет.

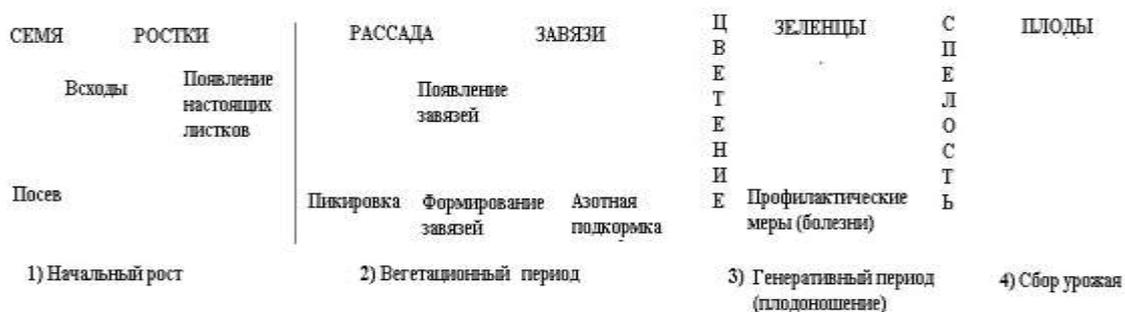


Рисунок 3.1 Фазы развития растения и агротехнические мероприятия

На рисунке 3.1 показан процесс проведения агротехнических мероприятий в соответствии с фазой развития растения. Этот процесс включает четыре этапа: начальный рост, вегетационный и генеративный периоды, сбор урожая.

### 3.1.2 Биологический эксперимент в домашней теплице

Для получения экспериментальных данных наблюдений за ростом и развитием растений был проведен биологический эксперимент 1. Этот эксперимент проводится в малом масштабе с помощью разработанного макета и является предварительным для эксперимента 2.

Характеристика биологического эксперимента:

**Ц е л ь и з а д а ч и:** провести лабораторно-вегетационный опыт для исследования динамики роста и оценка условий среды оптимуму;

**М е с т о п р о в е д е н и я** опыта: домашняя минитеплица;

**В р е м я п р о в е д е н и я** опыта: весенний-летний сезон;

**П е р и о д в ы п о л н е н и я** опытов: весь вегетационный период, включающий 3 фазы: фазу вегетационного роста (рассада), цветение и генеративную фазу (плодоношение);

**К о н ф и г у р а ц и я** опыта:

**Схема** выращивания: формирование растения в один стебель; размер делянок – 1 кв. м (2 мешка), число повторностей 5-6;

**Технологии** выращивания: тепличный грунт, состав – биогумус.

Для регулирования процессов микроклимата реализуются три режима: а) режим охлаждения/обогрева: вентиляция; б) режим освещения: естественное и искусственное; в) режим полива: капельный полив.

**Б и о л о г и ч е с к а я х а р а к т е р и с т и к а** растения: гибридный сорт огурца “Младший лейтенант” [102]. Высокоурожайный скороспелый партенокарпический пучковый корнишонный гибрид женского типа цветения. Характеризуется интенсивным ростом, хорошим отрастанием боковых побегов в сочетании со вторым типом саморегулирования ветвления. В узлах формируется от 2-3 до 5-7 и более завязей. Зеленцы ярко-зеленые, бугорчатые, белошипые длиной 9-12 см. Засолочные, высокие вкусовые и консервные качества. Гибрид устойчив к мучнистой росе, оливковой пятнистости, вирусу огуречной мозаики, толерантен к ложной мучнистой росе. Рекомендуются для открытого и защищенного грунта.

**А г р о т е х н и ч е с к и й п л а н р а б о т** представлен в таблице 3.1

Таблица 3.1 Агротехнический план работы

№	Наименование работ	Сроки выполнения
1	Посев семян	Апрель
2	Пикировка	Апрель
3	Высадка рассады	Апрель
4	Ручные операции по уходу за томатами (рыхление почвы, прополка, окучивание, полив)	Начальная и вегетационная фаза
5	Визуальный осмотр, измерение, обработка данных измерения; Анализ работы экспертной системы и корректировка при необходимости.	через каждые 7 дней в ходе вегетации
6	Контроль и управление ростом растения с	Все фазы

	помощью мобильного приложения “Microclimate GH”	
7	Борьба с болезнями растений	Май
8	Пасынкование	Май
9	Уборка урожая	В период плодоношения

**Макет теплицы.** Для экспериментов в малом масштабе был разработан макет теплицы [103]. В состав оборудования макета теплицы (рисунок 3.2) входят: бак (1), клапан полива (2), магистральный трубопровод (3), капельницы (4), датчик почвы (5), вентилятор (6), датчик температуры и влажности (7), прожектор (8), датчик света (9), Блок управления (10), реле клапана полива (11), реле вентилятора (12), реле прожектора (13).

Размеры теплицы 1,5 м x 1,4 м x 0,8 м, ее можно свободно расположить под окном, в нее могут поместиться 2 стандартных горшка размерами 70 см x 60 см x 30 см. В качестве строительных материалов в теплице использованы доступные и недорогие материалы (пластик, ПВХ, и т.д.), что значительно снижает затраты на строительство.

В составе Блока управления имеются Передатчик и Приемник.

В макете теплицы предусмотрена возможность регулирования трех ТП и соответственно имеются три контура: а) Контур вентиляции; б) Контур освещения; в) Контур капельного полива. Подробное описание работы теплицы приводится в главе 5.

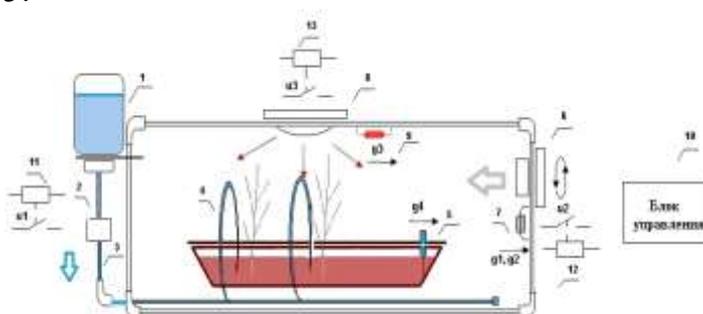


Рисунок 3.2 Макет теплицы и ее технологическая схема

### 3.1.3 Биологический эксперимент в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби

Для исследования динамики роста и развития растения, а также оценки оптимальных условий среды в более масштабном объеме был проведен биологический эксперимент 2.

В данном эксперименте были использованы данные предыдущего эксперимента, который проводился в малом масштабе (в домашних условиях). Биологическая характеристика и методы эксперимента здесь отличаются, так как процессы происходят в биоценозе сообщества растений.

Характеристика биологического эксперимента:

**Ц е л ь и з а д а ч и:** провести лабораторно-вегетационный опыт для исследования динамики роста и оценка условий среды оптимуму.

Место проведения опыта: исследовательская теплица КазНУ им. аль-Фараби (весенняя неотапливаемая теплица).

Время проведения опыта: весенний-летний сезон.

Период выполнения опытов: весь вегетационный период, включающий 3 фазы: фазу вегетационного роста (рассада), цветение и генеративную фазу (плодоношение).

Конфигурация опыта:

Схема выращивания: формирование растения в один стебель; размер делянок – 1 кв. м (2 мешка), число повторностей 5-6. Количество растений  $N = 400$ , то есть 100 растений по 4 ряда. Объем выборки  $n = 108$ .

Технологии выращивания: тепличный грунт, состав – биогумус.

Для регулирования процессов микроклимата реализуются три режима: а) режим охлаждения: вентиляция; б) режим освещения: естественное и искусственное; в) режим полива: капельный полив.

Биологическая характеристика растения: гибридный сорт огурца “Младший лейтенант”. Высокоурожайный скороспелый партенокарпический пучковый корнишонный гибрид женского типа цветения. Характеризуется интенсивным ростом, хорошим отрастанием боковых побегов в сочетании со вторым типом саморегулирования ветвления. В узлах формируется от 2-3 до 5-7 и более завязей. Зеленцы ярко-зеленые, бугорчатые, белошипые длиной 9-12 см. Засолочные, высокие вкусовые и консервные качества. Гибрид устойчив к мучнистой росе, оливковой пятнистости, вирусу огуречной мозаики, толерантен к ложной мучнистой росе. Рекомендуется для открытого и защищенного грунта;

В целях проведения эксперимента приводится схема третьего блока исследовательской теплицы университета (рисунок 3.3). Площадь блока – три соток (длина 60 м, ширина 5 м, высота 3.6 м). Область для выращивания включает 4 ряда, в каждом ряду – по 3 частей. Общее число частей –  $4 \times 2 = 8$ . Каждый из 8 частей имеет свой клапан полива (на рисунке 3.2 изображен в виде белого незакрашенного квадрата). Можно управлять подачей воды, открыв/закрыв соответствующий клапан полива. Через каждый клапан по трем капельницам полива вода поступает к  $8 \times 3 = 24$  узлам. Для мониторинга состояния растения у каждого узла в окрестностях почвенной зоны располагается свой передатчик со встроенными датчиками: температуры и влажности воздуха, освещенности и влажности почвы.

В центре теплицы, между третьим и четвертым рядом размещаются прожекторы (на рисунке 3.3 выделены оранжевым цветом) и вентиляторы (на Рисунок выделены голубым цветом). Между рядами есть свободное пространство для возможности выполнения агротехнических мер, например, визуального осмотра, и т.д.

Общее число плат передатчиков - 24. Общее число плат приемников с реле – 5. Из них три – для включения/выключения вентиляторов и прожекторов. А остальные два – для включения/ выключения клапанов полива. Таким образом, один приемник обслуживает  $24/5 \approx 5$  приемников (5:1).

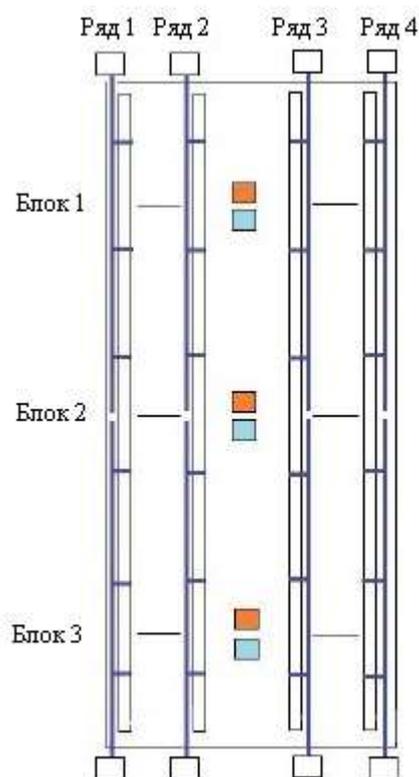


Рисунок 3.3 Схема третьего блока КазНУ им. аль-Фараби.

## 3.2 Синтез Компенсатора возмущений

### 3.2.1 Исследование влияния возмущений Среды и построение линейной параметрической модели

Как было оговорено в первой главе, окружающая среда оказывает большое влияние на рост и развитие растения. В рамках рассматриваемой модели степень влияния Среды на Объект (Растение) относится к *сигналу возмущения*.

Поэтому целесообразно определить степень влияния факторов Среды на физиологию растения с целью устранения возмущения для соответствующего канала влияния. В п.2.2 были подробно рассмотрены возмущающие воздействия (фактора Среды):

- Температура воздуха  $g_1$ , измеренная датчиком температуры;
- Влажность воздуха  $g_2$ , измеренная датчиком влажности;
- Освещенность  $g_3$ , измеренная датчиком света (фотодатчиком);
- Влажность почвы  $g_4$ , измеренная датчиком почвы.

Факторы  $g_1$  и  $g_2$  образуют один канал регулирования Состояние воздуха.

Алгоритм исследования влияния факторов Среды, целью которой является получение линейной параметрической модели из следующих этапов:

- 1) Сбор данных (мониторинг) Среды внутри теплицы;
- 2) Статистическая обработка данных;
- 3) Параметрическая идентификация модели;
- 4) Анализ наблюдаемости, управляемости модели;
- 5) Синтез регулятора – компенсатора возмущений.

**1 Сбор данных.** Для выполнения сбора данных (мониторинга) Среды был проведен биологический эксперимент, подробно описанный в главе 3. Эксперимент охватывает весь вегетационный период - 83 дней. Результаты эксперимента показаны на графике (рисунки 3.4 – 3.7). Данные сохраняются в облачном хранилище и подвергаются статической обработке. В результате сбора данных создается в ы б о р к а  $\{g1(t_{ii}), g2(t_{ii}), g3(t_{ii}), g4(t_{ii})\}$  с шагом дискретизации  $(t_{ii}) = 1$  мин. То есть объем выборки составляет  $N = 115\ 200$  (60мин\*24ч\*80дней). Сбор данных осуществляется датчиком, имеющим частоту опроса не ниже  $1/t_{ii}$  и высокую чувствительность, позволяющую реагировать на малейшие пульсации шума  $\pm\sigma_g$ , описываемые как среднеквадратическое отклонение (СКО).

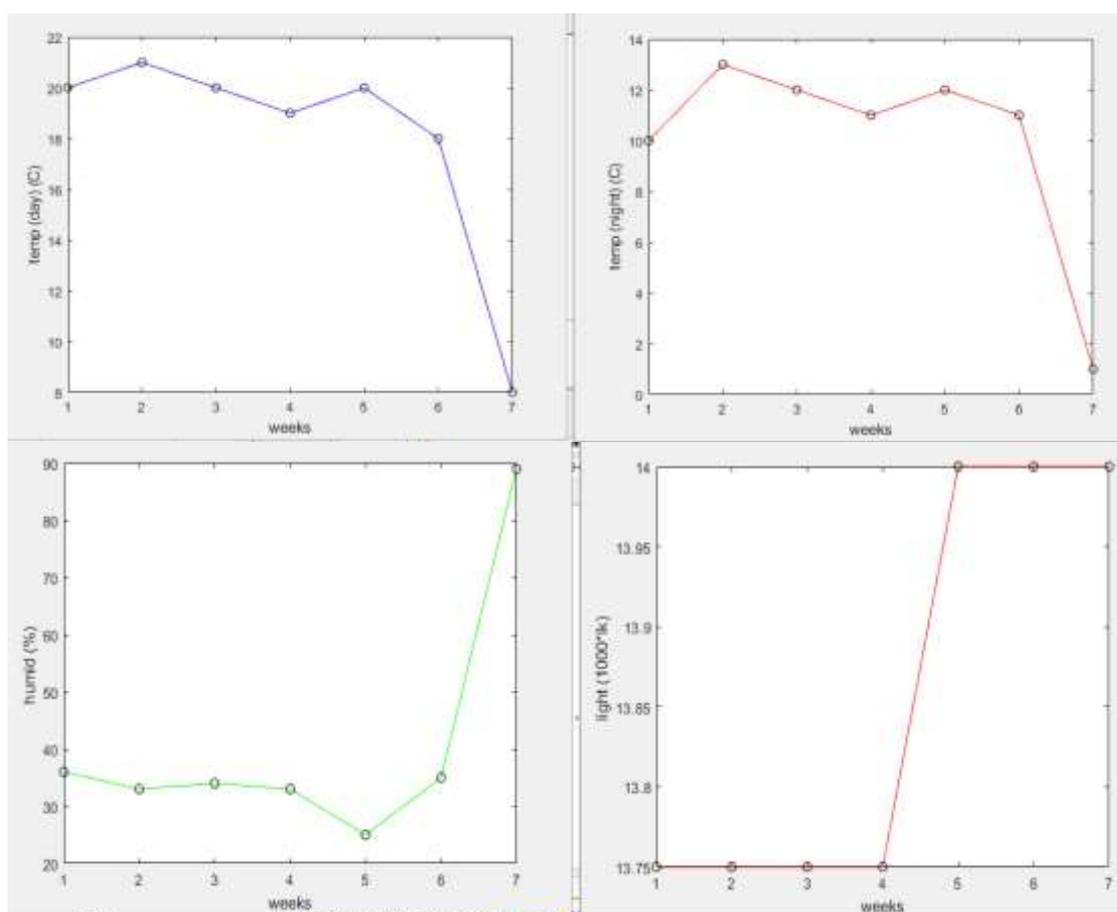


Рисунок 3.4. Данные мониторинга Среды за первую неделю по четырем факторам (суточный масштаб)

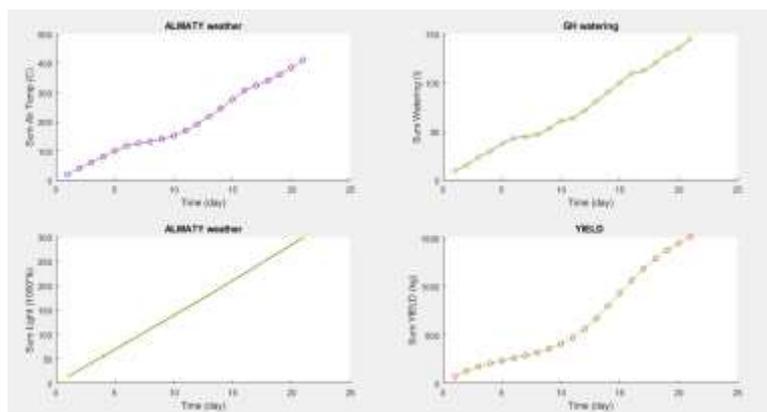


Рисунок 3.5. Данные мониторинга Среды и Растения в течение первой фазы развития Растения (0 - 21 дни)

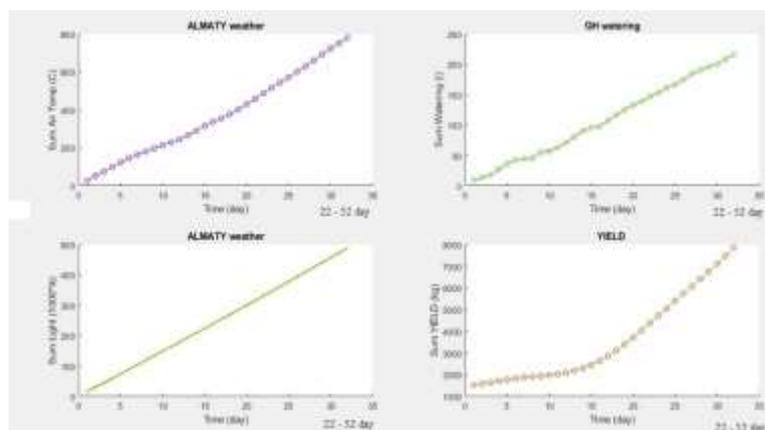


Рисунок 3.6. Данные мониторинга Среды и Растения в течение второй фазы развития Растения (22 - 52 дни)

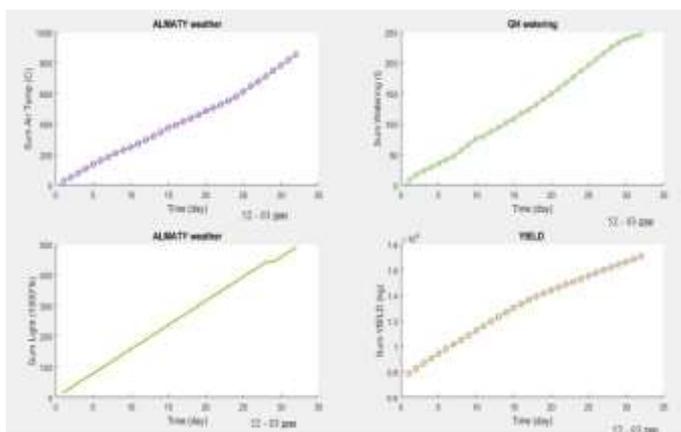


Рисунок 3.7. Данные мониторинга Среды и Растения в течение третьей фазы развития Растения (52 – 83 дни)

**2 Статистическая обработка данных.** Целью статической обработки данных является определение статических характеристик случайных величин для последующего анализа модели [104]. В нашем случае важно определить математическое ожидание  $m_g$  и средне-квадратическое отклонение  $\sigma_g$  за каждые  $i$ -е с у т к и (где  $i$  - номер) для всех четырех факторов (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Статистические характеристики случайного процесса

Фактор	Математическое ожидание $m_g = M(g)$	Средне-квадратическое отклонение $\sigma_g = \sqrt{D(g)}$
Температура воздуха днем $D(t_i) = 1$	$m_{Temp}(t_i) = \frac{g1(t_{ii})}{\sum_{(ii)}}$	$\sigma_{Temp}(t_i) = \sqrt{\sum_{(ii)} (g1(t_{ii}) - m_{Temp}(t_i))^2}$
Температура воздуха ночь $D(t_i) = 0$		
Влажность воздуха ( $t_i$ )	$m_{Hum}(t_i) = \frac{g2(t_{ii})}{\sum_{(ii)}}$	$\sigma_{Hum}(t_i) = \sqrt{\sum_{(ii)} (g2(t_{ii}) - m_{Hum}(t_i))^2}$
Освещенность $D(t_i) = 1$ (только днем)	$m_{Light}(t_i) = \frac{g3(t_{ii})}{\sum_{(ii)}}$	$\sigma_{Light}(t_i) = \sqrt{\sum_{(ii)} (g3(t_{ii}) - m_{Light}(t_i))^2}$
Влажность почвы ( $t_i$ )	$m_{Soil}(t_i) = \frac{g4(t_{ii})}{\sum_{(ii)}}$	$\sigma_{Soil}(t_i) = \sqrt{\sum_{(ii)} (g4(t_{ii}) - m_{Soil}(t_i))^2}$

В суточном масштабе времени ( $t_i$ ) статистические характеристики  $m_g$  и  $\sigma_g$  для всех факторов будут постоянными. В ходе мониторинга было выявлено, что закон изменения случайной величины (фактора) описывается *нормальным* (процесс Гаусса) законом с двумя статическими параметрами  $m_g \pm \sigma_g$ .

Так, например, для конкретной рассматриваемой недели 15-22 апреля для Алматы значения фактора влияния будут:

Таблица 3.3. Статистические характеристики случайного процесса за 12 – 18 апреля (1 неделя)

Фактор и показатели	Математическое ожидание $m_g = M(g)$	Средне-квадратическое отклонение $\sigma_g = \sqrt{D(g)}$
Температура воздуха днем $D(t_i) = 1$	$m_{Temp} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_{Temp} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура воздуха ночь $D(t_i) = 0$	$m_{Temp} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_{Temp} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Влажность воздуха ( $t_i$ )	$m_{Hum} = 28 \text{ } \%$	$\sigma_{Hum} = 8 \text{ } \%$
Освещенность $D(t_i) = 1$ (только днем)	$m_{Light} = 12 \text{ КЛК}$	$\sigma_{Light} = 1 \text{ КЛК}$
Влажность почвы ( $t_i$ )	$m_{Soil} = 60 \text{ } \%$	$\sigma_{Soil} = 12 \text{ } \%$
Интервал - число дискретных шагов (неделя – дневные часы)	$n_{\text{день}} = \sum_{(ii)} = 84 \text{ ч}$	
Интервал - число дискретных шагов (неделя – ночные часы)	$n_{\text{ночь}} = \sum_{(ii)} = 84 \text{ ч}$	

Рассчитанные в таблице 3.3 значения  $m_g$  и  $\sigma_g$  являются *статическими ошибками регулирования*, которые необходимо будет устранить с помощью Регулятора. Цель Регулятора (Компенсатора возмущений) – формирование управляющего воздействия, обеспечивающего минимум статической ошибки в заданный период времени [105].

**3 Параметрическая идентификация модели.** Этот этап необходим для расчета параметров модели в виде пространства состояний [106]:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A x(t) + B u(t) + e(t) \\ y(t) &= C x(t), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $x(t)$  – вектор переменных состояний,  $u(t)$  – вектор управлений,  $y(t)$  – вектор измеряемых параметров,  $t$  – время,  $e(t)$  – возмущение (шум),  $A, B, C$  – матрицы параметров состояний, управлений и измеряемых параметров.

Ниже приводятся отдельно модель Среды (возмущений) в суточном масштабе и модель Растения (объекта управления) в биологическом масштабе времени. Она описывает задачу Идентификации параметров Среды и Растения и Среды.

### Модель Среды (возмущений).

$$\begin{aligned} gx_i(t_i+1) &= GA_i gx_i(t_i) + GB_i u_i^k(t_i) + g_i^k(p, t_i) \\ gy_i(t_i) &= GC_{ih} gx_i(t_i), \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$i \in (0, T_i), gx_i(0) = gx_0, \quad (3.3)$$

$$g_i^k(p, t_i) = p_i^k * \sin(t_i), \quad (3.4)$$

где  $gx_i(t_i)$  – вектор переменных состояний Среды,  $u_i(t_i)$  – вектор управлений;  $g_i^k(p, t_i)$  – вектор контролируемых (параметрических) возмущений Среды в суточном масштабе ( $g_i^k(p, t_i)$  – гармоническая функция с параметром  $p_i$ );  $gy_i(t_i)$  – вектор измеряемых параметров;  $GA_i, GB_i$  – матрицы перехода состояний, влияния управлений размерностей  $[mx1xkezenI]$ ,  $[mx1xkezenI]$ ;  $GC_{ih}$  – матрица преобразования измерительных датчиков в  $t_i$  моменты времени размерности  $[kezenIx1]$ ,  $i$  – номер суточного режима ( $i = 1, 2, \dots, kezenI$ );  $ih$  – шаг суточного времени (равен 1 часу);  $T_i$  – момент смены суточного режима;  $gx_i(0)$  – начальные условия; вектор  $g_i^k(p, t_i)$  имеет три состояния: температура воздуха, освещенность и влажность почвы ( $k$  – номер состояния Среды);  $g_i^{k \text{ Int}}(t_i)$  – интегральные показатели Среды в суточном масштабе: сумма среднесуточных температур воздуха, почвы и влажности почвы;  $ih$  – шаг суточного времени (равен 1 часу).

$$u_i^k(t) = \begin{cases} 1, & y_i^k < \overline{OPT}_i^k \\ 0, & y_i^k \in \overline{OPT}_i^k \\ -1, & y_i^k > \overline{OPT}_i^k \end{cases}, \quad (3.5)$$

где  $u_i^k(t)$  – технологические операции (включение режима по  $k$ -состоянию),  $\overline{OPT}_i^k(t)$  – нормы оптимума Среды, находится в пределах верхней и нижней границы  $\overline{OPT}_i^k(t) \in [\overline{OPT}, \overline{OPT}]$ .

## Модель Объекта управления (Растения).

$$\begin{aligned} x_j(t_{j+1}) &= A_j x_j(t_j) + B_j u_j(t_j) + g_j^k(p, t_j) \\ y_j^l(t_j) &= C_{jh} x_j^l(t_j), \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} j \in (0, T_j); x_j(0) &= x_{j-1}(T_{j-1}) \\ g_j^k(p, t_j) &= p_j^k * \sin(t_j), \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$T_j = P_j^T g_j^{k \text{ Int}}(t_j), \quad (3.8)$$

где  $x_j(t_j)$  – вектор переменных состояний Растения,  $u_j(t_j)$  – вектор управлений;  $g_j^{\text{Int}}(t_j)$  – вектор возмущений Среды в биологическом масштабе;  $y_j(t_j)$  – вектор измеряемых параметров;  $A_j, B_j$  – матрицы перехода состояний, управления размерностей  $[n \times n \times k \times \text{ezen} \times J]$ ,  $[n \times 1 \times k \times \text{ezen} \times J]$ ;  $C_{jh}$  – матрица преобразования измерительных датчиков размерности  $[k \times \text{ezen} \times J \times 1]$ , ( $jh$  – шаг измерения в биологическом масштабе (равен 1 неделе));  $t_j$  – время в биологическом масштабе;  $t_j \in (0, T)$  – вегетационный период;  $j$  – номер фенофазы ( $j = 1, 2, 3$ );  $T_j$  – момент смены фенофаз;  $P_j^T$  – вектор неизвестных параметров смены фенофаз (где  $T$  – операция транспонирования);  $x_j(0), x_{j-1}(T_{j-1})$  – начальные условия на текущей фенофазе, адекватные возмущениям граничных условий из предыдущей фазы;  $x_j^l(t_j)$  – состояния Растения: сырая масса листьев и пасынков, сухая масса завязи и плодов ( $l$  – номер состояния Растения);  $g_j^{k \text{ Int}}(t_j)$  – интегральные показатели Среды в биологическом масштабе: сумма среднесуточных температур воздуха, почвы и влажности почвы ( $k$  – номер показателя возмущений).

$$u_j^l(t_j) = \begin{cases} 1, & y_j \geq \overline{OPT}_j \\ 0, & y_j \in OPT_j \end{cases} \quad (3.9)$$

где  $u_j^l(t_j)$  – агротехнические операции (подрезка листьев/пасынков, сбор урожая);  $OPT_j^l(t)$  – нормы оптимума Растений, находится в пределах верхней и нижней границы  $OPT_j^l(t) \in [OPT, \overline{OPT}]$ .

В модели (3.2) - (3.14) требуется определить:

- параметры Среды в суточном масштабе:  $GA_i, GB_i, GC_i = ?$
- параметры Растения в биологическом масштабе:  $A_j, B_j, C_j = ?$
- моменты перехода фаз  $T_j = ?$
- коэффициент возмущения компенсатора, при которых доставляется

минимум СКО  $\sigma^k(t_i)$ , то есть  $k^{\text{рег}^*} = ?$

При решении задачи идентификации была использован Identification Toolbox среды Matlab. Искомая модель системы является черным ящиком, то есть при заданном управлении (вход) и заданной реакции объекта на это управление (выход) необходимо найти внутреннюю структуру и параметры системы.

При оценке параметров идентификации используется линейный метод наименьших квадратов (МНК), суть которого заключается в оценке параметров,

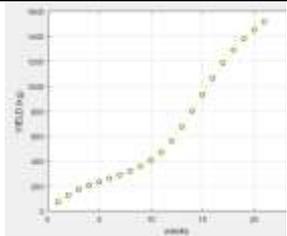
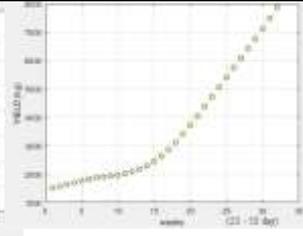
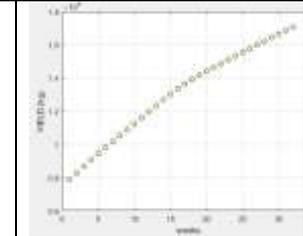
обеспечивающих минимум среднеквадратического отклонения (СКО) между модельными и фактическими данными (выборкой).

Исходными данными для идентификации служат *данные выборки*, полученные на предыдущем этапе. В результате проведения этапа идентификации были определены коэффициенты  $A, B, C, GA, GB, GC$ . В таблицах 3.4 и 3.5 приводятся результаты идентификации параметров Среды и Растения.

Таблица 3.4 Передаточные функции Среды 1 по 5 неделе (канал Воздух)

№ недели	1 неделя (дни 1-7)	2 неделя (дни 8-14)	3 неделя (дни 15-21)	4 неделя (дни 22-28)	5 неделя (дни 29-35)
Передаточная функция	$\rightarrow \frac{23.03s^1}{4.27e-5s^2+0.0062s+1}$	$\rightarrow \frac{26.02s^1}{0.1511s^2+6.688s+1}$	$\rightarrow \frac{21.42s^1}{7.37e-5s^2+0.01423s+1}$	$\rightarrow \frac{26.99s^1}{0.0023s^2+0.0187s+1}$	$\rightarrow \frac{17.52s^1}{0.0045s^2+0.15s+1}$
Ранг системы	2	2	2	2	2
Наблюдимость	+	+	+	+	+
Управляемость	-	+	+	+	+
Детерминант	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Коеф. комп. возмущения до и после оптимизации	$k^{per*} = 0.1$ $k^{per*} = 0.1947$	$k^{per*} = 0.1$ $k^{per*} = 0.216$	$k^{per*} = 0.1$ $k^{per*} = 0.1818$	$k^{per*} = 0.1$ $k^{per*} = 0.1658$	$k^{per*} = 0.1$ $k^{per*} = 0.1407$
Точность (минимум СКО) до и после оптимизации	$ \sigma_1  = \pm 5.14$ $ \sigma_2  = \pm 3.101$	$ \sigma_1  = \pm 5.08$ $ \sigma_2  = \pm 3.258$	$ \sigma_1  = \pm 5.25$ $ \sigma_2  = \pm 3.105$	$ \sigma_1  = \pm 4.06$ $ \sigma_2  = \pm 3.1582$	$ \sigma_1  = \pm 4.68$ $ \sigma_2  = \pm 3.089$

Таблица 3.5 Передаточные функции Растения для трех фаз

№ фазы	1 фаза (дни 1-21)	2 фаза (дни 21-52)	3 фаза (дни 52-83)
Передаточная функция	$\rightarrow 0.461 \frac{1}{0.006917s^2 - 0.02191s + 1}$	$\rightarrow 0.281 \frac{1}{0.00162s^2 - 0.1462s + 1}$	$\rightarrow 2.463e04 \frac{1}{0.003931s^2 + 0.4043s + 1}$
ММО модель	A = [2.4571 -112.145 ; 1 0 ]; B = [38813.5 ; 0 ]; C = [0 1 ]; D = [0 ];	A = [14.86 -205.7825 ; 1 0 ]; B = [2613.48 ; 0 ]; C = [0 0 ]; D = [0 ];	A = [5.63 -18.25 ; 1 0 ]; B = [745.13 ; 0 ]; C = [0 1 ]; D = [0 ];
Ранг системы Наблюдаемость Управляемость Детерминант	2 + + ≠ 0	2 - + ≠ 0	2 + + ≠ 0
График			

**4 Анализ наблюдаемости и управляемости.** Одним из важнейших задач ТАУ является исследование управляемости и наблюдаемости объектов. Как видим из таблиц, рассматриваемые системы удовлетворяют критериям управляемости и наблюдаемости.

Следующий пункт посвящен рассмотрению 5-го шага алгоритма – задаче синтеза компенсатора возмущений.

### 3.2.2 Синтез компенсатора возмущений

САР может находиться в переходном, или статическом режиме работы. На долю статического управления приходится примерно 80% времени эксплуатации оборудования, так он охватывает почти весь период, кроме перехода из одного режима в другой. Будем рассматривать только статический режим.

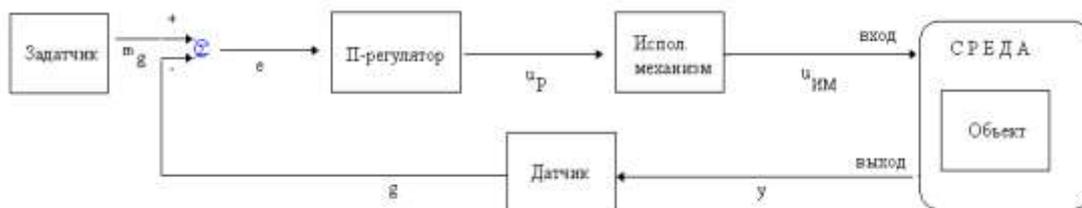


Рисунок 3.8 Структурная схема САР по отклонению



Рисунок 3.9 Структурная схема САР по возмущению (Компенсатор возмущений)

В *статическом режиме* работы все параметры, определяющие ее состояние (как возмущающие, так и управление), являются постоянными. Основной задачей управления объектом в статическом режиме является уменьшение или устранение статического отклонения, которое фактически создает погрешность в управлении.

В *динамическом режиме* учитываются главным образом отклонение на выходе Объекта, поэтому средства их регулирования получили название “Регуляторы по отклонению” (рисунок 3.8). В этой схеме направление сигнала идет по контуру слева направо, и важным является задание  $m_g$ .

В статическом режиме учитываются главным образом случайные возмущения на входе Объекта, поэтому средства их регулирования получили название “Регуляторы по возмущению” или *компенсаторы возмущений* (КВ) (рисунок 3.9). В этой схеме направление сигнала идет наоборот, то есть по контуру справа налево, и *заданием* является область значений  $\pm\sigma_g$ .

Принцип управления по отклонению является основным контуром управления, а принцип управления по возмущению – дополнительным контуром управления. Если объединить два эти принципа, то получится комбинированное управление, которое предусматривает и управление по отклонению и управление по возмущению.

В качестве Регуляторов по возмущению обычно используются *релейные регуляторы* (*T-регуляторы*), а в качестве Регуляторов отклонению используются промышленные *П/П/ПИД-регуляторы*. Главным преимуществом T-регуляторов является высокое быстродействие, простота конструкции, и, в конечном счете – доступность населению из-за низкой цены. Благодаря этим качествам широкое применение в быту получили именно релейные регуляторы, чем П/П/ПИД регуляторы.

Известны следующие способы управления (уменьшения или устранения статического отклонения) в статическом режиме:

- 1) увеличение коэффициента передачи разомкнутой системы;
- 2) введение интегратора в цепь обратной связи;

3) компенсация возмущений.

С точки зрения практической реализации третий способ является более простым и доступным, и позволяет устранить возмущение и компенсировать посредством релейного закона управления.

При выборе конкретного Датчика и Реле настраиваются их параметры:

$$u_i^k(b^k, B^k) = \begin{cases} B^k, & y_i^k > b^k \\ 0, & |y_i^k| \leq b^k \\ -B^k, & y_i^k < -b^k \end{cases}, \quad (3.10)$$

где  $B^k$  – ограничение (насыщение Реле);  $b^k$  – порог зоны нечувствительности Датчика, где  $|b^k| \in OPT^k(t_i)$ ; индекс  $k$  – номер состояния Среды.

Регулирование выполнено на основе критерия - т о ч н о с т и управления (минимум СКО):

$$\varepsilon^k(t_i) = |y^k(t_i) - OPT^k(t_i)|, \quad (3.11)$$

$$\sigma^k(t_i) = \sqrt{\frac{1}{T_i} \sum_{\tau=1.168} \varepsilon^k(t_i)^2} \rightarrow \min, \quad (3.12)$$

где  $\varepsilon^k$  – ошибка,  $\sigma^k$  – СКО от задания (нормы оптимума Среды).

Коэффициент возмущений (компенсация) определяется в виде:

$$k^{pez*} = \arg \max_{k^{pez} \in [0;1]} K(\varepsilon^k(t_i), k^{pez}) \quad (3.13)$$

По т р е б о в а н и ю разработки параметры точности Компенсатора возмущений должны находится в пределах нормы оптимума, то есть

$$\sigma^k(t_i) \in OPT^k(t_i). \quad (3.14)$$

В состав реализуемого Т-регулятора должны входить датчик и реле (устройство называется Датчик-реле). Работа Датчика описывается параметром  $b^k$ , характеризующего его чувствительность, работа Реле описывается параметром  $B^k$ , характеризующего зону насыщения.

Пусть возмущение описывается как процесс Гаусса с двумя параметрами  $m_g^k \pm \sigma_g^k$ , в статическом режиме  $m_g^k = \text{const}$ , изменяется только параметр  $\sigma_g^k$ . Для физической реализуемости этого закона необходимо, чтобы порог чувствительности Датчика должен находится в зоне дисперсии возмущения:

$$|b^k| \in \pm \sigma_g^k \quad (3.15)$$

Таким образом, Датчик – реле реализует правило:

- ЕСЛИ сигнал возмущения находится в области зоны нечувствительности (шум незначительный), ТО Регулятор не реагирует на шумы;

- ЕСЛИ сигнал возмущения находится вне области зоны нечувствительности (шум значительный и положительный), ТО Регулятор реагирует на шумы и формирует положительный импульс с параметром  $B^k$ ;

- ЕСЛИ сигнал возмущения находится вне области зоны нечувствительности (шум значительный и отрицательный), ТО Регулятор реагирует на шумы и формирует отрицательный импульс с параметром  $-B^k$ .

Рассмотрим работу САР в статическом режиме в период конкретной недели 12-18 апреля. Характеристики шума те же, как в предыдущем примере. На выходе ИМ зашумленный сигнал не должен превышать допустимый уровень  $\sigma_i^k \text{ доп} = \pm 5^\circ\text{C}$ .

Рассмотрим процесс компенсации возмущений для канала температуры /влажности воздуха. На рисунке 3.10 изображена схема САР на базе компенсатора Возмущений для канала Воздушной среды. Внизу схемы показаны расчеты  $K^{\text{возм}}$  с применением критерия минимума СКО (3.11-3.12).

Также показаны сигналы после каждого преобразования определенным устройством: Датчиком, Реле, Исполнительным механизмом. Как видно на графике, компенсатор возмущений быстро реагирует и компенсирует возмущение в заданном диапазоне (рисунок 3.11) в соответствии с функциональными требованиями (3.14-3.15).

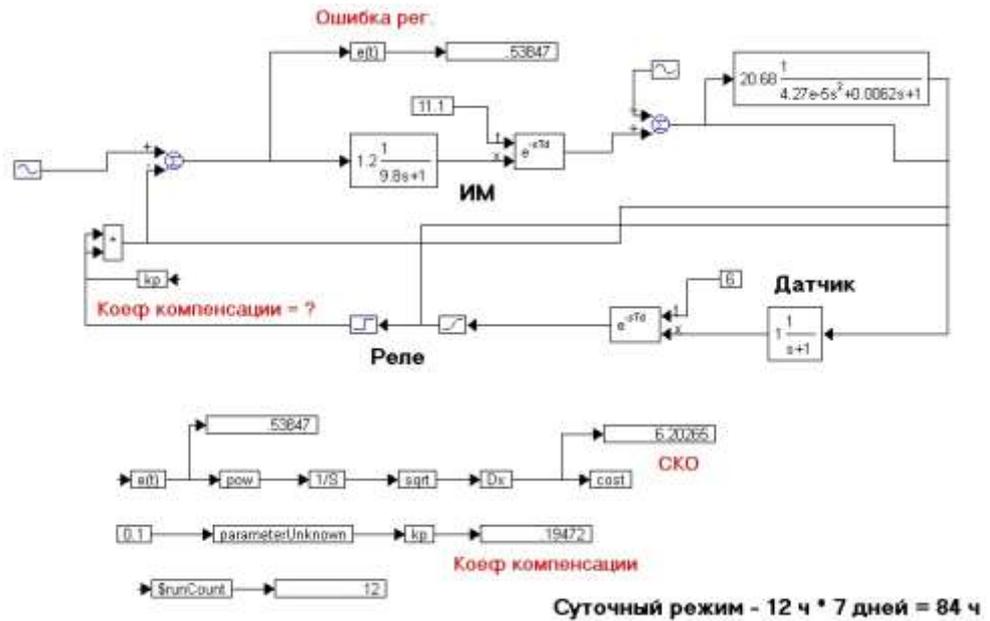


Рисунок 3.10 Структурная схема САР на базе компенсатора возмущений\

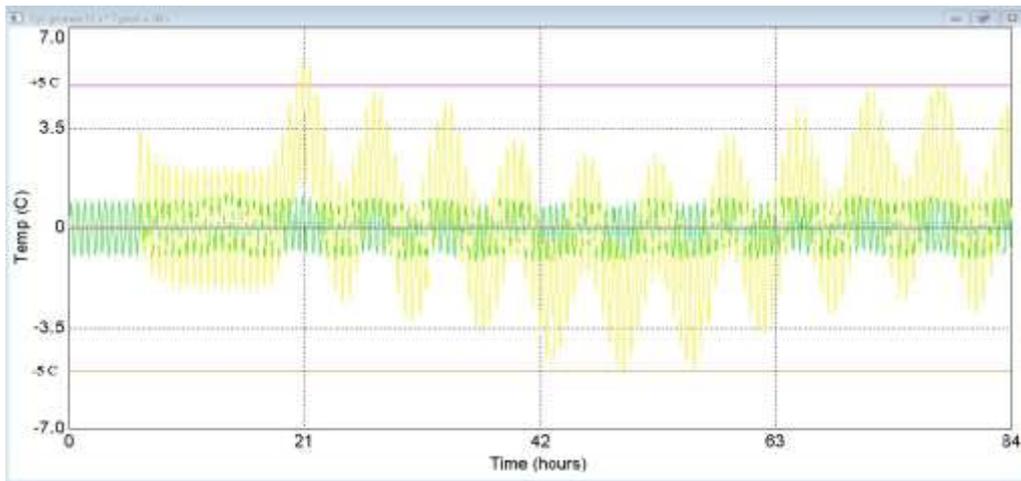


Рисунок 3.11 График процесса регулирования компенсатором возмущений  
 На графике синим цветом – сигнал Реле, желтым цветом – сигнал Ограничителя, зеленым цветом – целевой сигнал, коричневым цветом – сигнал Задания = 0 C; красным и оранжевым цветом – допустимые границы задания = [-5; +5 C].

### 3.3 Синтез НЛК для ситуационного управления технологическими режимами теплицы для системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”

#### 3.3.1 Определение конфигурации НЛК для ситуационного управления технологическими режимами теплицы.

Ключевой задачей синтеза регулятора является выбор конфигурации системы, которая заключается в анализе и выборе схемы регулятора.

Рассмотренный в предыдущем пункте КВ позволяет компенсировать возмущения, но у него есть серьезные недостатки: сложная структура (для каждого канала нужен контур регулирования), требует точной математической Объекта управления, не работает в условиях неточной и нечеткой информации (рисунок 3.12).

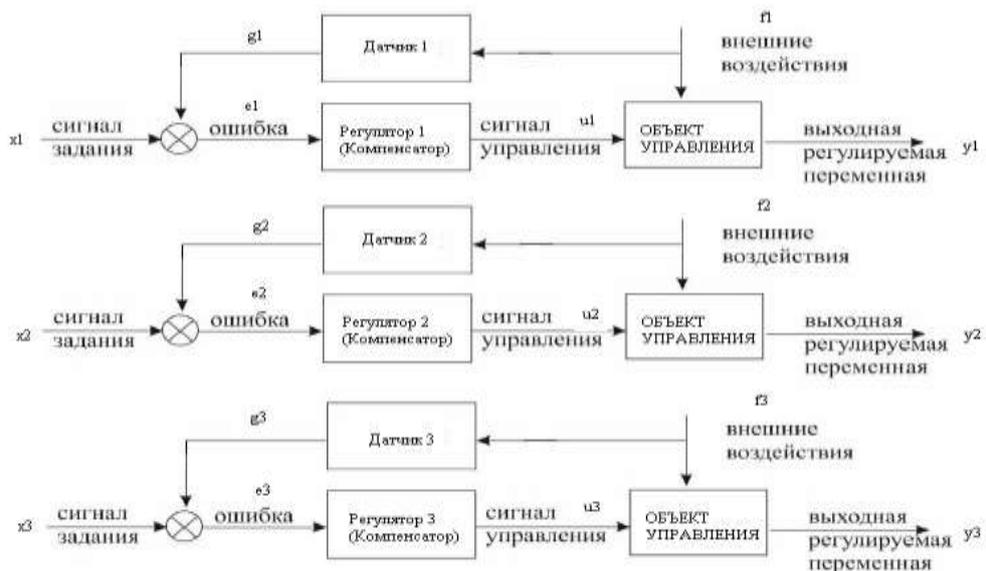


Рисунок 3.12. Структурная схема САУ с компенсацией возмущения по трем каналам

Указанные недостатки являются существенными и Регулятор, реализованный по этим принципам - не будет соответствовать целям и требованиям настоящей работы. Поэтому необходима модернизация и усовершенствование схемы (рисунок 3.12).

Модернизация схемы будет основано на применении принципов нечеткой логики и ситуационного управления.

Управление на основе нечеткой логики использует предложения в виде правил, который и является законом управления. Нечеткий логический контроллер (НЛК) может иметь неограниченное число входных сигналов и строится на основе знаний эксперта и основное преимущество его в том, что для синтеза не нужно знать специфические свойства объекта управления.

НЛК успешно применяются в технических системах по следующим причинам:

- Система управления построена на применении правил ЕСЛИ – ТО, что облегчает процесс синтеза регулятора специалистом, так как используются слова и понятия, используемые в обычном обиходе: высоко, низко, и т.д.;

- НЛК может иметь несколько входных и выходных переменных, которые взаимосвязаны между собой правилами ЕСЛИ – ТО и дополняются логическими связками И, ИЛИ. Даже если специалистом был допущен конфликт правил, то другие правила могут разрешить возникший конфликт.

- НЛК в связи с тем, что имеют нелинейную структуру, активно применяются как в системах, имеющих нелинейности, так и в системах с нелинейными воздействиями.

Предлагается изменить структуру КВ, добавив в схему НЛК (рисунок 3.13). Это позволит ввести *единый закон управления* в логику системы в виде правил. Эти правила будут понятны пользователю и будут работать в условиях информационной неопределенности и нечетких данных.

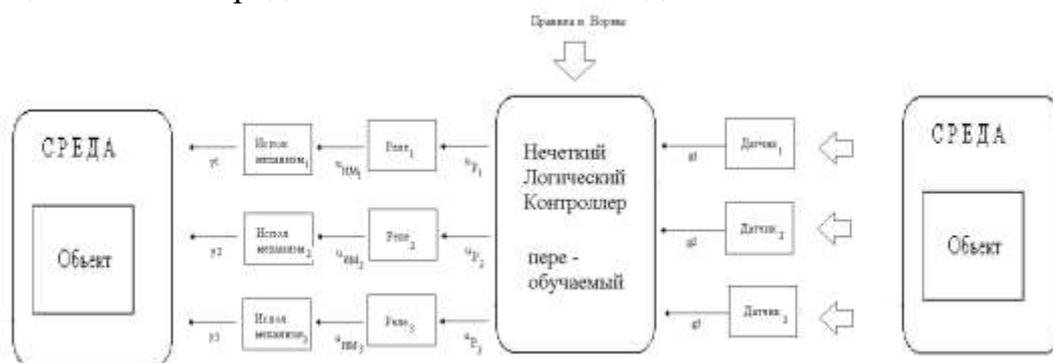


Рисунок 3.13. Усовершенствованная схема САР с Нечетким логическим контроллером

Важную роль также играет то, что он может выступать в роли Эксперта и давать советы пользователю (фермеру) в зависимости от текущей ситуации. Также техническая реализация такого контроллера будет простой по сравнению с рассмотренным выше КВ.

Выполним синтез НЛК на основе алгоритма на рисунке 3.14 [66, с. 35]. Цели и задачи управления, выбор управляемых переменных и требования к ним были рассмотрены в общей постановке задачи технологического управления на базе экспертной системы (2.25) - (2.37) из главы 2. Объект управления системы описывается текущей ситуацией  $S = \langle X, T_X; Y, T_Y, t_i \rangle$ , охватывающая в себя состояние Среды  $X(G)$  и Растения  $Y(X)$ . В технологическом управлении выполняется управление технологическими процессами (ТП) состояния Среды, т.е. ситуация  $S = \langle X, T_X; 0, 0, t_i \rangle$  в суточном режиме времени. В нашем случае есть три режима: режим управления воздушной средой ( $r=1$ ), режим управления средой освещения ( $r=2$ ) и режим управления почвенной средой ( $r=3$ ). Цель ситуационного управления – оценка ситуации  $\hat{S}(S)$  и выбор технологического режима  $u^t_r(\hat{S})$  в зависимости от оценки этой ситуации.



Рисунок 3.14 Алгоритм синтеза регулятора

### 3.3.2 Синтез модели НЛК (задача 4)

В НЛК для получения его выхода  $U$  по входу  $X$  имеют место три взаимосвязанные стадии обработки информации [66, с. 35]. Первая стадия - преобразование входной физической переменной  $X$  в нечеткое множество - процедура фазификации (fuzz). Вторая стадия - логическая обработка нечетких переменных (композиция, импликация) базы правил контроллера, получение локальных и общего вывода базы правил в виде нечеткого множества  $A$ . Третья стадия - преобразование нечеткого множества в физическую переменную - процедура дефазификации (dfz).

Рассмотренные стадии обработки и преобразования лежат в основе работы НЛК, который реализует задачи, поставленные и описанные во второй главе. В этом пункте рассматривается только задача технологического управления выбора режимов в суточном масштабе времени, которая и определяет функцию регулятора в качестве НЛК.

На этапе структурной идентификации, описанной в главе 2 были выбраны: тип модели нечеткого вывода – тип Сугено, методы фаззификации: Метод И – prod и Метод ИЛИ – probor; метод импликации – min; метод агрегации – max; Метод дефаззификации – wtaver. Сгенерированы правила Базы знаний, а также виды функции принадлежности для каждой лингвистической переменной (таблицы 2.7-2.16). База знаний имеет 4 входа и 3 выхода. Для решения поставленных задач используются данные из этих таблиц.

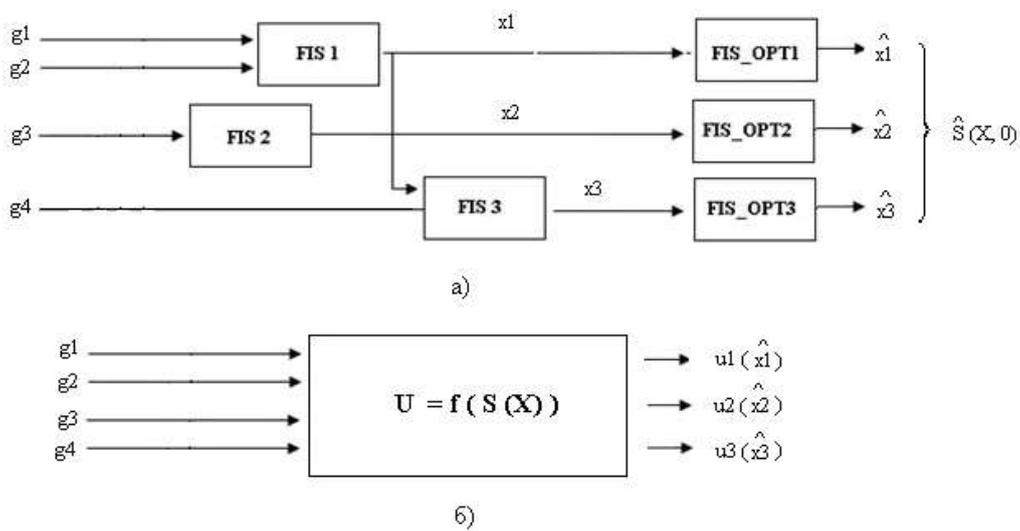


Рисунок 3.15 Модель НЛК:

а) Структура ЭС FIS\_CONTROL\_REAL\_TIME, реализующей ситуационное управление ТП, б) Функциональная схема ЭС

Построим нечеткую модель НЛК, реализующего управление в реальном режиме времени. Ее функциональная схема имеет четыре входа ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) и три выхода ( $u_1, u_2, u_3$ ) (Рисунок 3.15а).

Задача синтеза НЛК приводится к задаче нечеткой классификации, описанной в главе 2. Она состоит в отнесении объекта, заданного вектором информативных признаков  $G = (g_1, g_2, g_3, g_4)$  к одному из наперед описанных классов ( $u_1, u_2, u_3$ ). Таким образом, задача классификации будет иметь вид отображение (Рисунок 315б).

Описание и алгоритм решения предварительной задачи - задачи идентификации текущей ситуации была описана в п. 2.3.1 и 2.3.2, результаты которой будут использованы в настоящей задаче управления ТП. Выбор технологического режима  $u_r^t(\hat{S})$  определяется с помощью (2.30). Здесь номер режима  $r$  соответствует  $i$ -состояния Среды, то есть  $u_r^t(\hat{S}(X_{i=r}))$ .

А л г о р и т м с и т у а ц и о н н о г о у п р а в л е н и я т е х н о л о г и ч е с к и м и р е ж и м а м и с п о м о щ ь ю Н Л К в с у т о ч н о м м а с ш т а б е в р е м е н и ( з а д а ч а 4):

- 1) Задание норм Среды (табл. 2.1-2.4);
- 2) Задание структуры, правил баз знаний и параметров функции принадлежности (табл. 2.7-2.16);
- 3) Задание ситуационной ЭМЗ (2.26).
- 4) Задание ЭМЗ типа Мамдани (2.1) – (2.4).
- 5) Задание исходных данных состояния Среды;
- 6) Перевод обычного времени в дискретное с помощью формулы (2.37);
- 7) Определение оценки ситуации Среды по первому состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=1), T_X, \mu(X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 8) Определение оценки ситуации Среды по второму состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=2), T_X, \mu(X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 9) Определение оценки ситуации Среды по третьему состоянию  $\hat{X} = \langle X(G) (i=3), T_X, \mu(X), t_i \rangle$  по алгоритму (2.7) – (2.11), реализующего операции фаззификации, нечеткого логического вывода и дефаззификации;
- 10) Задание параметра идентификации  $\gamma, \gamma \in [0,5 \dots 1]$ ;
- 11) Определение оценки текущей ситуации Среды  $\hat{S} \langle X(G), 0 \rangle$  с помощью функции  $\lambda (S(X(G), 0), S_{don}(X))$  (2.28) по критерию (2.30).
- 12) Выбор режима управления  $u^t_r (\hat{S} (X, 0))$  осуществляется по (2.31)

Результаты решения задачи приведены в виде графиков в главе 4.

### 3.3.3 Выбор функциональных требований к разработке НЛК.

Определим назначение и функциональные возможности для разрабатываемого НЛК. **Н а з н а ч е н и е:**

Требуется разработать регулятор, предназначенный для мониторинга и автоматического управления с помощью мобильного приложения технологических процессов обогрева/охлаждения, освещения и капельный полива теплицы [107, 108].

Регулятор должен выполнять следующие функции:

- 1) выполнять контроль (мониторинг) процессов микроклимата в режиме Online;
- 2) выполнять управление процессов микроклимата в *ручном режиме*;
- 3) выполнять управление процессов микроклимата в *автоматическом режиме*;
- 4) периодически выполнять обучение и адаптацию системы режиме Offline.

#### Функциональные возможности:

- распределенный доступ к приложению из любой точки мира;
- определение местонахождения системы;
- контроль температуры воздуха внутри теплицы;
- контроль влажности воздуха внутри теплицы;
- контроль освещенности внутри теплицы;
- контроль влажности почвы в горшке;
- управление системой охлаждения/обогрева/охлаждения (вентилятор ИМ1);
- управление системой освещения (прожектор ИМ2);
- управление системой капельного полива (клапан полива ИМ3);
- оперативное отображение информации о технологическом объекте, протекающих процессах и основных параметрах работы на экране рабочих станции (смартфонов, и др.).

Практическая реализация системы, обладающая выбранными функциональными возможностями возможна только при использовании современных беспроводных и интеллектуальных технологии, IoT-устройств.

Для выполнения поставленных функциональных требований была выбрана функциональная схема на рисунке 3.16. Она состоит из основных блоков: а) Объекта управления, в центре которого расположено Растение; б) Информационно-измерительной системы; в) Исполнительных механизмов (ИМ); г) Устройства управления (УУ). Системой управляет УУ, которое вырабатывает управляющее воздействие на основе правил эксперта, на основе текущей входной информации, полученных с датчиков среды и отправляет соответствующему исполнительному механизму. Обмен данными также происходит через УУ, которое посылает данные на Облачное хранилище данных. Данные из облачного хранилища для машинной обработки поступают на скрипт матлаб, после обработки обратно поступают к УУ через Облачное хранилище. Данные мониторинга сохраняются в хранилище всего вегетационного периода.

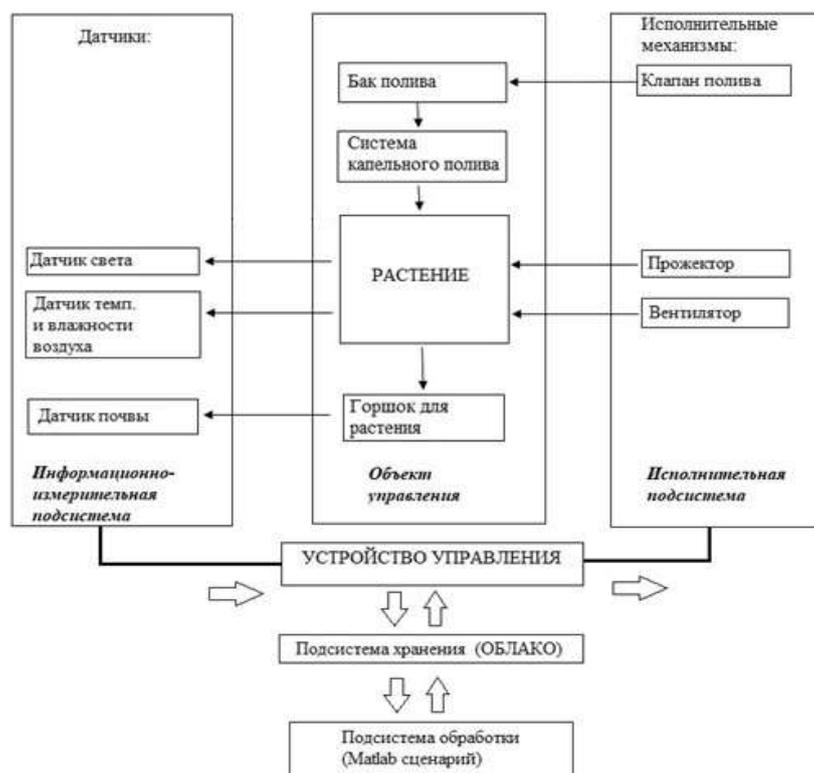


Рисунок 3.16 Функциональная схема автоматизации теплицы

### Выбор технологического оборудования

Список технологического оборудования и ПО для информационно-измерительной подсистемы, исполнительной подсистемы, самого устройства и управления и подсистем хранения и обработки информации приведен в таблице 3.6. [107, 108]. Количество используемых устройств определяется в зависимости от использования и внедрения.

В качестве микроконтроллера и устройств связи используются недорогие микроконтроллеры серии ESP32 с низким энергопотреблением. Они представляют собой систему на кристалле с интегрированными Wi-Fi и Bluetooth контроллерами и антеннами на базе микроконтроллера Tensilica Xtensa LX6. Эти платы работают в условиях окружающей среды в диапазоне  $-40 \dots +125$  °C, на частоте 2.4 ГГц, со скоростью передачи данных 150 Мб, с максимальной мощностью передачи 19,5 дБ.

Серия ESP32 выгодно отличается от серии ESP8266 множеством дополнительных возможностей [86, с. 5]. Следует отметить, что основным недостатком платы ESP8266 в том, что для каждого подключаемого датчика требуется дополнительный микроконтроллер ESP8266 (вызывает неудобство монтажа и удорожает цену), хотя на базе ESP8266 реализовано огромное количество IoT проектов домашней автоматике на сегодняшний день.

Таблица 3.6 Технологическое оборудование и ПО

Оборудование и материалы	Модель	Характеристики
Устройство связи		
Центральный модем	Серия модемов TP Link N300 Wi-Fi router TL-WR841N	Пропускная способность – 300 МБит/сек Стандарт 802.11 b/g/n Частота сети – 2,4 ГГц Имя сети - Smart_GreenHouse Пароль - SmartGH2020
Мобильный телефон	Samsung (в зависимости от количества используемых операторов)	Модель SM - T239. Операционная система Android 4.4.4
Устройство управления со встроенным приемником и передатчиком		
Микроконтроллер + Передатчик	ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (в зависимости от характеристики внедряемого объекта)	ESP32 WiFi&Bluetooth development board, support Nodumcu / Arduino DHT11 temperature and humidity sensor CP2104 communication chip Micro USB port Soil probe (long) soil temperature and humidity detection module LM393 based photosensor
Микроконтроллер + Приемник	ESP 32 WiFi + Bluetooth + battery (в зависимости от характеристики внедряемого объекта)	ESP32 WiFi&Bluetooth development board, support Nodumcu / Arduino CP2104 communication chip USB to TTL Micro USB port 18650 Lithium Battery Holder Powered (Battery is not included)
Среда программирования МК	Arduino IDE (1 шт)	версия 1.8.10
Среда разработки мобильных приложений	Blynk (1 шт)	версия 2.27.6
Среда инженерных вычислений с пакетом машинного обучения и сервисом IoT	Matlab (1 шт) с встроенными пакетами: Mashing Learning Toolbox + Fuzzy Logic Toolbox + ThingSpeak	версия Matlab R2019b

Для подключения устройств к объекту управления и связи между центром (мобильный телефон) и между собой (передатчик и приемник) были определены следующие схемы подключений.

На рисунке 3.17 изображена структура устройства управления, который состоит из микроконтроллера-передатчика и микроконтроллера-приемника. Передатчик ESP32 (1) принимает сигналы от датчиков и передает через сеть WiFi или Bluetooth приемнику ESP32 (2). Приемник выполняет обработку

данных на основе команд управления, полученных от мобильного приложения или веб-интерфейса и передает сигналы управления соответствующему ИМ.

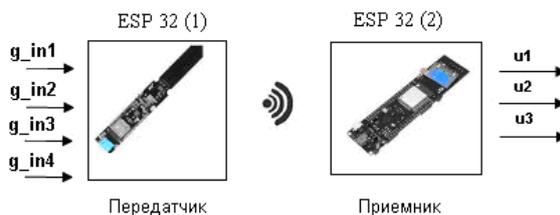


Рисунок 3.17 Передатчик и приемник Блока управления на базе ESP32

На рисунке 3.18 изображена электрическая схема подключений датчиков сигналов в составе передатчика ESP32 (1). Схема состоит из микроконтроллера ESP32, WiFi & Bluetooth модуля CH2104, датчика почвы Soil, датчика температуры DHT11 и фотодатчика LM393 based sensor.

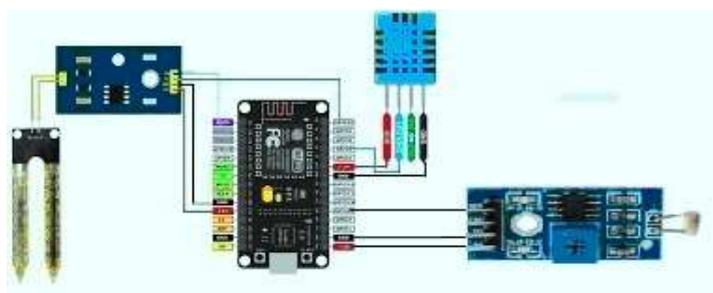


Рисунок 3.18 Схема подключения Передатчика ESP32 и датчиков

На рисунке 3.19 изображена электрическая схема подключений исполнительных механизмов к приемнику ESP32 (2). Схема состоит из микроконтроллера ESP32, WiFi & Bluetooth модуля CH2104, платы из 4-х реле, исполнительных механизмов (ИМ): вентилятора Dospel, электромагнитного клапана от стиральной машины и светодиодного прожектора Led Flood Light Outdoor.



Рисунок 3.19 Схема подключения Приемника ESP32 и ИМ

### Выбор архитектуры приложений

Архитектура системы имеет три уровня (рисунок 3.20): 1-ый уровень – уровень приложений. На этом уровне выполняются операции по управлению

объектом и отображению отчетов с помощью средств интерфейса (кнопок управления, графиков и гистограмм). 2-й уровень – уровень обработки и передачи данных. На этом уровне реализуются операции обмена данными между устройствами. Используются микроконтроллеры ESP32 с встроенными Wi-Fi и Bluetooth модулями. Первый модуль ESP32 (1) играет роль передатчика – получает сигнал с датчиков объекта управления и передает сигнал второму модулю ESP32 (2), который играет роль приемника. Модули ESP32 (1) и ESP32 (2) совместно выполняют двухсторонний обмен данными, обеспечивая операции измерения и управления, взаимодействуя с третьим уровнем. 3-й уровень – это уровень объекта. В теплице расположены датчики окружающей среды теплицы.

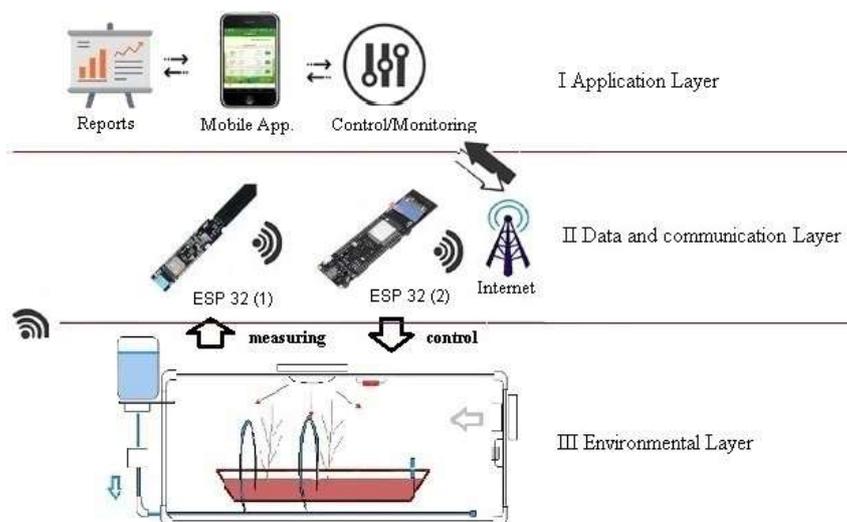


Рисунок 3.20 Архитектура системы

Все устройства связи и датчики кроме ИМ из списка технологического оборудования (таблица 3.9) системы “Ақылды жылыжай” являются IoT устройствами. Они позволяют выполнять сбор данных и мониторинг в реальном режиме времени через беспроводные сети данных, осуществлять прием и передачу данных в облачные хранилища. Эти устройства обеспечиваются соответствующими ПО:

- интегрированная среда программирования МК - Arduino IDE;
- среда разработки мобильных приложений - Blynk;
- среда инженерных вычислений – Matlab;
- интегрированный сервис IoT – ThingSpeak;
- тулбокс нечеткого логического вывода Matlab – Fuzzy Logic Toolbox;
- тулбокс машинного обучения Matlab – Mashing Learning Toolbox.

В облачном хранилище собранные данные могут храниться в течение всего периода вегетации и будут доступны для машинной обработки системы.

#### Выбор сервера и облачного хранилища

На рисунке 3.21 показана схема обмена данными между мобильным телефоном и микроконтроллером через облачный сервер Blynk. Этот сервер и

облако дают возможность разработки мобильного приложения для распространенных микроконтроллеров семейства Arduino, ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, и т.д. через единую интегрированную среду Arduino IDE. Приложение Blynk устанавливается на мобильный телефон с доступными интерфейсными элементами управления [88, с. 283].

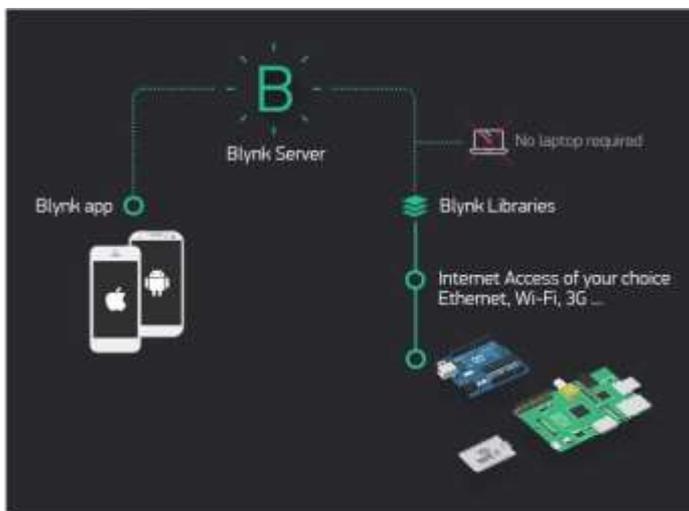


Рисунок 3.21 Облачное хранилище Blynk

Matlab – мощная среда технических вычислений с встроенными пакетами (тулбоксами) для решения различных задач: разработка автоматических систем управления всех типов, разработка экспертных систем, аналитической обработки данных, обработки сигналов связи, систем Big Data и т.д. (Рисунок 3.22). Интегрированный сервис IoT – ThingSpeak позволяет объединить множество умных устройств (датчиков) в общую сеть и хранить данные для последующей обработки в среде Матлаб [71, с. ].



Рисунок 3.22 Matlab и обработка данных, полученных с IoT устройств

## Выводы по третьей главе

В третьей главе определены цели и задачи проведения биологического эксперимента для исследования оценки оптимальных условий выращивания овощей в теплице и выбора соответствующего технологического режима управления из главы 2.

Определены функциональные требования к разработке НЛК на базе ИОТ устройства, а также выбор технологического оборудования и ПО, реализующее их. Они удовлетворяют критерию Цена – Качество.

Разработана функциональная схема устройства, позволяющая выполнять функциональные требования. Схема включает основные блоки: а) Объект управления, в центре которого расположено Растение; б) Информационно-измерительную систему; в) Исполнительные механизмы; г) Устройство управления (УУ). Системой управляет УУ, которое вырабатывает управляющее воздействие на основе правил эксперта, на основе текущей входной информации, полученных с датчиков среды и отправляет соответствующему исполнительному механизму. Обмен данными также происходит через УУ, которое посылает данные на Облачное хранилище данных. Данные из облачного хранилища для машинной обработки поступают на скрипт матлаб, после обработки обратно поступают к УУ через Облачное хранилище. Данные мониторинга сохраняются в хранилище всего вегетационного периода.

Предложена архитектура системы, имеющей три уровня: 1-ый уровень – уровень приложений. На этом уровне выполняются операции по управлению объектом и отображению отчетов с помощью средств интерфейса (кнопок управления, графиков и гистограмм). 2-й уровень – уровень обработки и передачи данных. На этом уровне реализуются операции обмена данными между устройствами. Используются микроконтроллеры ESP32 с встроенными Wi-Fi и Bluetooth модулями. Первый модуль ESP32 (1) играет роль передатчика – получает сигнал с датчиков объекта управления и передает сигнал второму модулю ESP32 (2), который играет роль приемника. Модули ESP32 (1) и ESP32 (2) совместно выполняют двухсторонний обмен данными, обеспечивая операции измерения и управления, взаимодействуя с третьим уровнем. 3-й уровень – это уровень объекта.

Разработан макет теплицы, представляющий собой физическую модель теплицы. Теплица содержит три контура управления: контур 1 – система капельного полива, контур 2 – система охлаждения, контур 3 – система освещения. В состав оборудования теплицы входят: бак, клапан полива, магистральный трубопровод, капельницы, датчик почвы, вентилятор, датчик температуры, прожектор, датчик света, блок управления, реле клапана полива, реле вентилятора, реле прожектора. Главным элементом системы является Блок управления (Устройство управления, УУ).

Разработана полупромышленная установка (прототип) “Домашняя смарт теплица” в виде ИОТ устройства. В конфигурацию системы входят: TP Link N300 Wi-Fi router TL-WR841N (центральный модем), Samsung SM - T239 (мобильный телефон), ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil

(Микроконтроллер + Передатчик), ESP 32 WiFi + Bluetooth + battery (Микроконтроллер + Приемник).

В состав ПО входят: интегрированная среда программирования МК Arduino IDE, среда разработки мобильных приложений Blynk, среда инженерных вычислений Matlab с встроенными пакетами Fuzzy Logic Toolbox и Mashing Learning Toolbox; интегрированный IoT сервис ThingSpeak. Среда Blynk также является облачным хранилищем, где данные могут храниться в течение всего периода вегетации и будут доступны для машинной обработки системы.

Выбор микроконтроллеров серии ESP32 связан с тем, что они одновременно используются и в качестве микроконтроллеров и устройств связи и имеют низкое энергопотребление. Эти платы работают в условиях окружающей среды в диапазоне -40... +125 °С, на частоте 2.4 ГГц, со скоростью передачи данных 150 Мб, с максимальной мощностью передачи 19,5 дБ (стандарт 802.11 b/g/n).

Разработано мобильное приложение “Ақылды жылыжай”, позволяющее реализовать функции мониторинга и нечеткого управления через IoT устройство “Домашняя смарт теплица”. Она реализует регулирование трех ТП как освещение, вентиляция и капельный полив.

Система позволяет: а) выполнять контроль (мониторинг) процессов микроклимата в режиме Online; б) выполнять нечеткое управление процессов микроклимата в *ручном режиме*; в) выполнять нечеткое управление процессов микроклимата в *автоматическом режиме*. Функция управления реализована в виде Нечеткого Логического Контроллера (модель Сугено 0 порядка).

По результатам третьей главы можно сделать следующие **рекомендации**:

- выполнить мониторинг и анализ состояний Среды и Растения в период вегетации;
- внедрить мобильное приложение “Ақылды жылыжай” и полупромышленную установку (прототип) “Домашняя смарт теплица” в теплицы: КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и Eco Product Company (Актобе);
- выполнить сравнительный анализ урожайности для этих теплиц;
- выполнить оценку работоспособности системы в условиях исследовательской теплицы КазНУ им. аль-Фараби.

## 4 МОНИТОРИНГ, СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛИЦЕЙ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРОЖАЙНОСТИ

### 4.1 Мониторинг и нечеткое управление с использованием беспроводных и IoT технологии в домашней теплице

**Мониторинг состояния среды в режиме реального времени.** Физическая модель теплицы [107, фиг. 1] реализована в виде макета на рисунке 3.2. Состав оборудования теплицы приведен в главе 3. На основе данной модели разработано IoT-приложение “Ақылды жылыжай” [103] для мониторинга данных в малом объеме, например в домашних условия [105].

Возмущения Среды  $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ ,  $g_3(t)$  и  $g_4(t)$  поступают и измеряются с помощью датчиков (5), (7), (9) и поступают в Передатчик ESP (1) Блока управления (10) (рисунок 3.2). Связь между Передатчиком ESP (1) и Приемником ESP (2) осуществляется посредством WiFi сети. Далее Приемник ESP (2) Блока управления (10) через сеть WiFi передает данные в хранилище данных Vlynk (описана в главе 3), где данные хранятся в течение всего периода вегетации.

1.1 Система вентиляции. Подача воздуха обозначена стрелкой серого цвета. Датчик температуры (7) измеряет температуру  $g_1(t)$  и относительную влажность  $g_2(t)$  воздуха теплицы и передает данные в контроллер блок управления.

1.2 Система освещения. Данные интенсивности освещения  $g_3(t)$  измеряются датчиком света (9) и передаются в контроллер Блок управления (10).

1.3 Система капельного полива. Вода наполняется в бак (1). Информация о влажности почвы  $g_4(t)$  измеряется датчиком влажности (5) и передается в контроллер Блок управления (10).

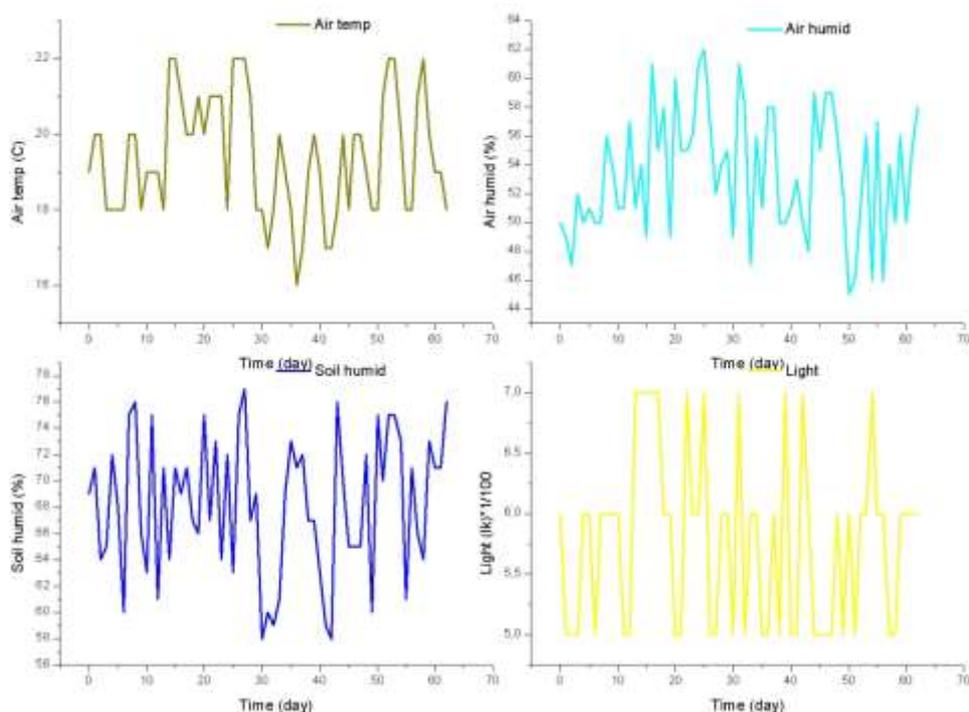


Рисунок 4.1 Процесс мониторинга данных в домашней теплице:

- а) Температура воздуха;
- б) Влажность воздуха;
- в) Влажность почвы;
- г) Освещенность.

**Нечеткое управление процессами микроклимата на базе НЛК и ННЛК.** Рассмотренная выше физическая модель теплицы также позволяет осуществлять управление описанными тремя процессами: вентиляция, освещение и капельный полив [107, с. 1].

Для реализации Блока управления были выбраны схемы 4 и 6, обоснование выбора приводится в главе 3. Они являются НЛК и ННЛК.

На рисунках 4.2 – 4.4 показаны общая схема непрямого регулирования на базе нечеткой логики и схемы, реализованные на НЛК и ННЛК.

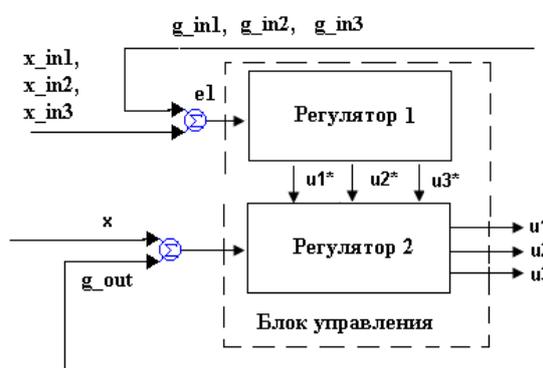


Рисунок 4.2 Схема Блока управления

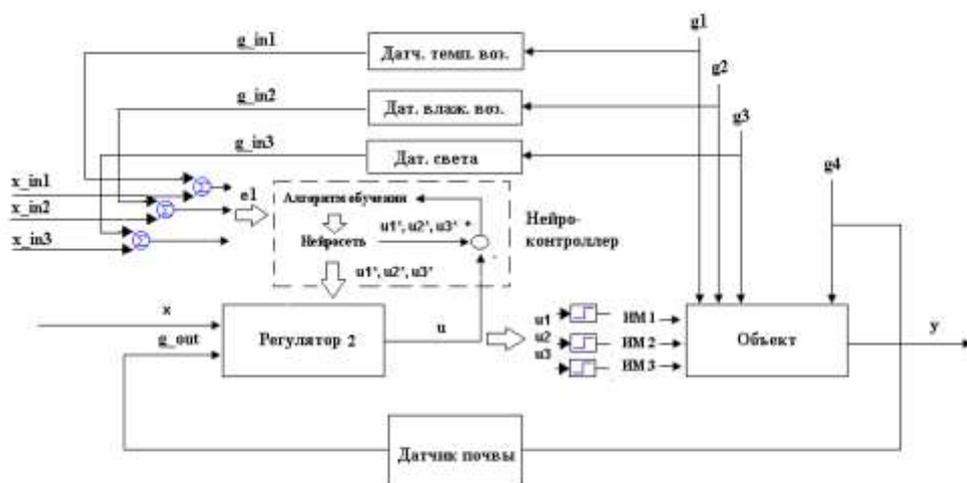


Рисунок 4.3 НК базе предлагаемой схемы Блока управления

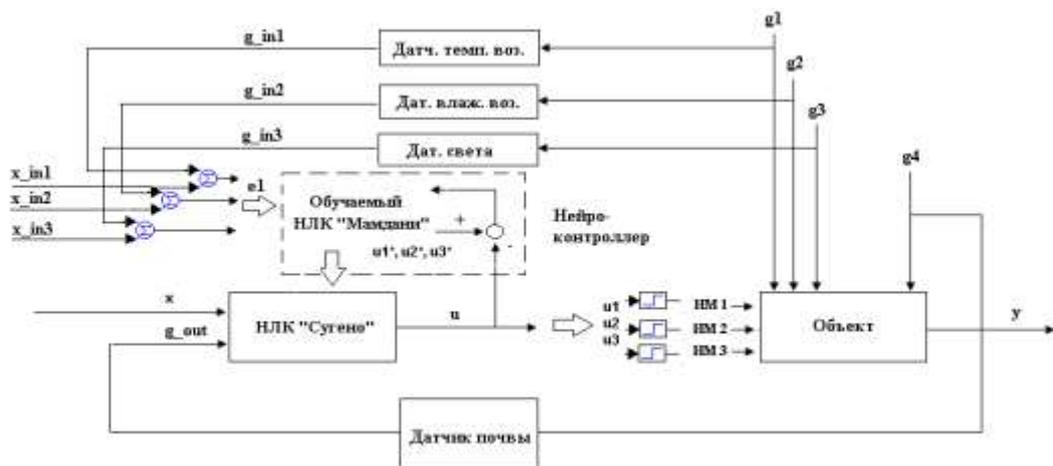


Рисунок 4.4 ННЛК на базе предлагаемой схемы Блока управления

Главным блоком программно-технической системы “Ақылды жылыжай” является Блок управления (10), построенный на основе этих НЛК и ННЛК. Функции управления встраиваются в Блок управления в виде правил баз знаний (таблицы 2.7-2.16).

Опишем принцип работы домашней теплицы, выполняющую функцию управления в ONLINE режиме.

Точное описание объекта получить невозможно, так как во-первых, оно недоступно для внешнего наблюдения, во-вторых, данные о состоянии объекта  $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ ,  $g_3(t)$  и  $g_4(t)$  поступают и измеряются с помощью датчиков, которые имеют определенные нелинейные характеристики. Нам доступны только сигналы  $g_{in1}(t)$ ,  $g_{in2}(t)$ ,  $g_{in3}(t)$  и  $g_{out}$ . Сигналы  $g_{in1}(t)$ ,  $g_{in2}(t)$ ,  $g_{in3}(t)$  являются входными для Регулятора 1, сигнал  $g_{out}(t)$  является входным для Регулятора 2, поступающий по Обратной связи с выхода Объекта управления (10).

1.1 Система вентиляции. Блок управления (10) регулирует подачей воздуха в теплицу, формируя управляющее воздействие  $u_2(t)$  ( $r=1$ ), посредством включения /выключения вентилятора (6) через реле (12) вентилятора. Подача воздуха обозначена стрелкой серого цвета. Датчик температуры (7) измеряет температуру  $g_{in1}(t)$  и относительную влажность  $g_{in2}(t)$  воздуха теплицы и передает данные в контроллер блок управления.

1.2 Система освещения. Блок управления (10) формирует управляющее воздействие  $u_3(t)$  ( $r=2$ ), которое включает/выключает прожектор (8) посредством реле (13) прожектора. Данные интенсивности освещения  $g_{in3}(t)$  измеряются датчиком света (9) и передаются в контроллер Блок управления (10).

1.3 Система капельного полива. Вода наполняется в бак (1). Блок управления (10) регулирует подачей воды (управляющее воздействие  $u_3(t)$  ( $r=1$ )), то есть открывает/закрывает клапан полива (2) посредством включения/выключения реле (11) клапана полива. При открытии клапана вода течет вниз (синяя стрелка), проходя магистральный трубопровод (3) и

капельницу (4), и поливает растение, которое находится в горшке (коричневый сосуд).

Информация о влажности почвы  $g_{out}(t)$  измеряется датчиком влажности (5) и передается в контроллер Блок управления (10).

На рисунках 4.5, 4.6 показаны структура и правила баз знаний Регуляторов 1 и 2, реализованного для управления процессами микроклимата в домашней теплице.

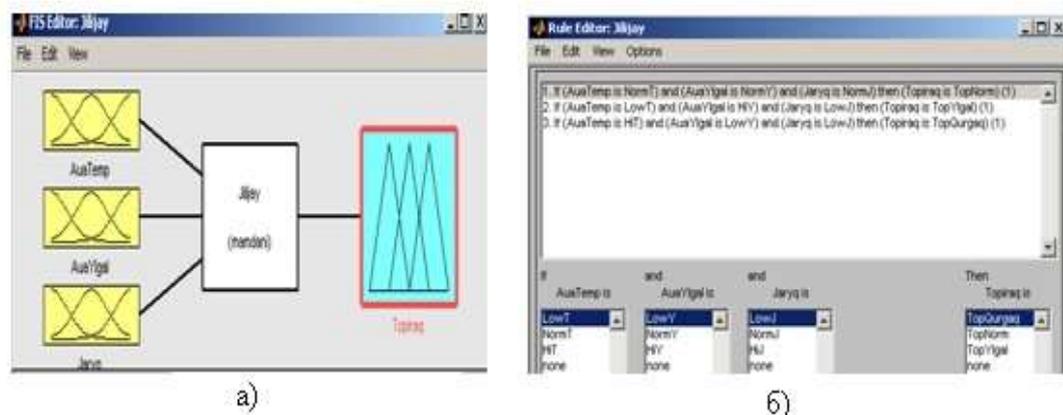


Рисунок 4.5 Структура Регулятора 1:  
а) модель Мамдани; б) база правил модели

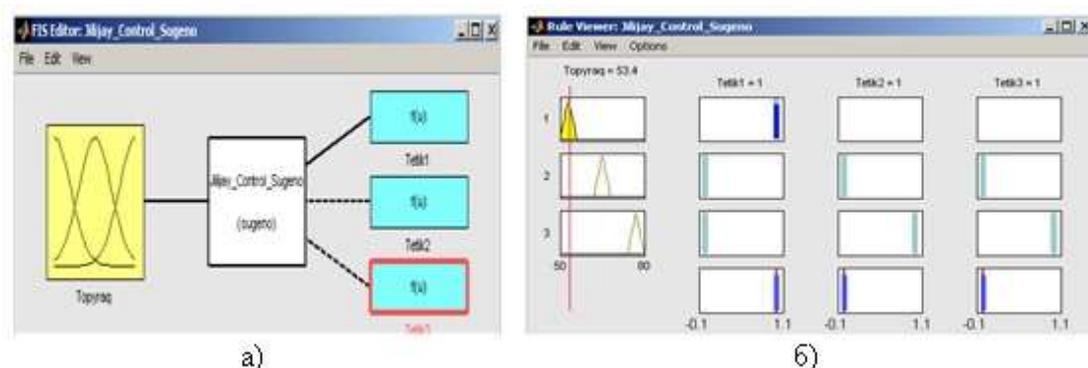


Рисунок 4.6 Структура Регулятора 2:  
а) модель Сугено; б) логический вывод модели

### 1) Принцип работы нейроконтроллера (НК) (рисунок 4.5).

Задача Блока управления – автоматическое поддержание микроклимата внутри теплицы, которое осуществляется с помощью двух регуляторов. Задача Регулятора 1 – идентификация Объекта управления посредством обучения, который минимизирует ошибку обучения  $e_1(t)$  для каждого сигнала датчика, то  $|x_{in1}(t) - f_{in1}(t)| \rightarrow \min$ ;  $|x_{in2}(t) - f_{in2}(t)| \rightarrow \min$ ;  $|x_{in3}(t) - f_{in3}(t)| \rightarrow \min$ . Выходом регулятора является сигнал управления  $u_1^*(t)$ ,  $u_2^*(t)$ ,  $u_3^*(t)$ , который подается на вход второго регулятора.

Задача Регулятора 2 – управление Объектом управления на основе управляющего сигнала первого регулятора, то есть является подчиненным. Он реализует закон релейного управления (см. п. 3.2). Таким образом, НК адаптируется к условиям внешней среды, выполняя автоматическую настройку

параметров управления. Параметры начальной настройки НК берутся из таблицы 2.1 из главы 2.

Таким образом, НК адаптируется к условиям внешней среды, выполняя автоматическую настройку параметров управления. Начальная настройка НК задается в виде таблицы 4.1. В процессе работы, после каждого обучения, настройки контроллера меняются и обновляются.

Таблица 4.1 Нормы оптимума Среды

Параметры	Норма (задание)
Температура воздуха, С	$x_{in1}(t) \in [18; 22]$
Влажность воздуха, %	$x_{in2}(t) \in [50; 60]$
Освещение, лк	$x_{in3}(t) \in [500; 600]$
Влажность почвы, %	$x(t) \in [60; 80]$

Главным недостатком применения Нейроконтроллера является то, что невозможно прописать понятные правила для его настройки, как в случае с НЛК.

2) П р и н ц и п р а б о т ы нечеткого логического контроллера (НЛК) (рисунок 4.6).

Схема имеет два регулятора: Регулятор 1 и Регулятор 2. Первый регулятор является основным и выполняет нечеткую идентификацию объекта управления (режим обучения), второй регулятор является подчиненным и синтезирует закон управления объектом (режим управления). Процесс обучения происходит в offline режиме на основе данных, собранных в течение 24 часа и хранимых в Базе данных; процесс управления – в online режиме.

Задача Блока управления – автоматическое поддержание микроклимата внутри теплицы, которое также осуществляется с помощью двух регуляторов. Задача Регулятора 1 – нечеткая идентификация Объекта управления посредством обучения. Процесс идентификации Объекта состоит из этапов Фазификации, Нечеткого логического вывода и Дефазификации с помощью модели Мамдани. Сеть имеет 3 входа и 1 выход.

Входными переменными являются температура и влажность воздуха, интенсивность освещения, выходным параметром является влажность почвы. Для фазификации каждой переменной используются три функции принадлежности (термы “Низкая”, “Нормальная” и “Высокая”) гауссовского типа.

Используемая нейронная сеть - сеть ANFIS (описана в главе 2) с гибридным двухпроходным алгоритмом обучения. На прямом ходе используется алгоритм Метода наименьших квадратов, на обратном ходе – Алгоритм обратного распространения ошибки .

Правила Базы знаний Регулятора 1 показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 База знаний Регулятора 1

	<b>Если</b>	<b>То</b>
Правило 1	Температура воздуха = нормальная И Влажность воздуха = нормальная И Освещенность = нормальная	Влажность почвы - Нормальная
Правило 2	Температура воздуха = низкая И Влажность воздуха = высокая И Освещенность = низкая	Влажность почвы - Высокая
Правило 3	Температура воздуха = высокая И Влажность воздуха = низкая И Освещенность = низкая	Влажность почвы - Сухая

Задача Регулятора 2 – четкое управление Объектом управления на базе нечеткого управляющего воздействия Регулятора 1. Процесс управления Объектом состоит из этапов Фазификации, Нечеткого логического вывода и Дефазификации с помощью модели Сугено. Используемая нейронная сеть – сеть ANFIS.

Сеть имеет 1 вход и 3 выхода. Правила Базы знаний Регулятора 2 показаны в таблице 4.3. Входными переменными является влажность почвы, выходными – состояние исполнительных механизмов ИМ1, ИМ2 и ИМ3. Для фазификации входной переменной используются три функции принадлежности (термы “Низкая”, “Нормальная” и “Высокая”) треугольного вида.

Таблица 4.3 База знаний Регулятора 2

	<b>Если</b>	<b>То</b>
Правило 1	Влажность почвы – Нормальная	Выключить ИМ1 И Выключить ИМ2 И Выключить ИМ3
Правило 2	Влажность почвы – Влажная	Выключить ИМ1 И Включить ИМ2 И Включить ИМ3
Правило 3	Влажность почвы - Сухая	Включить ИМ1

Главным преимуществом НЛК является во-первых, то, что его настройки понятны пользователю, так как они прописываются экспертом в виде правил «если» - «то», во-вторых, правила Базы знаний работают параллельно (при допущении конфликта правил, то другие правила могут разрешить возникший конфликт).

Процессы, полученные в результате нечеткого управления и ее имитационная модель в среде Matlab показаны на рисунках 4.7 и 4.8.

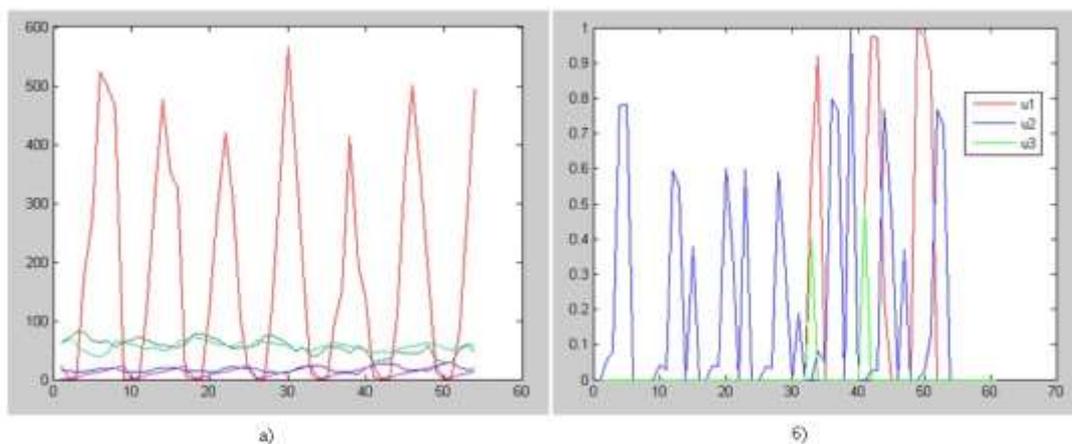


Рисунок 4.7 Имитация работы НЛК: а) мониторинг данных; б) управление процессами охлаждения/освещения/полива

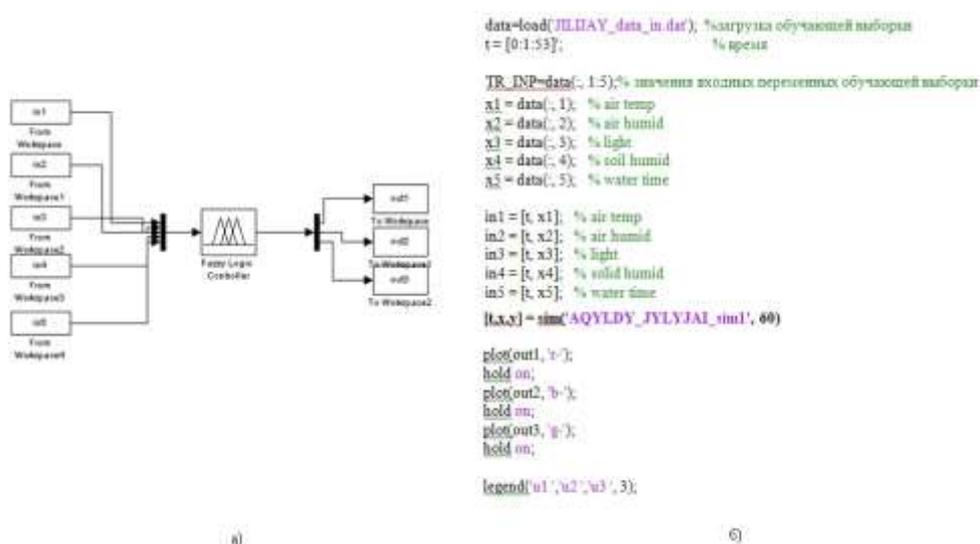


Рисунок 4.8 а) Симулинк модель НЛК; б) Матлаб-скрипт, имитирующий процесс

В ходе эксперимента была определена также зависимость  $g_{out} = f(g_{in1}, g_{in2}, g_{in3})$ , описанная выше. Ее уравнение регрессии имеет вид  $y = \beta_0 + \beta_1 x_0 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$  и выражается зависимостью  $y = 50.1304 - 1.8493x_1 + 7.8969x_2 - 3.7954x_3$ . Коэффициент корреляции, выражающий зависимость влажности почвы от входных параметров среды в рассматриваемый вегетационный период равен 0,7988. Графики на рисунке 4.9 иллюстрируют эту зависимость. Такая зависимость была получена после регулирования процессов на основе правил БЗ приведенного НЛК, имеющего два регулятора [102].

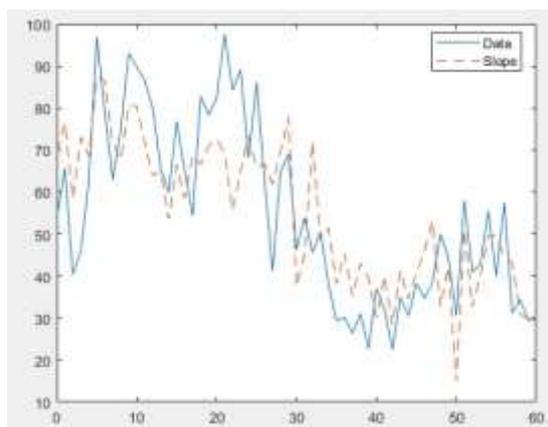


Рисунок 4.9 Корреляционная зависимость влажности почвы от входных параметров среды

#### 4.2 Мониторинг состояния среды с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби

Был проведен эксперимент в большом масштабе в условиях научно-исследовательской теплицы КазНУ им. аль-Фараби [98, с. 114].



Рисунок 4.10 Процесс вегетации в теплице КазНУ им. аль-Фараби

Цель эксперимента - исследование процессов роста и развития растений в зависимости от условий окружающей среды. Описание эксперимента, ее биологическая и техническая характеристика были описаны в разделе 3.2 главе

3. Данные мониторинга были получены с 24 передатчиков с встроенными датчиками (плата ESP 32), которые установлены на почву соответствующего узла. Общая оценка состояния среды (воздушная/освещение/почвенная) определяется посредством усреднения показаний всех 24 передатчиков.

На рисунках 4.11 и 4.12 приводятся экспериментальные данные мониторинга, полученные в течение 75 дней. Это среднесуточные данные среды и средний показатель каждого растений третьего блока теплицы. Из графика на рисунке 4.11а видно, что дневная и ночная температура воздуха имеют разницу примерно 5-6 градусов. Это очень важный фактор (термопериодизм) для оптимального роста растений. Показатели влажности воздуха и почвы имеют почти одинаковые значения (рисунок 4.11б). Как показывает график на рисунке 4.12а функция состояния освещенности среды обратно пропорциональна влажности воздуха и почвы, то есть при возрастании влажности воздуха убывает значение освещенности и наоборот. Состояние динамики роста и развития растения оценивается с помощью показателей вегетативного и генеративного роста, таких, как число листьев, завязей, зеленцов и спелых плодов. Как видно из рисунка 4.12б, функция роста и развития растения имеет вид логистической кривой, описанной в пункте 3.1 главы 3.

Средний урожай составил 3...4 кг/м<sup>2</sup>. Поддерживая оптимальные условия в теплице, можно получить несколько урожаев в течение 1-2 месяцев.

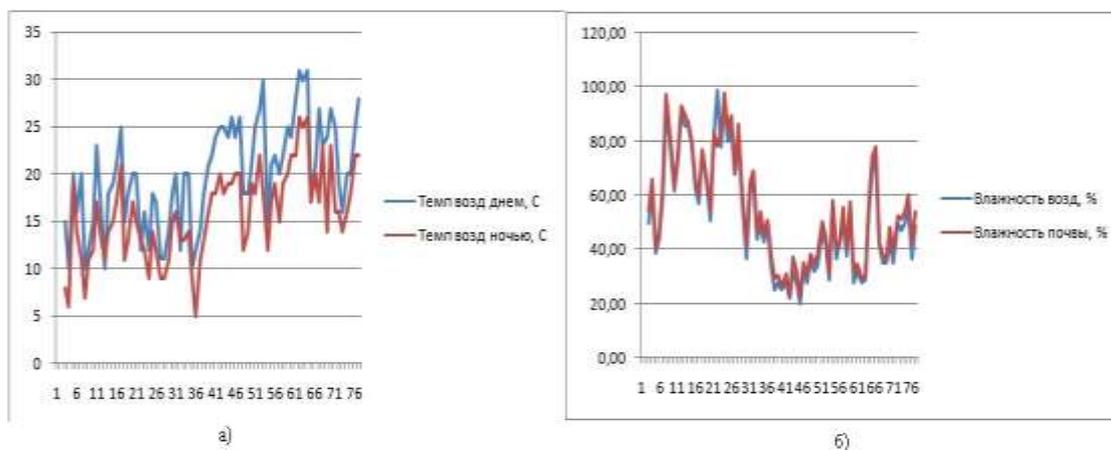


Рисунок 4.11 Данные мониторинга а) температуры и б) влажности воздуха (Состояние среды)

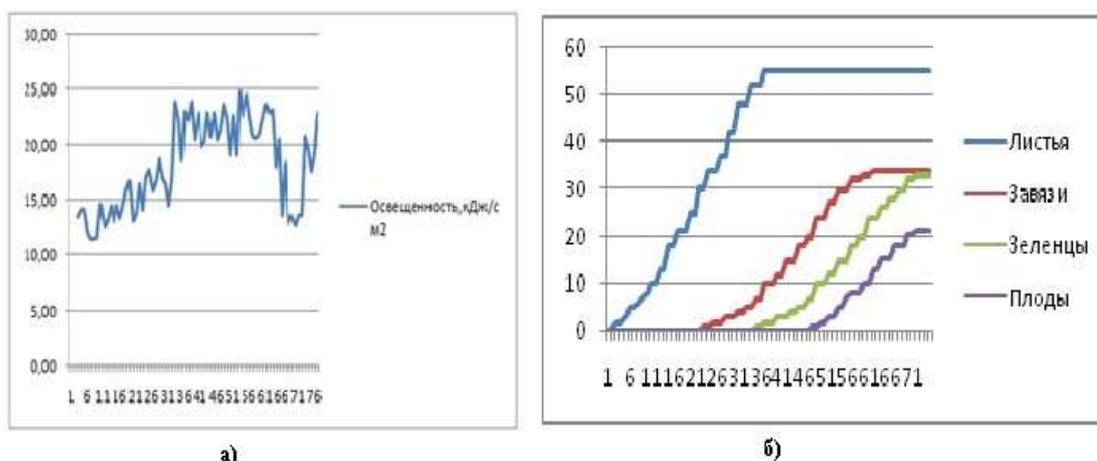


Рисунок 4.12 Данные мониторинга а) освещенности и б) динамики роста

### 4.3 Ситуационное управление в суточном масштабе времени с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби (задачи 1 и 3)

Процесс ситуационного управления текущей ситуацией в нашем случае состоит из трех подзадач: - управление воздушной средой / управление средой освещенности / управление почвенной средой.

Данные мониторинга среды будут использованы в процессе управления. Графики процесса в период вегетации изображены на рисунке 4.13. На графике расположены два процесса: температура дневного и ночного воздуха.

Показаны графики температурного режима в суточном масштабе времени: сигнал нечеткого управления (рисунок 4.14) и соответствующий ему процесс до и после управления (рисунок 4.15).

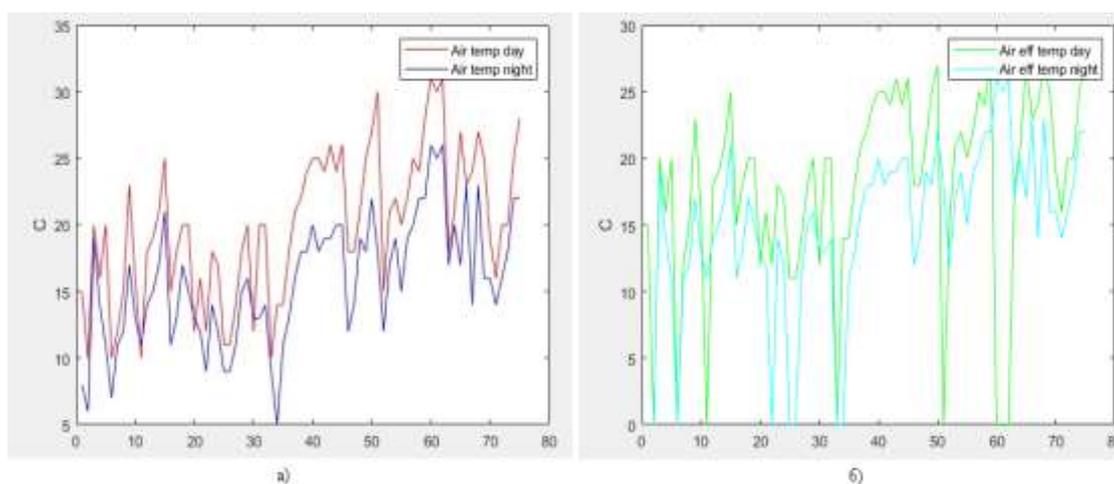


Рисунок 4.13 Состояние воздушной среды: а) дневные и ночные температуры; б) дневные и ночные эффективные температуры

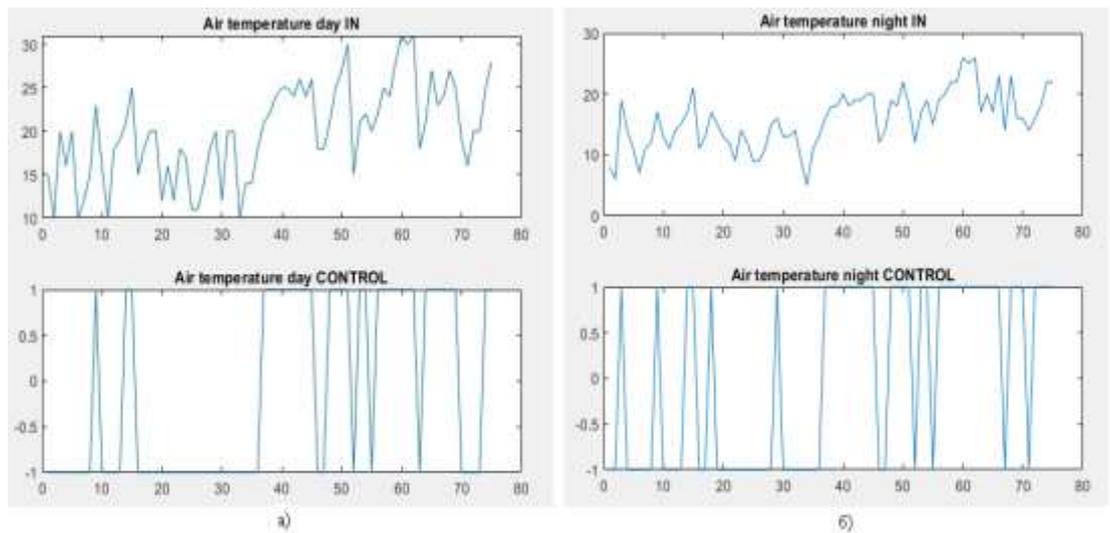


Рисунок 4.14 Режим управления воздушной средой в суточном масштабе: а) сигнал управления (день); б) сигнал управления (ночь)

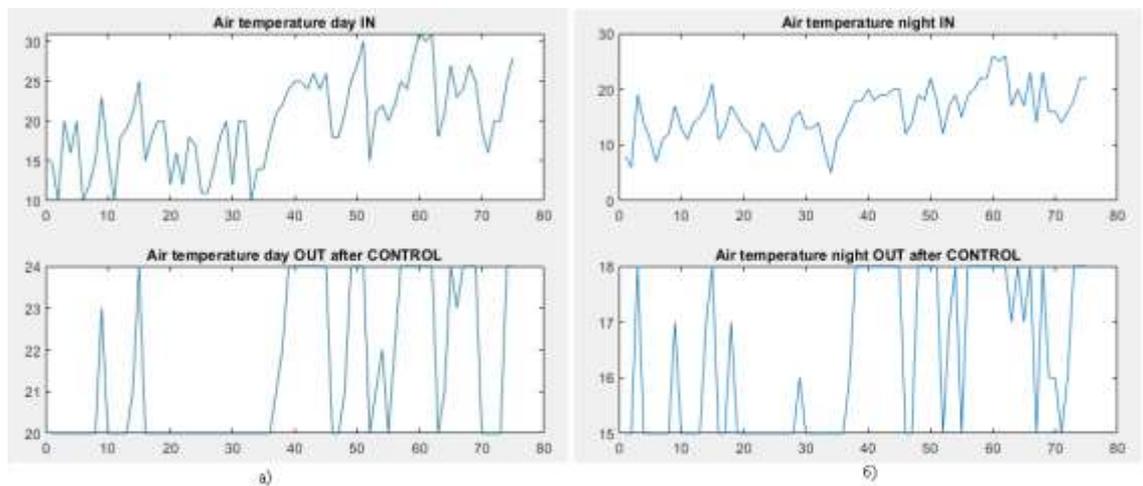


Рисунок 4.15 Режим управления воздушной средой в суточном масштабе: а) процесс до и после управления (день); б) процесс до и после управления (ночь);

Опишем результаты решения задачи - управление режимом освещения.

Графики процесса в период вегетации изображены на рисунке 4.16. На графике расположены два процесса: освещенность на входе и эффективная освещенность на выходе (оптимальная для роста растения). Показаны графики светового режима в суточном масштабе времени: сигнал нечеткого управления (рисунок 4.17) и соответствующий ему процесс до и после управления (рисунок 4.18).

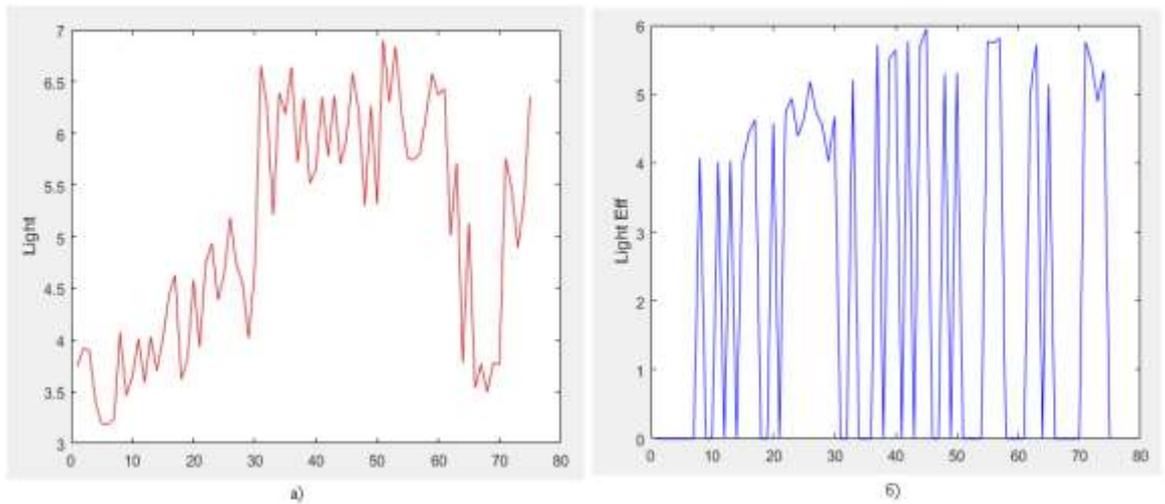


Рисунок 4.16 Состояние среды освещения: а) освещенность; б) эффективная освещенность

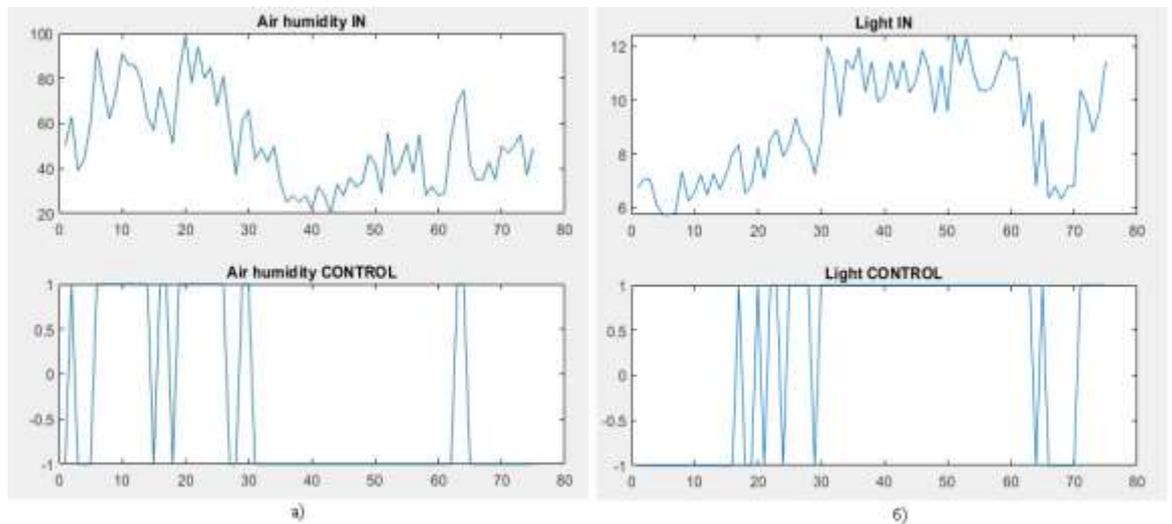


Рисунок 4.17 Режим управления режимом освещения в суточном масштабе: а) сигнал управления (день); б) сигнал управления (ночь)

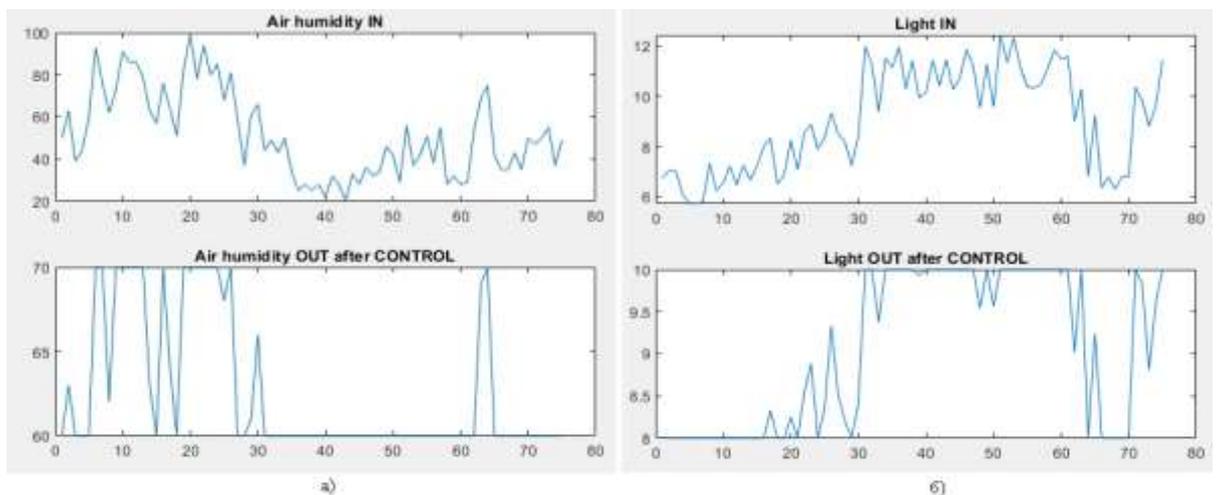


Рисунок 4.18 Режим управления режимом освещения в суточном масштабе: а) процесс до и после управления (день); б) процесс до и после управления (ночь);

Опишем результаты решения задачи - управление почвенной средой через капельный полив.

Графики процесса в период вегетации изображены на рисунке 4.19. На графике расположены два процесса: влажность воздуха и влажность почвы. Показаны графики режима капельного полива в суточном масштабе времени: сигнал нечеткого управления (рисунок 4.20а) и соответствующий ему процесс до и после управления (рисунок 4.20б).

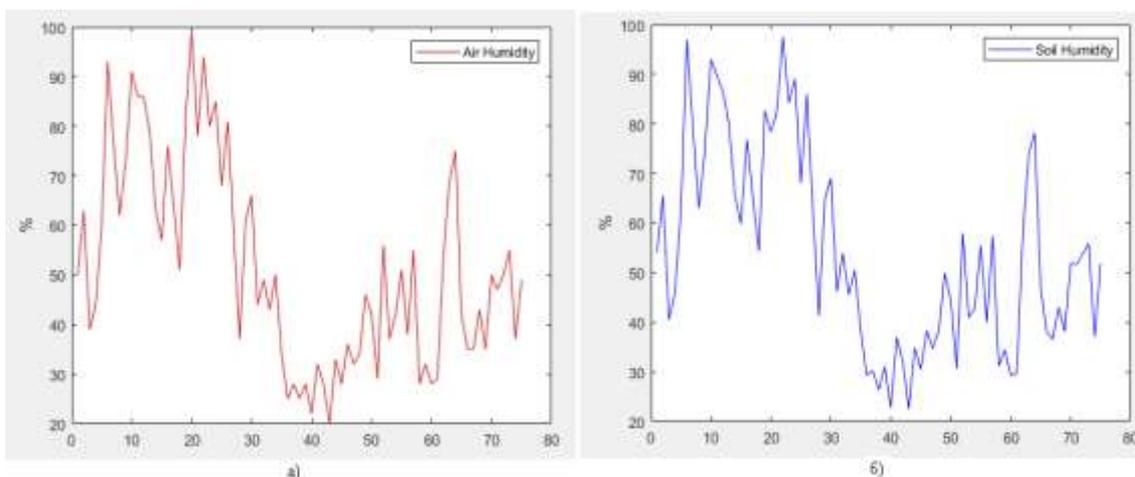


Рисунок 4.19 Состояние почвенной среды: а) влажность воздуха; б) влажность почвы

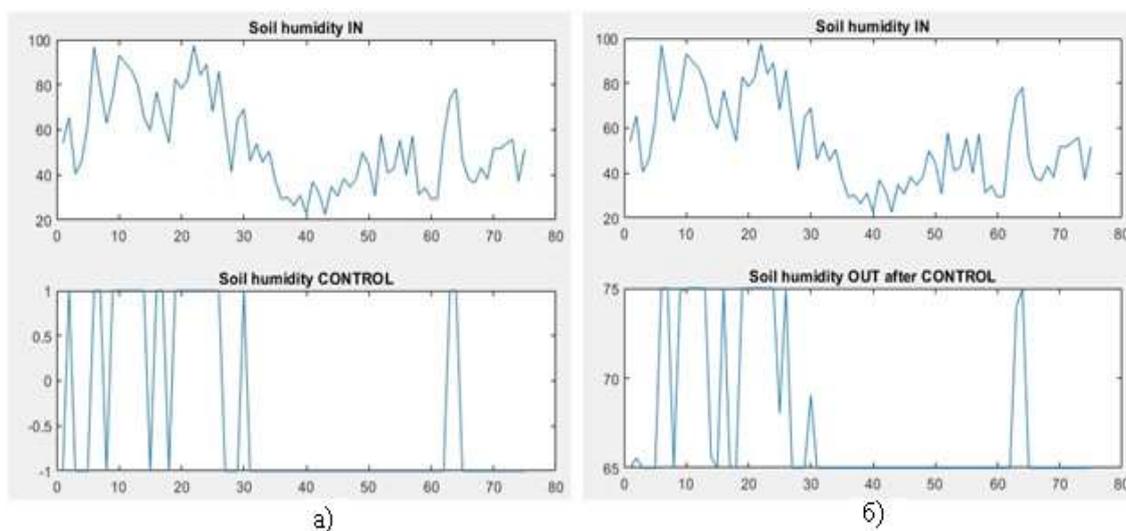


Рисунок 4.20 Режим управления режимом капельного полива суточном масштабе: а) сигнал и процесс до управления; б) сигнал и процесс после управления;

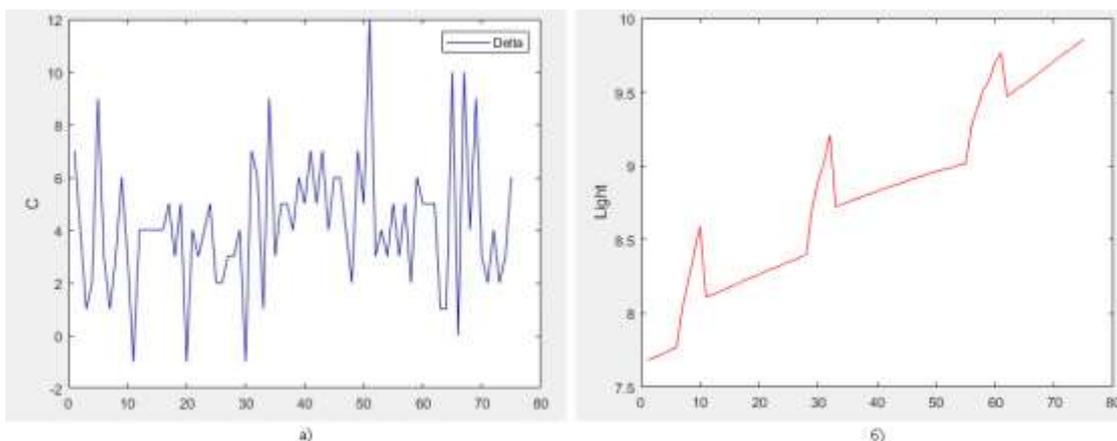


Рисунок 4.21 Интегральные показатели среды:

а) разность дневных и ночных температур;

б) продолжительность дня (фотопериод)

В ходе исследования процессов были найдены интегральные агротехнические показатели, рассчитанные в соответствии с алгоритмами из главы 2. Разность дневных и ночных температур показана на рисунке 4.21а. Продолжительность светового дня показана на рисунке 4.21б. Как видно из Рисунка 4.21б длина светового дня постоянно увеличивается, это очевидно, так как продолжительность дня растет в весенне-летнем периоде, по сравнению с летне-осенним периодом, когда продолжительность дня убывает.

- Среднесуточная температура днем  $S_{int}(x_1(D(t_i)=1)) = 19.93 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Среднесуточная температура ночью  $S_{int}(x_1(D(t_i)=0)) = 15.76 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Среднесуточная эффективная температура днем  $S_{int}(x_1^{\text{эфф}}(D(t_i)=1)) = 17,81 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Среднесуточная эффективная температура ночью  $S_{int}(x_1^{\text{эфф}}(D(t_i)=0)) = 14.93 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Сумма дневных эффективных температур  $S_{int}(\sum x_1^{\text{эфф}}(D(t_i)=1)) = 802 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Сумма ночных эффективных температур  $S_{int}(\sum x_1^{\text{эфф}}(D(t_i)=0)) = 501 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Сумма эффективных температур за весь период вегетации  $S_{int}(\sum x_1^{\text{эфф}}(t_i)) = 1403 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Суммарная эффективная освещенность  $S_{int}(\sum x_2^{\text{эфф}}(t_i)) = 1100 \text{ кДж/см}^2$ ;
- Суммарный фотопериод  $S_{int}(\sum x_2^{\text{эфф}} * t_i) = 1201 \text{ час}$ ;
- Приблизительный день наступления первой фазы  $t^* = 9$ ;
- Приблизительный день наступления второй фазы  $t^{**} = 31$ ;
- Приблизительный день наступления третьей фазы  $t^{***} = 45$ .

#### 4.4 Ситуационное управление в биологическом масштабе времени с использованием беспроводных и IoT технологии в исследовательской теплице КазНУ им. аль-Фараби (задача 2)

Рассчитанные выше показатели сравниваются с биологическими показателями растений, определенных в соответствии с алгоритмами из главы 2. Оптимальные моменты соответствующих фаз развития таковы (нормы):

Биологический момент наступления фазы 1 –  $t_{opt}^* = 11$ ;

Биологический момент наступления фазы 2 –  $t_{opt}^{**} = 33$ ;

Биологический момент наступления фазы 3 –  $t_{opt}^{***} = 48$ .

Рассчитанные моменты наступления фаз  $t^* = 9$ ;  $t^{**} = 31$ ;  $t^{***} = 45$  и реальные моменты фаз растения соответственно равны  $t^* = 11$ ;  $t^{**} = 33$ ;  $t^{***} = 48$ . На рисунке 4.22-4.26 изображены гистограммы, показывающие значения среднеквадратических отклонений от оптимумов для воздушной среды, освещенности, почвы и растения. Значения оценок соответственно равны  $E1 = 0.4008$ ,  $E2 = 0.1797$ ,  $E3 = 1.5159$  (рисунок 4.22а, 4.22б, 4.23). Общая интегральная оценка составляет  $E = 2.1105$  (рисунок 4.26а). Графики нечеткого логического вывода базы знаний FIS\_OPTIM на рисунке 4.25б показывают, что интегральное состояние среды и растения находится вблизи зоны оптимума (рисунок 4.24б), обеспечивая тем самым благоприятные условия для растений. Результаты подтверждают, что наблюдаемые состояния подчиняются закону оптимума в течение всего периода роста и развития растения.

На рисунках 4.25 и 4.26 также изображены структура и правила баз знаний нечетких систем FIS\_OPT3 и FIS\_OPTIM, входящих в состав экспертной системы “Растение-Среда-Оптимум”.

В рассматриваемой ситуации наиболее подходящим технологически управлением является решающее правило, выбранное экспертом  $U^* = \{u_1^*, u_2^*, u_3^*\}$ . Правило удовлетворяет условию (2.1) задачи технологического управления из главы 2.

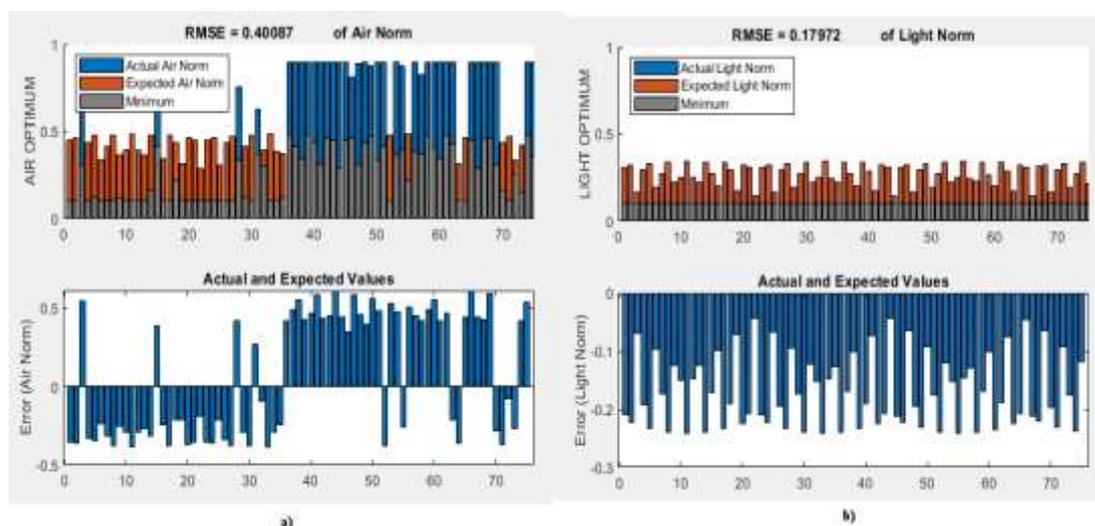


Рисунок 4.22 Оценка оптимума: а) воздушной среды б) освещенности

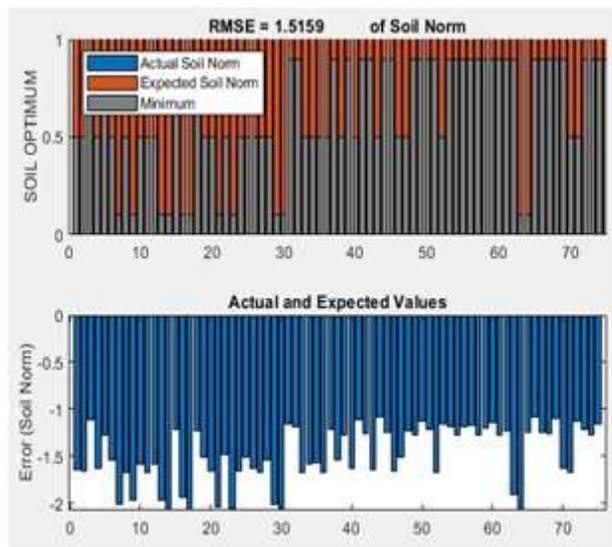


Рисунок 4.23 Оценка оптимума почвенной среды

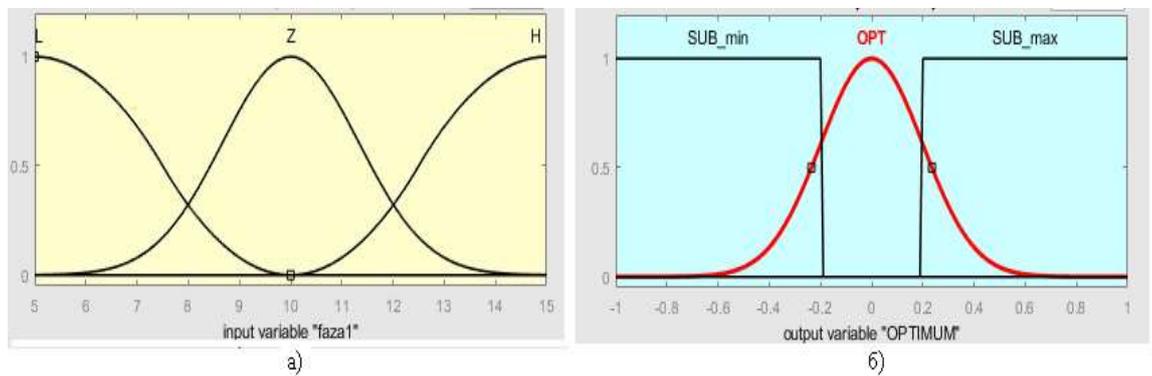


Рисунок 4.24 Функции оптимума входной и выходной переменной



Рисунок 4.25 База знаний интегральной оценки оптимума FIS\_OPTIM:  
а) Правила БЗ; б) вывод правил БЗ

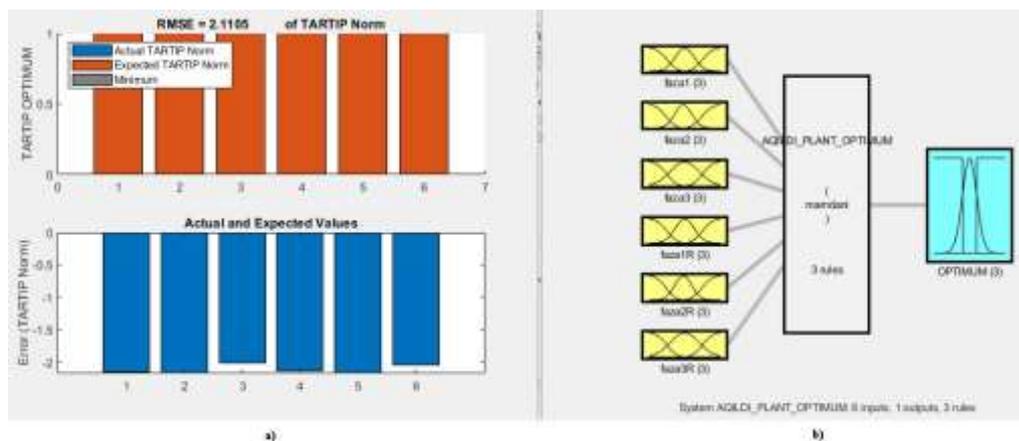


Рисунок 4.26 База знаний FIS\_OPTIM: а) интегральная оценка; б) структура системы FIS\_OPTIM

#### 4.5 Сравнительный анализ урожайности для трех теплиц: КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и Eco Product Company (Актобе)

Для оценки применимости и адаптации к различным условиям разработанной модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление” было осуществлено ее внедрение в теплицы: Алматы ( $43^{\circ}15'$  с.ш.,  $76^{\circ}54'$  в.д.), Туркестан ( $43^{\circ}18'$  с.ш.,  $68^{\circ}14'$  в.д.) и Актобе ( $50^{\circ}18'$  с.ш.,  $57^{\circ}10'$  в.д.) [98, с. 114]. Эти населенные пункты имеют различные климатические условия, которые влияют на урожайность. Например, климат Алматы – континентальный; климат Туркестана – субтропический внутриконтинентальный и крайне засушливый; климат Актобе - резко континентальный.

##### 4.5.1 Планирование эксперимента

Характеристика биологического эксперимента:

**Ц е л и и з а д а ч и:** рассчитать урожайность СХК теплиц для различных регионов;

**М е с т о п р о в е д е н и я о п ы т а:** Алматы, Туркестан и Актобе;

**В р е м я п р о в е д е н и я о п ы т а:** 15 апреля – 6 июля (весенний-летний сезон, 83 дня);

**П е р и о д в ы п о л н е н и я о п ы т о в:** (см. п. 3.1.3);

**К о н ф и г у р а ц и я о п ы т а:** площадь теплиц 3 соток; объем выборки – 108 растений (см. п. 3.1.3).

**Б и о л о г и ч е с к а я х а р а к т е р и с т и к а р а с т е н и я:**

гибридный сорт огурца “Асылым”. Для защищенного и открытого грунта.

Год включения гибрида в Государственный реестр: 2020. Авторы: Нусупова А.О., Джантасов С.К., Айтбаев Т.Е. Оригинатор: ТОО «Каз НИИ картофелеводства и овощеводства». Происхождение: Метод гибридизации: 1-12 (материнская линия) x С2 (отцовская форма). Среднеспелый гибрид. Апробационные признаки: Форма зеленца веретеновидная, зеленого цвета,

бугорки мелкие и частые. Опушение завязи сложное, плотное, цвет опушения белый. Урожайность: Испытание проходил на территории ТОО «КазНИИПО» в 2019 году. Средняя урожайность = 30,3 кг/м<sup>2</sup> (стандарт 28 кг/м<sup>2</sup>), превышение на 2,4 кг/м<sup>2</sup> или 8,5 %. Качественные показатели: Содержание сухого вещества 3,8%, общего сахара 3,4%, витамина «С» 5,38 мг/%. Товарность 94,2% (стандарт 93%). Масса плода 90 г. Дегустационная оценка 5 баллов. Назначение: Для употребления в свежем виде.

Агротехнический план работ (см. таблицу 3.1).

Для сбора данных эксперимента, конкретно для получения данных NDVI, были использованы спутниковые измерения с помощью программы One Soil для каждого из регионов – Алматы, Туркестана и Актобе (рисунок 4.27).



Рисунок 4.27 Космические снимки теплиц: а) КазНУ им. аль-Фараби (Алматы) и б) МКТУ им. А.Яссави (Туркестан), в) Eco Product Company (Актобе).

#### 4.5.2 Применение модели Лысенко С.А.

Результаты расчета урожайности и полученные графики на основе модели Лысенко С.А., приведенной в п. 1.4.3 представлены на рисунках 4.28 - 4.30.

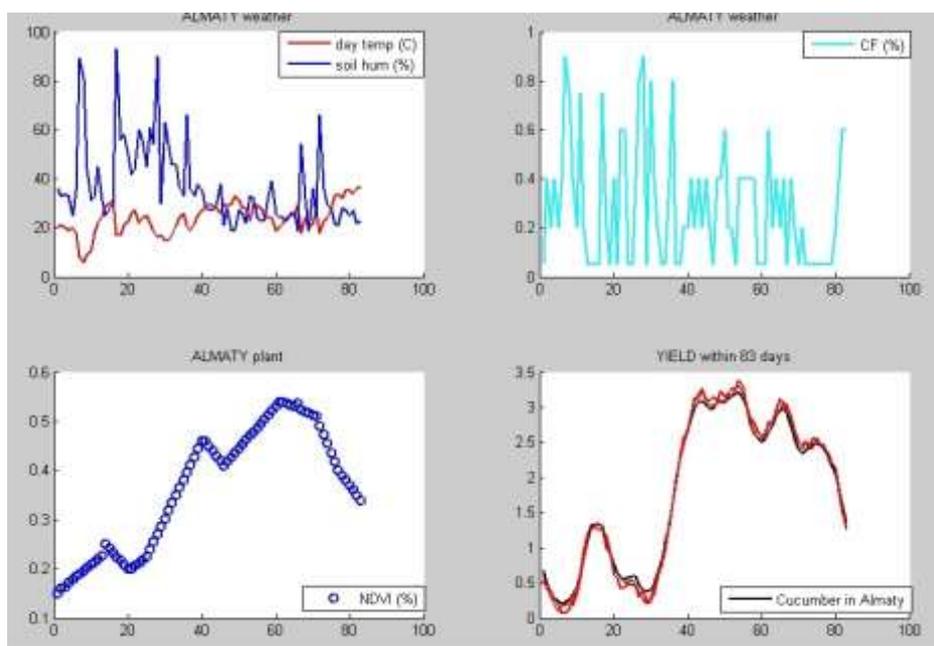


Рисунок 4.28 Урожайность теплицы КазНУ им. аль-Фараби (Алматы)

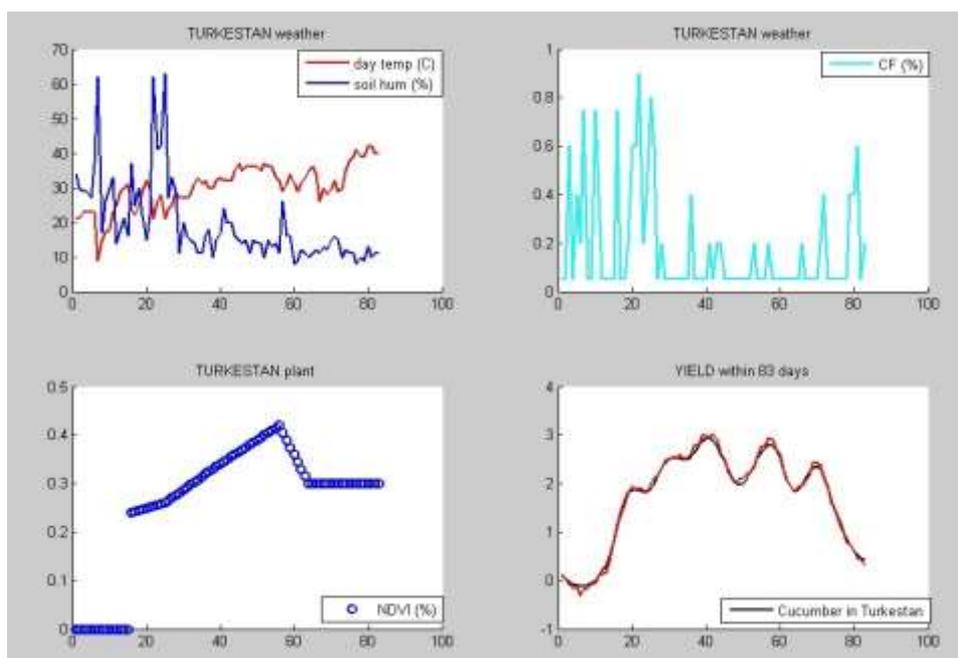


Рис 4.29 Урожайность теплицы МКТУ им. А.Ясави (Туркестан)

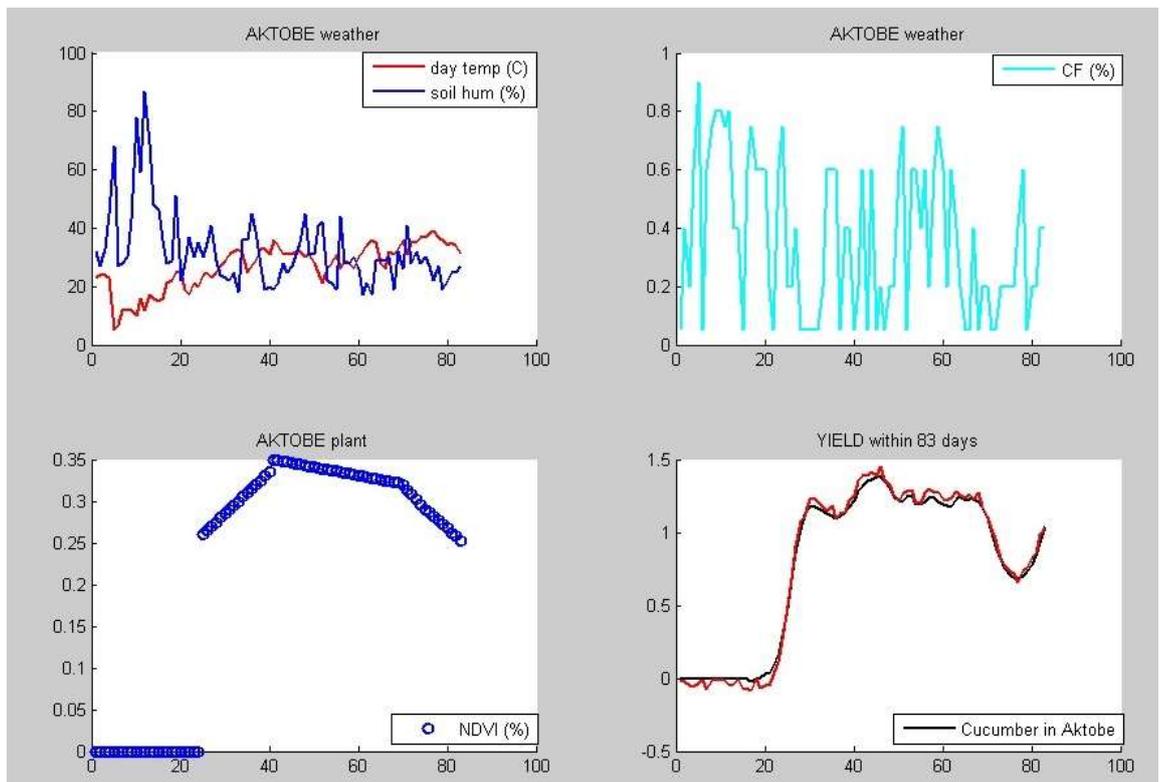


Рисунок 4.30 Урожайность теплицы Eco Product Company (Актобе)

Интегральные показатели среды (эффективные температуры и сумма накопленные осадков) и растения (NDVI) для районов Алматы, Туркестана и Актобе соответственно показаны графиках (рисунки 4.31 - 4.33).

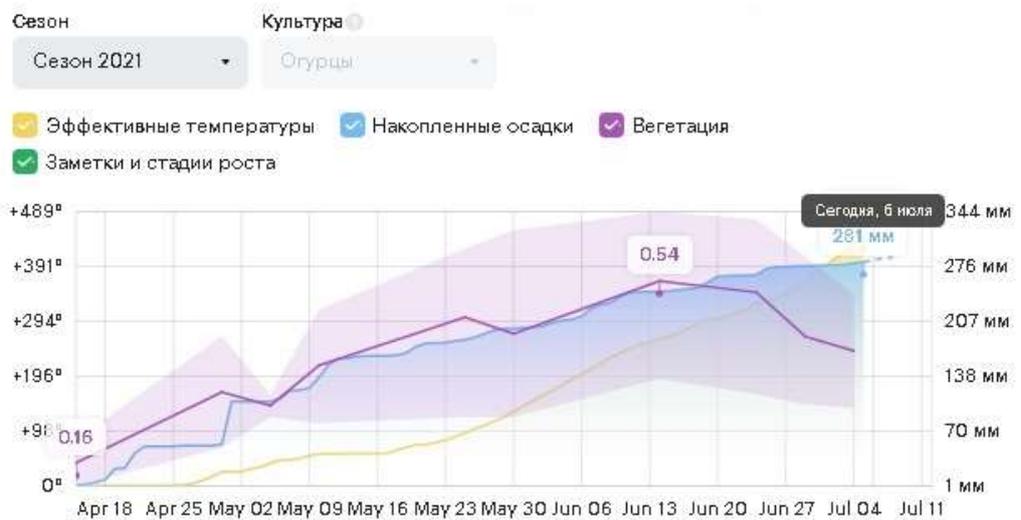


Рисунок 4.31 Интегральные показатели Алматы



Рисунок 4.32 Интегральные показатели Туркестана



Рисунок 4.33 Интегральные показатели теплицы Актобе

В таблице 4.4 приведены параметры модели Лысенко С.А.

Таблица 4.4 Параметры модели Лысенко

Теплица	$a$	$T_{opt}$	$W_{opt}$	$R_0$	$T_R$	$\gamma$
Алматы	0.965	28	29	0.037	11	7.522
Туркестан	0.876	33	11	0.026	15	6.430
Актобе	0.678	31	32	0.028	14	5.123

Была определена регрессионная зависимость типа  $Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4$ . Она выражает зависимость урожайности от факторов внешней среды; температуры воздуха, влажности почвы, облачности (CF) и NDVI для трех теплиц, соответственно: для Алматы (4.1), Туркестана (4.2) и Актобе (4.3):

$$Y_1 = 675.88 - 144.10 \cdot x_1 + 9.29 \cdot x_2 - 0.43 \cdot x_3 - 153.72 \cdot x_4 \quad (4.1)$$

$$Y_2 = 688.92 + 185.74 \cdot x_1 - 7.17 \cdot x_2 - 0.47 \cdot x_3 - 14.89 \cdot x_4 \quad (4.2)$$

$$Y_3 = 1343 + 239.72 \cdot x_1 - 4.78 \cdot x_2 - 2.60 \cdot x_3 - 102.05 \cdot x_4 \quad (4.3)$$

### 4.5.3 Применение нечеткой модели урожайности

Показатель урожайности – окончательный показатель модели, определяющий конечный результат процесса выращивания растений. Показатель урожайности в  $i$ -е сутки определяется по формуле:

$$Y(t_i) = y_3(t_i) \cdot massa, \quad (4.4)$$

где  $y_3(t_i)$  - число спелых плодов/м<sup>2</sup>,  $massa$  – средняя масса плода (кг).

По показателю (4.4) можно сравнить модель (2.25) – (2.37) с моделью Лысенко С.А. Структура ЭС для расчета урожайности трех регионов показаны в таблице 4.5 и на рисунках 4.34 - 4.35.

Таблица 4.5 Выбор структуры экспертной системы “AQILDI\_JILJAY”

Применение системы в условиях (ситуация)	Методы нечеткого вывода	Число входов	Число выходов	Число правил БЗ
Алматы	Модель Сугено	4	1	7
Туркестан	Методы фаззификации: Метод И – prod	4	1	3
Актобе	Метод ИЛИ – max Метод дефаззификации – wtaver	4	1	6

Следует заметить из таблицы 4.5, что структура базы знаний экспертной системы изменяется в зависимости от региона; например, для Алматы – 7 правил, для Актобе – 6 правил, для Туркестана – 3 правил. Это говорит о том, что настоящая интеллектуальная система является самонастраивающейся и может вырабатывать решение для ЛПР в зависимости от текущей ситуации. Этим и отличается модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” от модели Лысенко С.А.

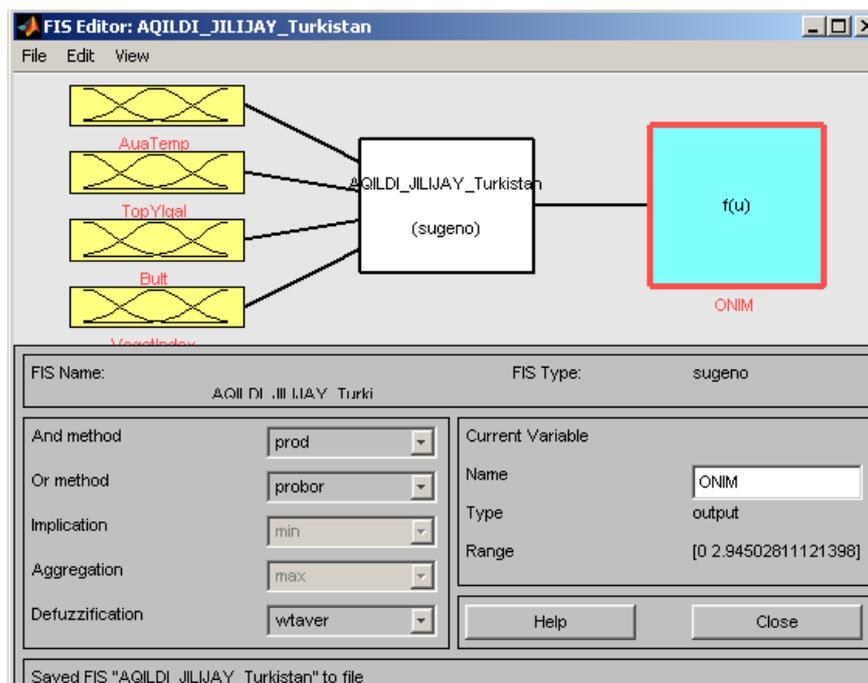


Рисунок 4.34 Структура нечеткой системы AQILDI\_JILIJAY в условиях Туркестана

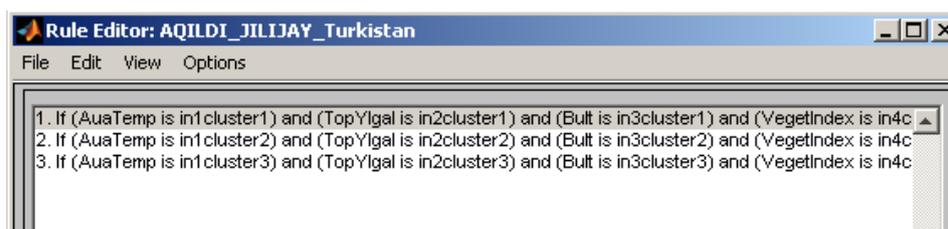


Рисунок 4.35 База правил нечеткой системы AQILDI\_JILIJAY в условиях Туркестана

Результаты обработки данных при заданных параметрах обучения (метод – гибридный, число итерации – 40) для теплицы Eco Product Company (Актобе) показаны в таблице 4.6 и на рисунках 4.36 и 4.37.

Таблица 4.6 Ошибки обучения и моделирования

Теплица	Ошибка обучения	Ошибка моделирования на основе обучающей выборки	Ошибка моделирования на основе тестовой выборки
Алматы	0,1970	0,1970	0,1848
Туркестан	0,2100	0,2100	0,2256
Актобе	0,1644	0,1644	0,1715

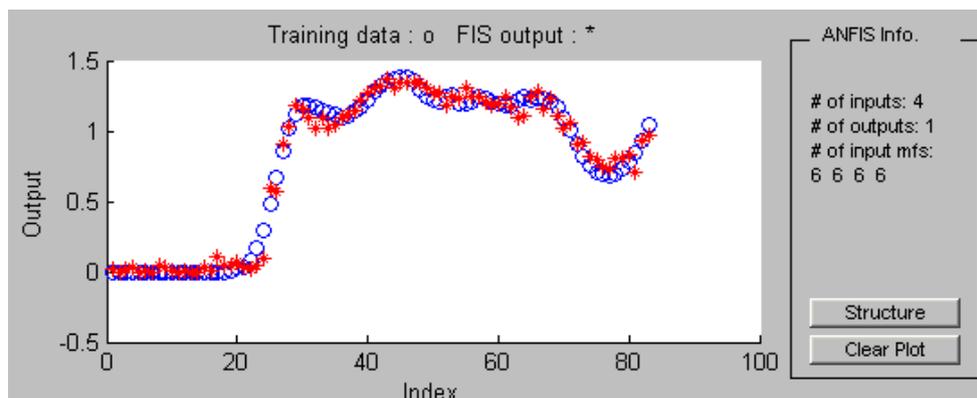


Рисунок 4.36 Ошибка моделирования на основе обучающей выборки для теплицы Eco Product Company (Актобе)

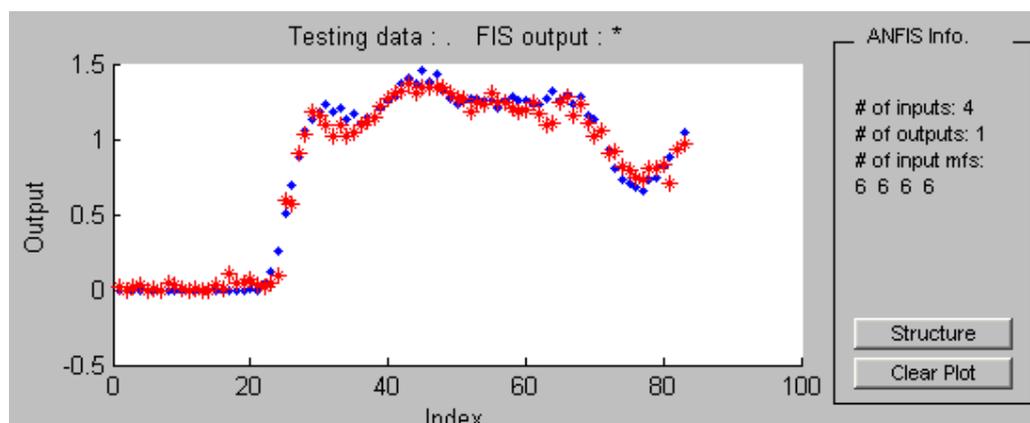


Рисунок 4.37 Ошибка моделирования на основе тестовой выборки для теплицы Eco Product Company (Актобе)

#### 4.5.4 Сравнительный анализ моделей

Результаты сравнительного анализа модели Лысенко С.А. и модели “Почва-Растение-Ситуация-Управление” соответственно для трех теплиц показаны на графиках (рисунки 4.38 - 4.40).

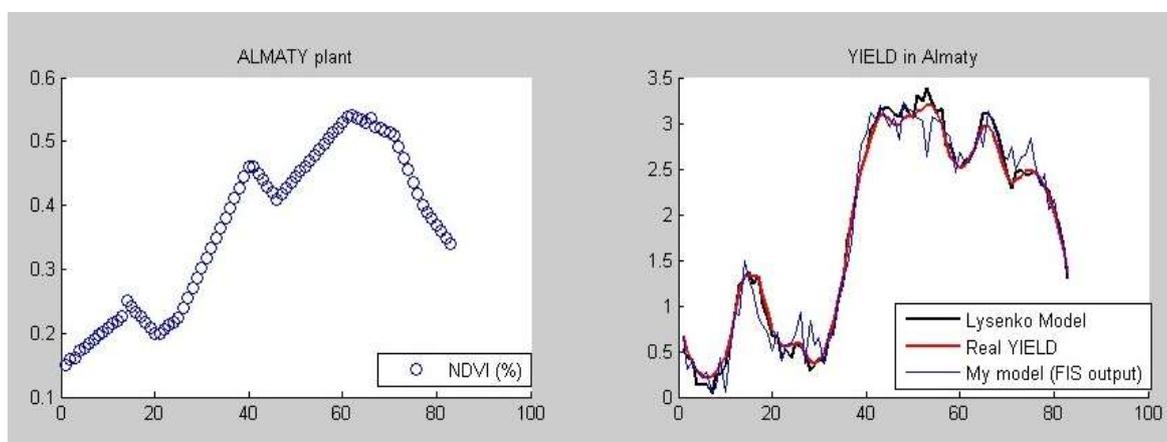


Рисунок 4.38 Процессы в теплице КазНУ им. аль-Фараби (Алматы)

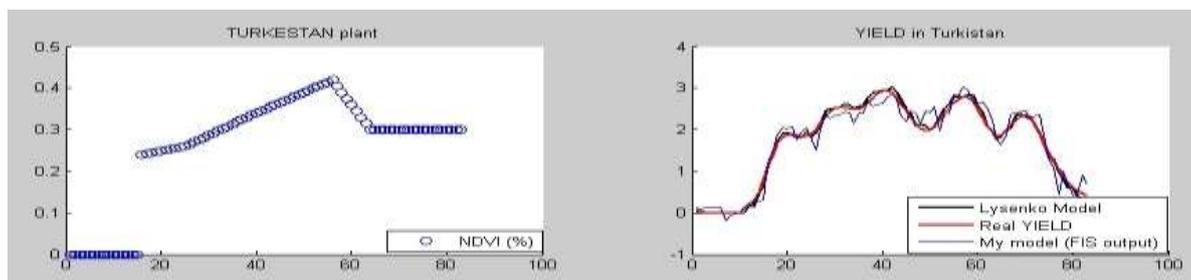


Рисунок 4.39 Процессы в теплице МКТУ им. А.Ясави (Туркестан)

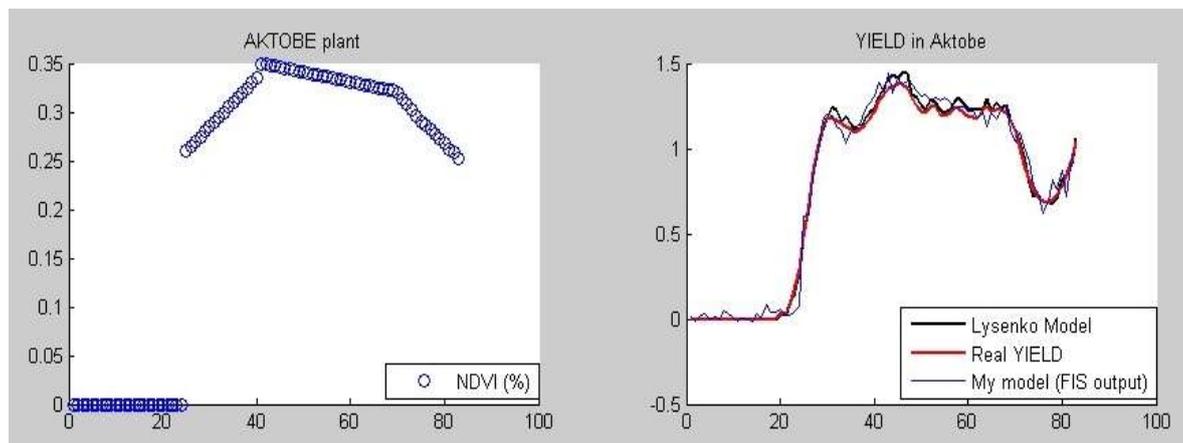


Рисунок 4.40 Процессы в теплице Eco Product Company (Актобе)

Сравнительный анализ показателей урожайности и динамики вегетации представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 Сравнительный анализ трех теплиц

Показатель	Алматы	Туркестан	Актобе
Средняя урожайность	1,80 кг/м <sup>2</sup>	1,72 кг/м <sup>2</sup>	0,79 кг/м <sup>2</sup>
Потенциальная урожайность	3,37 кг/м <sup>2</sup>	3,08 кг/м <sup>2</sup>	1,45 кг/м <sup>2</sup>
Начало вегетации	с 1 дня	через 15 дней	через 21 дней
1-сбор урожая	на 41 день (поздний урожай)	на 34 день (ранний урожай)	на 39 день
Рост урожайности	Равномерный, с макс. вегетацией в 0,54	Резкий рост и резкий спад, с макс. вегетацией в 0,42	Резкий рост и медленный спад, с макс. вегетацией в 0,35

В таблице 4.8 приведены оптимальные параметры выращивания огурцов сорта “Асылым”. Эти результаты найдены посредством извлечения знаний из БД с помощью ЭС “AQILDI\_JILJAY” для каждого региона. Заметим, что высокий температурный оптимум – у Туркестана, высокий вегетационный оптимум – у Алматы, высокая влажность почвы – у Актобе.

Таблица 4.8 Оптимальные параметры (средние за весь период вегетации)

Теплица	Температура воздуха	Влажность почвы	Облачность	NDVI
Алматы	28 С	29 %	0.40	0.46
Туркестан	33 С	11 %	0.05	0.30
Актобе	31 С	32 %	0.18	0.29

В таблице 4.9 приведен сравнительный анализ модели Лысенко С.А. и модели “Почва-Растение-Ситуация-Управление” на основе минимума критерия среднеквадратического отклонения (СКО).

Таблица 4.9 Сравнительный анализ моделей

	Алматы	Актобе	Туркестан
Ошибка модели Лысенко С.А.	6,9978	5,5619	5,3661
Ошибка модели “Почва-Растение-Ситуация-Управление”	7,2231	5,9273	5,8232

В результате сравнения моделей было выяснено, что модель Лысенко С.А. является чуть-чуть точнее, чем разработанная модель. Однако последняя модель позволяет дать объяснение текущей ситуации на основе нечетких правил, понятных пользователю - фермеру.

#### 4.6 Оценка работоспособности системы в условиях исследовательской теплицы КазНУ им. аль-Фараби

Рассмотрим функционирование программно-технической системы “Ақылды жылыжай”. Она является системой связи, ее конфигурация приведена в таблице 4.10. Все узлы связи подсоединены к центральному модему (описан в главе 3), постоянно подключенный к сети Интернет и имеющий безлимитный трафик.

Таблица 4.10 Конфигурация системы связи

Узлы сети	Каналы связи	Модель	Станции связи	Модель
Узел 1	Приемник 1 с пропускной способностью 135 Мбт	ESP 32 WiFi + Bluetooth battery (1 шт.)	Передатчик 1 Передатчик 2 Передатчик 3 Передатчик 4 Передатчик 5	ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (5 шт.)
Узел 2	Приемник 2	ESP 32 WiFi + Bluetooth battery (1 шт.)	Передатчик 6 Передатчик 7 Передатчик 8 Передатчик 9 Передатчик 10	ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (5 шт.)
Узел 3	Приемник 3	ESP 32 WiFi + Bluetooth	Передатчик 11 Передатчик 12	ESP32 WiFi&Bluetooth

		battery (1 шт.)	Передатчик 13 Передатчик 14 Передатчик 15	CP2104 DHT11 Soil (5 шт.)
Узел 4	Приемник 4	ESP 32 WiFi + Bluetooth + battery (1 шт.)	Передатчик 16 Передатчик 17 Передатчик 18 Передатчик 18 Передатчик 20	ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (5 шт.)
Узел 5	Приемник 5	ESP 32 WiFi + Bluetooth + battery (1 шт.)	Передатчик 21 Передатчик 22 Передатчик 23 Передатчик 24	ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (5 шт.)

Модель функционирования системы может быть описана в виде системы массового обслуживания (СМО). Система массового обслуживания (СМО) – система, которая производит обслуживание поступающих в неё заявок или требований и задается в виде [104, с. 345]

$$A / B / n / m, \quad (4.5)$$

где  $A$  – вид закона поступления заявок, если  $A = M$ , то закон является Пуассоновским;

$B$  - вид закона обслуживания, если  $B = Exp$ , то закон является показательным;  $n$  – число серверов (каналов) обслуживания;  $m$  – количество мест (очереди).

В работе для описания закона поступления заявок применяется Пуассоновское распределение, которое имеет вид:

$$P(\lambda, k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp^{-\lambda}, \quad (4.6)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, \lambda$  – параметр.

Для описания закона обслуживания применяется показательное (экспоненциальное) распределение:

$$Exp(\lambda) = \lambda \exp^{-\lambda}, \quad (4.7)$$

где  $\lambda$  – параметр.

Опишем только первый узел сети с Приемником 1 и Передатчиками 1,2,3,4 и 5. Работа остальных узлов аналогична первой.

Таким образом, рассматриваемая система является СМО типа  $M/Exp/1/4$ . Она имеет  $n = 1$  канал обслуживания с  $m = 4$  очередями. Число входных потоков равно  $\lambda = 5$ , то есть

$P(\lambda=5)$ . Закон поступления заявок является Пуассоновским, так как все заявки являются однотипными, имеют стандартный объем и поступают одновременно в единицу времени. Устойчивая пропускная способность

приемника равна 135 МБт/сек, она определяет максимальный размер канала обслуживания в единицу времени. Время ожидания заявки ограничивается длиной очереди  $m = 4$ , опереждаемая размером ОЗУ приемника.

Опишем функционирование системы в двух режимах: 1) мониторинга данных и 2) технологического управления. Закон потока заявок во всех режимах является одинаковым, так как используются одни и те же данные. Но закон обслуживания в двух режимах - разный, так как они имеют разные алгоритмы обработки, описанные в предыдущих главах.

Требуется для заданной СМО определить следующие характеристики: число поступивших заявок; вероятность обслуживания канала; число обслуженных заявок; число заявок в очереди; среднюю длину очереди и среднюю пропускную способность сети.

Режим мониторинга данных. Зададим входные параметры СМО: период – 24 часа (1440 мин). Шаг модели – 1 мин. Закон входного потока с параметрами  $P(\lambda=5)$ , закон обслуживания  $P(\lambda=10)$ . Длина очереди  $m = 4$ . Процесс имитации в среде Matlab показан на рисунке 4.41.

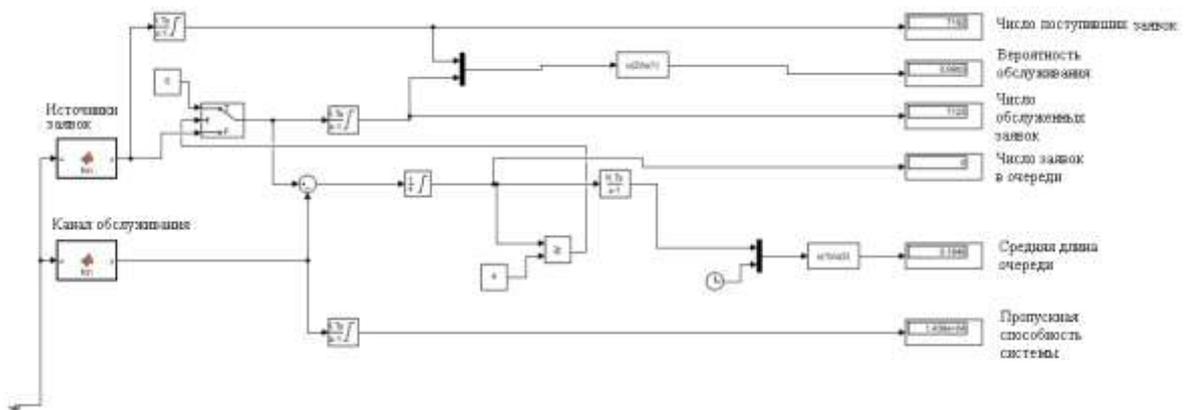


Рисунок 4.41 СМО, моделирующая режим мониторинга данных

Режим технологического управления. Зададим входные параметры СМО: период – 24 часа (1440 мин). Шаг модели – 1 мин. Закон входного потока с параметрами  $P(\lambda=5)$ , закон обслуживания  $Exp(\lambda=10)$ . Длина очереди  $m = 4$ . Процесс имитации в среде Matlab показан на рисунке 4.42

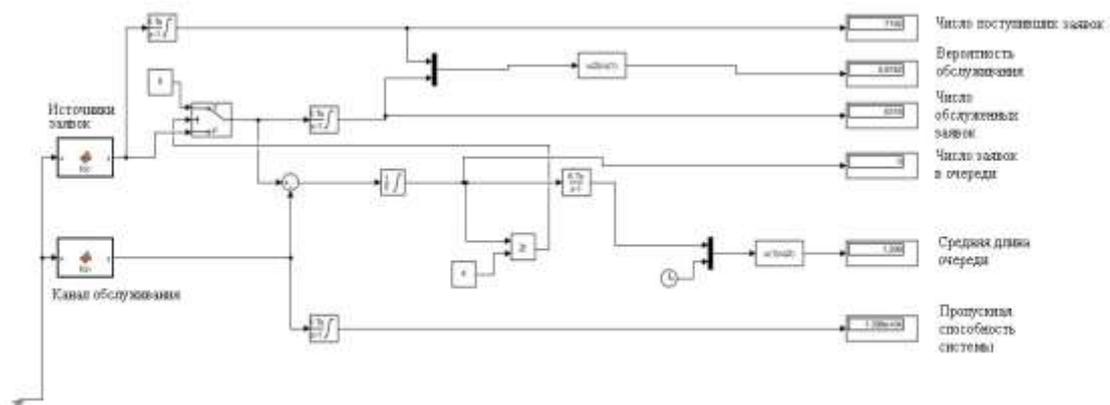


Рисунок 4.42 СМО, моделирующая режим технологического управления

Выполним анализ полученных результатов. Они приведены в таблице 4.11. В режиме мониторинга система работает почти безотказно, с вероятностью обслуживания 0,99, так как в этом режиме Приемник Блока управления только принимает данные и не выполняет обработку информации. Средняя длина очереди составляет 0,18.

В режиме технологического управления система работает с отказами и имеет вероятность обслуживания 0,87. Это объясняется тем, что в этом режиме Приемник выполняет также обработку информации в связи с нечетким управлением. Средняя длина очереди составляет 1,30.

Таблица 4.11 Показатели СМО, определяющие качество функционирования системы

Показатели СМО	Режим мониторинга	Режим управления
число поступивших заявок	7192	7192
вероятность обслуживания канала	0,99	0,87
число обслуженных заявок	7122	6316
число заявок в очереди	0	0
средняя длина очереди	0,18	1,30
пропускная способность сети	1439	1398

Известно, что для нормального функционирования системы показатель ее работоспособности должен быть выше, чем вероятность ее обслуживания. Результаты анализа функционирования системы показывают, что программно-техническая система “Ақылды жылыжай” является работоспособной, так как имеет достаточное быстродействие и функциональность для решения поставленных прикладных задач настоящего исследования.

## Выводы по четвертой главе

Модель “Растение-Среда-Ситуация-Управление” в виде полупромышленной установки (прототипа) “Домашняя смарт теплица” и мобильного приложения “Ақылды жылыжай” была внедрена в теплицы: КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), теплицу МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и теплицу Eco Product Company (Актобе) и проведен их сравнительный анализ.

Выполнен мониторинг и анализ состояний Среды и Растения в период вегетации. Так как эти регионы имеют различные климатические условия, эти условия оказали влияние на урожайность культуры – огурец сорта “Асылым”. Был также проведен сравнительный анализ для указанных трех теплиц.

Определена оценка работоспособности системы в условиях теплицы КазНУ им. аль-Фараби. Показатели работоспособности системы в условиях теплицы КазНУ им. аль-Фараби следующие:

- В режиме мониторинга система работает почти безотказно, с вероятностью обслуживания 0,99 (в этом режиме Приемник УУ только принимает данные и не выполняет обработку информации). Средняя длина очереди составляет 0,18.

- В режиме технологического управления система работает с отказами и имеет вероятность обслуживания 0,87. Это объясняется тем, что в этом режиме Приемник выполняет также обработку информации в связи с нечетким управлением. Средняя длина очереди составляет 1,30.

## 5 ПАТЕНТЫ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ, КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

### 5.1 Мобильное IoT-приложение “Ақылды жылыжай”

#### 5.1.1 Описание системы

Система “Ақылды жылыжай” [108, с. 1] является мобильным IoT приложением и предназначена для мониторинга и автоматического управления технологическим оборудованием и параметрами технологических процессов обогрева/охлаждения, освещения и капельный полива в домашней теплице.

Система позволяет:

- 1) выполнять контроль (мониторинг) процессов микроклимата в режиме Online;
- 2) выполнять нечеткое управление процессов микроклимата в *ручном режиме*;
- 3) выполнять нечеткое управление процессов микроклимата в *автоматическом режиме*.

Функция управления реализована в виде Нечеткого Логического Контроллера (модель Сугено 0 порядка).

Ф у н к ц и о н а л ь н ы е в о з м о ж н о с т и:

- распределенный доступ к приложению из любой точки мира;
- контроль температуры воздуха внутри теплицы;
- контроль влажности воздуха внутри теплицы;
- контроль освещенности внутри теплицы;
- контроль влажности почвы в горшке;
- управление системой охлаждения обогрева/охлаждения (вентилятор ИМ1);
- управление системой освещения (прожектор ИМ2);
- управление системой капельного полива (клапан полива ИМ3);
- оперативное отображение информации о технологическом объекте, протекающих процессах и основных параметрах работы на экране рабочих станции (смартфонов, и др.).

О с н о в н ы е т е х н и ч е с к и е х а р а к т е р и с т и к и

1) С о с т а в о б о р у д о в а н и я и и х п а р а м е т р ы:

1.1 Плата Передатчика

Микроконтроллер

ESP 32 WiFi32 & Bluetooth Battery

Soil Moisture Sensor & DHT,

support Nodumcu / Arduino

Частота Wi-Fi 2412-2484 MHz

Стандарт 802.11 b/g/n

Мощность 12 дБ

Напряжение пит. + 2,3... 3,6 V

Ток потребления до 500 мА

Датчик температуры и влажности воздуха DHT 11:

+3.3..5 V, 2.5 А, -40..125 С, 0..100 %

Датчик влажности почвы

Soil Humidity Sensor:

+3.3..5 V, 35 mA, , 0..100 %

Датчик света

на базе LM 393

3,3..5 V, ток регулируется 0..1000 лк

1.2 Плата Приемника

support Nodumcu / Arduino

Микроконтроллер

ESP 32 WiFi32 & Bluetooth Battery,

Плата реле (4 реле)

SRD -05VDC 30V ~250V 10 A

1.3 Исполнительные механизмы

Вентилятор

Dospel ~220 В, 15 Вт

Прожектор

Led Flood Light Outdoor ~220 В, 30 Вт

Клапан электромагнитный

из стиральной машины ~220 В, 8 Вт

1.4 Система капельного полива

Бак 1 л (1 шт), ПВХ труба диаметр 16 PN, длина 3 м (1 шт), капельницы диаметр 4 мм, длина 80 см, отверстия 0,8-1 мм через каждые 15 см. (8 шт), комплектующие материалы (фитинги, тройники, заглушки).

1.5 Смартфон

Тестирование системы выполнялось с помощью смартфона

Huawei GR3 2017 Gold:

Модель

DIG L21

Количество SIM-карт

2

Операционная система

Android 6.0.

Процессор

Qualcomm Snapdragon

ОЗУ

2 Гб

Память

1,02 Гб

Разрешение

720x1280

Поддержка Wi-Fi

Да

Поддержка GPS

Да

Поддержка Bluetooth

Да

Время процессора

40 сек

Время работы GPS

<1 сек

Время работы WiFi

<1 сек

Выгрузка по мобильной сети

15,91 Кб

Загрузка по мобильной сети

25,34 Кб

Уровень энергопотребления 0,42 мА\*час

## 2) Состав ПО:

Программа передатчика *Device Sensors.ino*  
Программа приемника *Device Controller.ino*  
Параметры настройки программ передатчика и приемника

### Микроконтроллера:

Плата	ESP Dev Module
Upload speed	921600 Mb/sec
CPU Frequency	240 MHz (WiFi/BT)
Flash Frequency	80 MHz
Flash Mode	QIO
Flash Size	4 Mb (32 Mb)
Partition scheme	Default 4 Mb with spiffs (1.2Mb APP/1.5 Mb)
Порт	4 COM
Программатор	AVRISP mkII

## Язык программирования

C++

## Тип реализующей ЭВМ

Смартфоны, айфоны, планшеты.

### 5.1.2 Руководство по использованию программы для ЭВМ “А қ ы л д ы ж ы л ы ж а й”

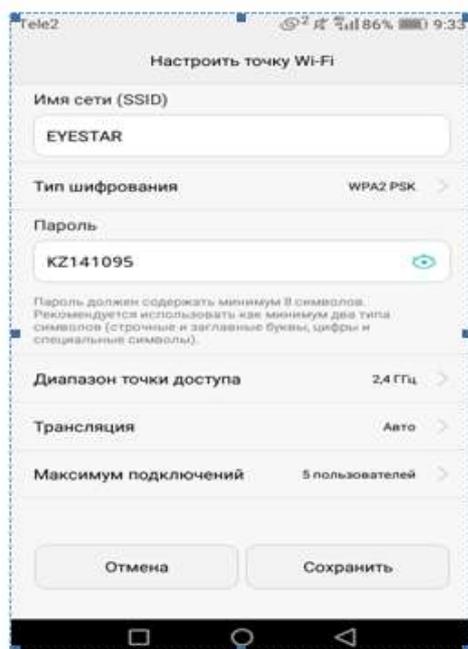
1. Установка приложения Blynk 2.27.6.

2. Настройка сети WiFi (рисунок 5.1а):

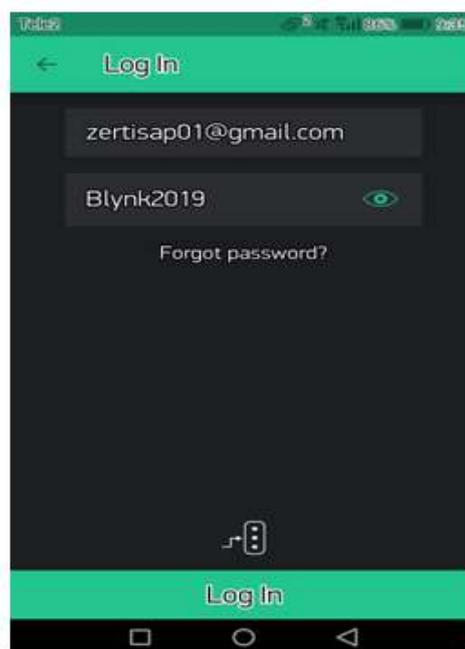
Login	EYESTAR
Password	KZ141095

3. Вход в приложение (рисунок 5.1б):

Login	zertisap01@gmail.com
Password	Blynk2019



а)



б)

Рисунок 5.1 а) Настройка сети WiFi; б) Вход в приложение

4. Открытие доступа рабочим станциям по сети WiFi через QR код (рисунок 5.2):

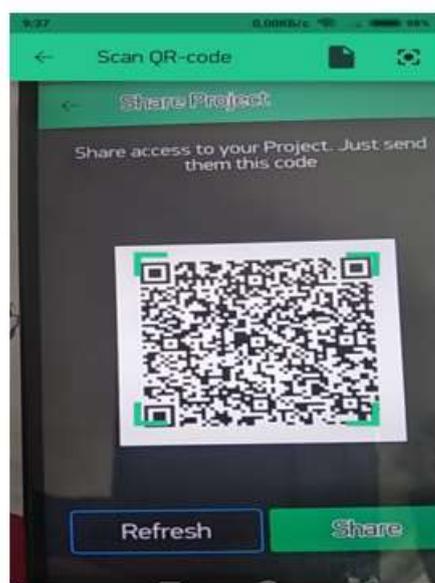


а)

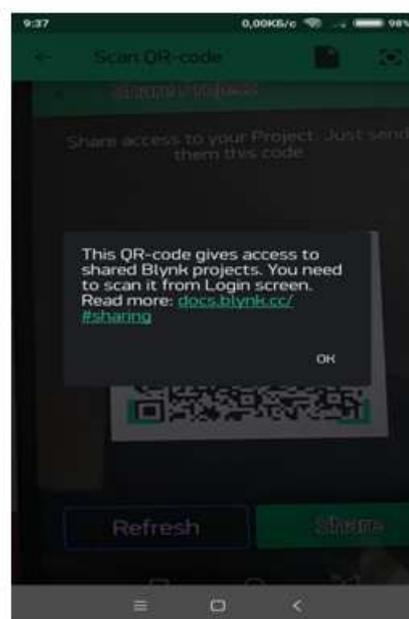


б)

Рисунок 5.2 а) Открытие доступа к сети WiFi; б) Раздача QR кода



а)



б)

Рисунок 5.3 а) Получение доступа к сети WiFi; б) Получение QR кода

5. Режим мониторинга через вкладку 1 БАҚЫЛАУ (рисунок 5.3).  
Выполняется мониторинг процессов: а) температура воздуха, б) влажность воздуха, в) освещенность, г) влажность почвы в горшке.



а)



б)

Рисунок 5.4 а) Запуск приложения (Передатчик и Приемник в работе);  
б) Режим мониторинга: графики и приборы.

6. Режим ручного управления через вкладку 2 БАСҚАРУ - > ҚОЛМЕН БАСҚАРУ (рисунок 5.5).

Задаются параметры ручного управления:

- а) время включения/выключения и доступность вкл/выкл вентилятора ИМ1,
- б) время включения/выключения и доступность вкл/выкл прожектора ИМ2,
- в) время включения/выключения и доступность вкл/выкл клапана полива ИМ3.

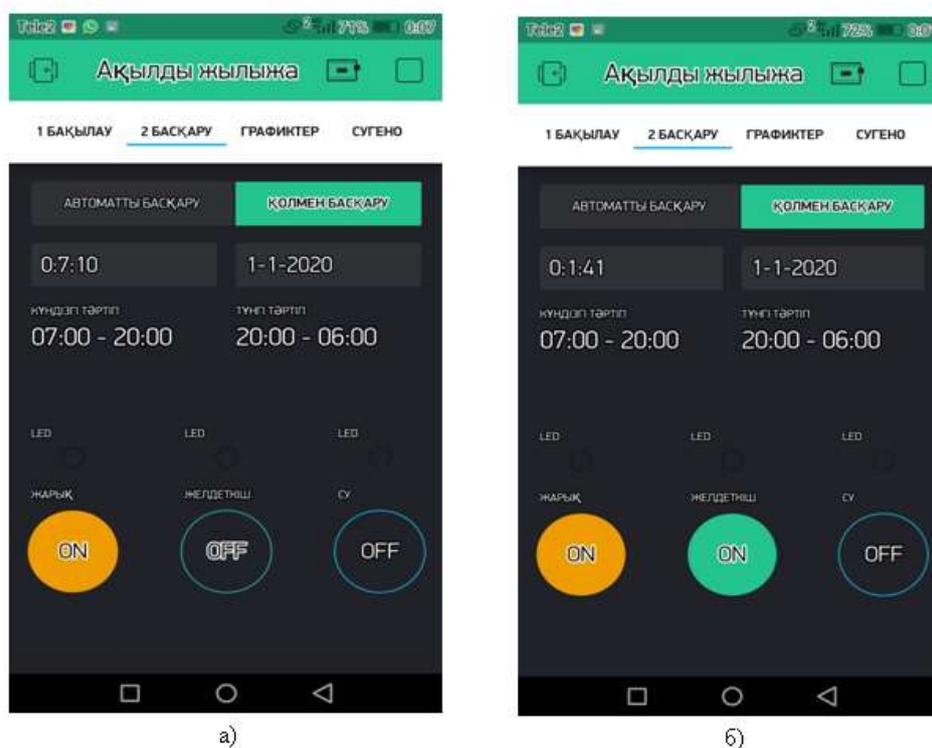


Рисунок 5.5 а) Режим ручного управления: включен Прожектор;  
б) Режим ручного управления: включены Прожектор и Вентилятор

7. Режим автоматического управления выполняется через вкладку СУГЕНО (рисунок 5.6).

Здесь задаются параметры автоматического управления:

- а) параметры температуры воздуха,
- б) параметры влажности воздуха,
- в) параметры освещенности,
- г) параметры влажности почвы в горшке.

Функция автоматического управления реализована в виде Нечеткого Логического Контроллера (модель Сугено 0 порядка).

После задания параметров процесс управления выполняется через вкладку 1 БАҚЫЛАУ.

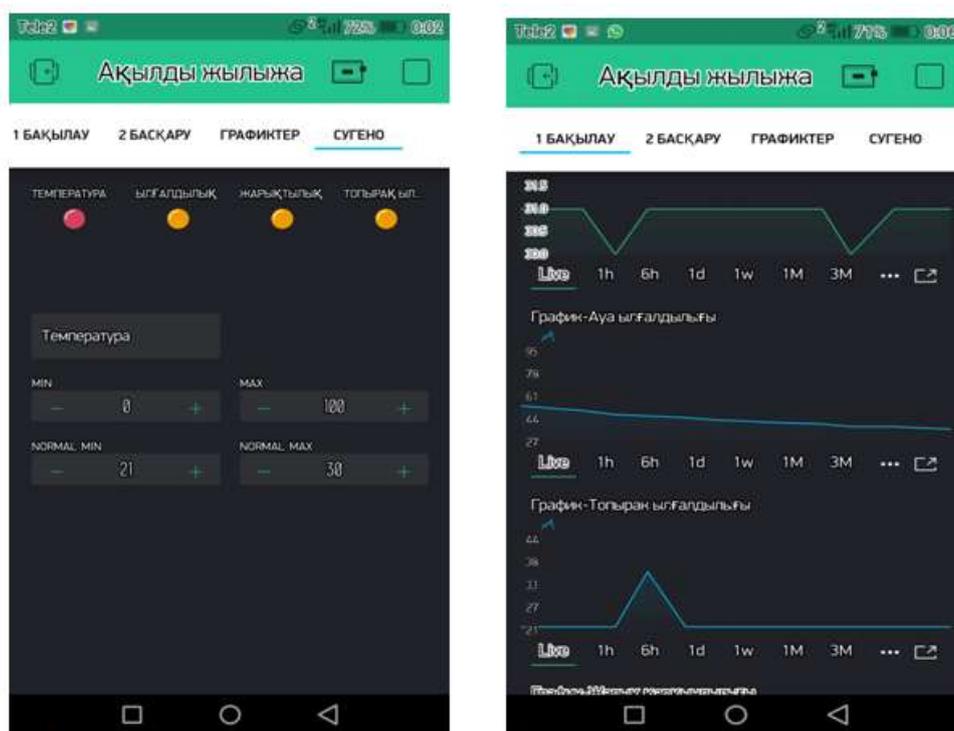


Рисунок 5.6 а) Задание параметров НЛК; б) Online управление НЛК

8. Вывод графиков через вкладку ГРАФИКТЕР (рисунок 5.7а) и домашняя минитеплица в процессе работы (рисунок 5.7б)

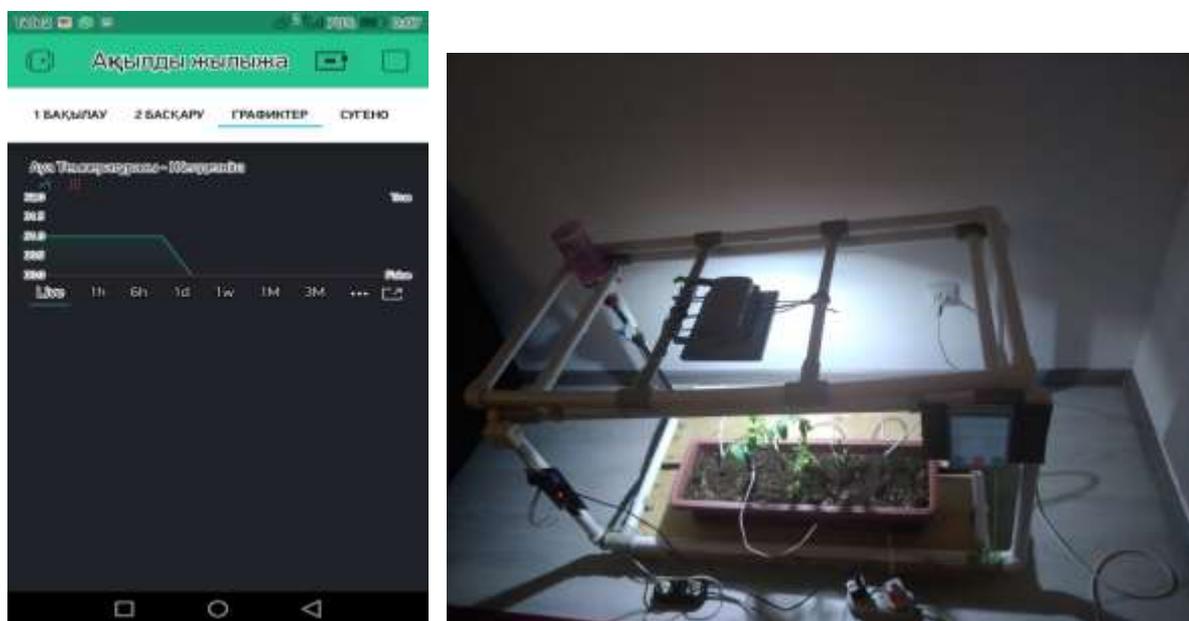


Рисунок 5.7 а) График процесса управления температурой воздуха; б) Домашняя минитеплица и ее управление через мобильное приложение

## 5.3 Полупромышленная установка «Домашняя смарт теплица»

### 5.3.1 Описание полезной модели

Полупромышленная установка «Домашняя смарт-теплица» [108, с. 1] относится к теплицам для домашнего использования и их климатическому оборудованию.

**Известны прототипы** (см. патент на полезную модель KZ №0092.2 от 27.04.2015, бюл №10 2016, см. статью Akkaş M. A., Sokullu R. “An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes” в сборнике Международной конференции International Workshop on IoT, M2M and Healthcare, см. статью Algarín C. R., Cabarcas J. C., Llanos A. P. “Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring” в журнале Electronics, см. статью Belghibayev B. A., Umarov A.A. “Relay Law of Management by a Mini-Hothouse”, в сборнике Международной конференции The 4th International youth conference “Perspectives of science and education”, см. статью Ishak S.N., Abd Malik N.N.N., Abdul Latiff N.M., Effiyana Ghazali N., Baharudin M. A. “Smart home garden irrigation system using Raspberry Pi” в сборнике Международной конференции IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications, см. статью Jomaa M., Abbes M., Tadeo F., Mami A. “Greenhouse Modeling, Validation and Climate Control based on Fuzzy Logic” в журнале Engineering, Technology & Applied Science Research, см. статью Revathi S., Sivakumaran N. “Fuzzy Based Temperature Control of Greenhouse” в сборнике Международной конференции IFAC-PapersOnLine) [108, с. Патент].

Эти аналоги имеют недостатки: в одних аналогах реализуется только функция контроля без функции управления, в других аналогах реализуется по отдельности только один процесс (или охлаждение/обогрев или капельный полив или освещение).

Недостаток некоторых аналогов в том, что их Блок управления реализует релейский закон управления и не имеет возможности адаптации к изменяющимся условиям.

**Технико-экономической задачей** изобретения является разработка домашней смарт теплицы, обеспечивающей автоматическое поддержание микроклимата внутри теплицы и удовлетворяющей критерию Цена-Качество: а) **д о с т у п н о с т и** (затраты на строительство меньше минимальной заработной платы (меньше чем 42500 тг)); б) **п о в ы ш е н и я к а ч е с т в а** управления во-первых, через использование технологической схемы, обеспечивающей одновременное управление тремя технологическими процессами микроклимата теплицы (вентиляция, полив и освещение); во-вторых, через реализацию системы на базе современного микропроцессорного оборудования и смарт технологии.

**Технический результат заключается:**

1) в применении новой технологической схемы оборудования, которая обеспечивает одновременное управление тремя технологическими процессами капельного полива, вентиляции и освещения, и состоит из трех подсистем: первая подсистема – система капельный полив; вторая – система вентиляции;

третья подсистема – система освещения. Система содержит следующие элементы: бак, клапан полива, магистральный трубопровод, капельницы, датчик почвы, вентилятор, датчик температуры, прожектор, датчик света, блок управления, реле клапана полива, реле вентилятора, реле прожектора. Главным элементом системы является Блок управления (Устройства управления, УУ).

2) в использовании современного оборудования на базе платы ESP32 для реализации схемы УУ, что дает возможность использования технологии беспроводных сенсорных сетей и Интернета вещей, обеспечивающих быстрый и распределенный сбор данных, мониторинг процессов и широкий доступ использования;

3) в применении двух вариантов исполнения схемы УУ, реализующий смарт управление в ONLINE режиме через мобильное приложение.

Оба варианта исполнения обеспечивают автоматическое поддержание микроклимата теплицы за счет применения схемы непрямого управления и реализуют две функции: функцию идентификации объекта управления и функцию управления объектом. Преимуществом схемы непрямого управления является то, что она не требует точной математической модели объекта и имеет возможность управления в условиях неопределенностей и нелинейных шумовых искажений.

Вариант первый - схема на базе нейроконтроллера, формирующего управляющее воздействие в соответствии с таблицей 4.1.

Вариант второй – схема на базе нечеткого логического контроллера, формирующее управляющие решения в соответствии с правилами из Базы знаний таблиц 4.2 и 4.3.

**Принцип работы** теплицы подробно описан в четвертой главе.

#### **Конструкция и материалы**

Размеры теплицы 1,5 м x 1,4 м x 0,8 м, ее можно свободно расположить под окном, в нее могут поместиться 2 стандартных горшка размерами 70 см x 60 см x 30 см.

В качестве строительных материалов в теплице использованы доступные и недорогие материалы (пластик, ПВХ, и т.д.), что значительно снижает затраты на строительство.

**Технологическое оборудование и схема подключений** приведены в четвертой главе.

Главным преимуществом НЛК является во-первых, то, что его настройки понятны пользователю, так как они прописываются экспертом в виде правил «если» - «то», во-вторых, правила Базы знаний работают параллельно (при допущении конфликта правил, то другие правила могут разрешить возникший конфликт).

### 5.3.2 Формула полезной модели

1. Домашняя смарт теплица по п. 1, содержащая три контура управления: контур 1 – система капельного полива, контур 2 – система

охлаждения/обогрева, контур 3 – система освещения. Система содержит следующие элементы: бак, клапан полива, магистральный трубопровод, капельницы, датчик почвы, вентилятор, датчик температуры, прожектор, датчик света, блок управления, реле клапана полива, реле вентилятора, реле прожектора. Главным элементом системы является Блок управления.

2. Блок управления домашней смарт теплицы по п. 2, отличающаяся тем, что он реализован на базе платы ESP32 со встроенными Wi-Fi и Bluetooth модулями. Такое решение, дает возможность управления в ONLINE режиме через мобильное приложение с использованием технологии беспроводных сенсорных сетей (WSN) и Интернета вещей (IoT), обеспечивающих быстрый и распределенный сбор данных, мониторинг процессов и широкий доступ к использованию.

3. Блок управления (БУ) домашней смарт теплицы по п. 3, отличается тем, что реализован в двух вариантах исполнения: нейроконтроллер (НК) и нечеткий логический контроллер (НЛК) с применением схемы непрямого управления. Преимуществом применения схемы непрямого управления является то, что она не требует точной математической модели объекта и имеет возможность управления в условиях неопределенности и нелинейных шумовых искажений.

4. Нейроконтроллер (первый вариант БУ) смарт теплицы по п. 3.1, отличается тем, что имеет два регулятора (Регулятор 1 и Регулятор 2). Первый регулятор является основным и выполняет идентификацию объекта управления (режим обучения), второй регулятор является подчиненным и синтезирует закон управления объектом (режим обучения). Процесс обучения происходит в offline режиме на основе данных, собранных в течение 24 часа и хранимых в Базе данных; процесс управления – в online режиме. НК работает на основе эталонной модели объекта и использует алгоритм обратного распространения ошибки. В НК используется нейронная сеть прямого распространения.

5. Нейроконтроллер по п. 3.1, отличающийся тем, что он формирует управляющее воздействие на основе релейского закона в соответствии с таблицей 4.1.

6. Нечеткий логический контроллер (второй вариант БУ) смарт теплицы по п. 3.2, отличается тем, что имеет два регулятора (Регулятор 1 и Регулятор 2). Первый регулятор является основным и выполняет нечеткую идентификацию объекта управления (режим обучения), второй регулятор является подчиненным и синтезирует закон управления объектом (режим обучения). Процесс обучения происходит в offline режиме на основе данных, собранных в течение 24 часа и хранимых в Базе данных; процесс управления – в online режиме. Регулятор 1 реализует модель Мамдани, Регулятор 2 – модель Сугено. Используемая сеть ANFIS с алгоритмом обучения – гибридный двухпроходной алгоритм.

7. Нечеткий логический контроллер смарт теплицы по п. 3.2, отличающийся тем, что формирование управляющего воздействия осуществляется в соответствии с правилами Базы знаний НЛК (таблицы 4.2 и 4.3).

## **Выводы по пятой главе**

В пятой главе даны описание работы ИОТ устройства “Домашняя смарт теплица” и схема внедрения в теплицу КазНУ им аль-Фараби.

Также дано описание работы и руководство к использованию мобильного приложения “Ақылды жылыжай” на базе последнего устройства.

По результатам внедрения системы в исследовательскую теплицу КазНУ им. аль-Фараби, (Алматы), МКТУ им. А.Ясави (Туркестан) и Eco Product Company (Актобе) были выработаны рекомендации по выращиванию овощей в теплице.

## Рекомендаций по выращиванию овощей в теплице

Применение современных ИТ технологий на базе IoT устройств при выращивании гибридных сортов огурцов “Младший лейтенант” и “Асылым” в условиях теплицы КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), теплицы МКТУ им. А.Яссави (Туркестан) и теплицы Eco Product Company (Актобе). Эти теплицы являются весенними пленочными, и обеспечивают получение достаточно ранней продукции высокого качества.

Для теплицы КазНУ им. аль-Фараби, в частности, имеют место правила:

1. Соблюдение рекомендуемых режимов вентиляции, освещения и капельного полива в сочетании с внесением расчетных доз минеральных удобрений обеспечивает получение плодов огурцов до 20-24 плодов/растение в течение вегетационного периода.

2. Для получения указанного урожая следует поддерживать значения параметров дневной и ночной нормы в пределах (таблица 2.1).

3. Для получения раннего урожая необходимо обеспечить значения интегральных показателей теплопериода и светопериода в пределах (таблица 2.2).

4. Моменты наступления фенофаз развития находятся в пределах (таблицы 2.3-2.4).

Были также определены оптимальные условия выращивания огурца гибрида “Асылым” для всех трех регионов:

- для Алматы:  $T_{opt} = 28$  С;  $W_{opt} = 29\%$ ;  $CF = 0,40$ ;  $NDVI = 0,46$ ;
- для Туркестана:  $T_{opt} = 33$ ; С,  $W_{opt} = 11\%$ ;  $CF = 0,05$ ;  $NDVI = 0,30$ ;
- для Актобе:  $T_{opt} = 31$  С;  $W_{opt} = 32\%$ ;  $CF = 0,18$ ;  $NDVI = 0,29$ .

В зависимости от климатических условий изменяется и показатель урожайности СХК. Например, в благоприятном Алматы наблюдается самый высокий урожай среди регионов, но более поздний. При сильной жаре Туркестана (быстрее достигает норма эффективных температур) и получаем более ранний урожай. Резко-континентальный климат Актобе и довольно низкие температуры в начале сезона не позволяют получить хороший урожай.

В теплице Алматы функция роста урожайности – равномерная и охватывает весь вегетационный период, в Туркестане – функция роста имеет резкий рост и резкий спад из-за неблагоприятного климата, в Актобе - резкий рост и медленный спад.

В результате исследования был получен следующий вывод:

а) при оптимальных условиях среды наблюдается процесс нормального, сбалансированного роста и развития растения;

б) при неоптимальных, то есть при недостатке определенных факторов (тепло, воздух, свет, вода) наблюдается неравномерный процесс роста и развития растения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ импорта овощей в Казахстане за последние годы показал низкую обеспеченность населения ранними овощами в межсезонный период (20%) и слабую техническую оснащенность теплиц. В связи с этим, разработка и внедрение отечественных смарт теплиц на базе беспроводных сетей и IoT, посезонно или круглогодично обеспечивающих население овощами и фруктами, и удовлетворяющей критерию Цена – качество является актуальной проблемой агропромышленного комплекса РК.

В ходе проведенных исследований были решены все поставленные задачи диссертационного исследования и получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель системы “Растение-Среда-Ситуация-Управление” системы, состоящая из трех блоков: Растение (модель объекта), Среда (модель возмущения), Ситуация-Управление (модель регулятора в виде НЛК).

2. Предложена структура экспертной системы для ситуационного интеллектуального управления теплицей. Она включает базы знаний: AQILDI\_JILJAY, AQILDI\_PLANT, FIS\_CONTROL\_REAL\_TIME, FIS\_CONTROL\_OFFLINE.

Предложенная структура ЭС позволяет решить следующие задачи:

Задача 1 - идентификация текущей ситуации в суточном масштабе времени;

Задача 2 - идентификация интегральной ситуации объекта управления в биологическом масштабе времени;

Задача 3 - определение моментов перехода из одной фазы в другую;

Задача 4 - ситуационное управление технологическими режимами;

Задача 5 - ситуационное управление агротехническими мероприятиями теплицы.

3. Разработаны алгоритмы интеллектуальной поддержки решений вышеизложенных пяти задач.

4. Разработана технологическая схема устройства и макет домашней теплицы, представляющий собой физическую модель теплицы. Теплица содержит три контура управления: контур 1 – система капельного полива, контур 2 – система охлаждения, контур 3 – система освещения. В состав оборудования теплицы входят: бак, клапан полива, магистральный трубопровод, капельницы, датчик почвы, вентилятор, датчик температуры, прожектор, датчик света, блок управления, реле клапана полива, реле вентилятора, реле прожектора. Главным элементом системы является Блок управления (Устройство управления, УУ).

Практическая значимость настоящей работы заключается в применении новой технологической схемы оборудования, обеспечивающей мониторинг и нечеткое управление технологическими процессами управления ростом и развития растения в теплице на базе интеллектуальных технологии и IoT-устройств.

5. Разработана функциональная схема ИОТ-устройства, позволяющая выполнять поставленные требования к системе. Схема включает основные блоки: а) Объект управления, в центре которого расположено Растение; б) Информационно-измерительную систему; в) Исполнительные механизмы; г) Устройство управления (УУ). Системой управляет УУ, которое вырабатывает управляющее воздействие на основе правил эксперта, на основе текущей входной информации, полученных с датчиков среды и отправляет соответствующему исполнительному механизму. Обмен данными также происходит через УУ, которое посылает данные на Облачное хранилище данных. Данные из облачного хранилища для машинной обработки поступают на скрипт матлаб, после обработки обратно поступают к УУ через Облачное хранилище. Данные мониторинга сохраняются в хранилище всего вегетационного периода.

Архитектура системы имеет три уровня: 1-ый уровень – уровень приложений. На этом уровне выполняются операции по управлению объектом и отображению отчетов с помощью средств интерфейса (кнопок управления, графиков и гистограмм). 2-й уровень – уровень обработки и передачи данных. На этом уровне реализуются операции обмена данными между устройствами. Используются микроконтроллеры ESP32 с встроенными Wi-Fi и Bluetooth модулями. Первый модуль ESP32 (1) играет роль передатчика – получает сигнал с датчиков объекта управления и передает сигнал второму модулю ESP32 (2), который играет роль приемника. Модули ESP32 (1) и ESP32 (2) совместно выполняют двухсторонний обмен данными, обеспечивая операции измерения и управления, взаимодействуя с третьим уровнем. 3-й уровень – это уровень объекта. В теплице расположены датчики окружающей среды теплицы.

6. Разработана полупромышленная установка (прототип) “Домашняя смарт теплица” в виде ИОТ устройства. В конфигурацию системы входят: TP Link N300 Wi-Fi router TL-WR841N (центральный модем), Samsung SM - T239 (мобильный телефон), ESP32 WiFi&Bluetooth CP2104 DHT11 Soil (Микроконтроллер + Передатчик), ESP 32 WiFi + Bluetooth + battery (Микроконтроллер + Приемник).

В состав ПО входят: интегрированная среда программирования МК Arduino IDE, среда разработки мобильных приложений Blynk, среда инженерных вычислений Matlab с встроенными пакетами Fuzzy Logic Toolbox и Mashing Learning Toolbox; интегрированный IoT сервис ThingSpeak. Среда Blynk также является облачным хранилищем, где данные могут храниться в течение всего периода вегетации и будут доступны для машинной обработки системы.

7. Разработано мобильное приложение “Ақылды жылыжай”, позволяющее реализовать функции мониторинга и нечеткого управления через ИОТ устройство “Домашняя смарт теплица”. Она реализует регулирование трех ТП как вентиляция, освещение и капельный полив.

Функциональные возможности системы:

- распределенный доступ к приложению из любой точки мира;
- контроль температуры воздуха внутри теплицы;
- контроль влажности воздуха внутри теплицы;

- контроль освещенности внутри теплицы;
- контроль влажности почвы в горшке;
- управление системой вентиляции (вентилятор ИМ1);
- управление системой освещения (прожектор ИМ2);
- управление системой капельного полива (клапан полива ИМ3);
- оперативное отображение информации о технологическом объекте, протекающих процессах и основных параметрах работы на экране рабочих станции (смартфонов, и др.).

Разработанное ИОТ-устройство и мобильное приложение было внедрено и апробировано в теплицы: КазНУ им. аль-Фараби (Алматы), МКТУ им. А.Яссави (Туркестан), Eco Product Company (Актобе), что подтверждается соответствующими актами внедрения. Также по результатам внедрения системы были выработаны рекомендации по выращиванию овощей для указанных теплиц.

Сравнительный анализ трех теплиц показал, что средняя и потенциальная урожайность выше в Алматы (1,80 и 3,37 кг/м<sup>2</sup>), ниже в Актобе (0,79 и 1,45 кг/м<sup>2</sup>). Следует подчеркнуть, что начальные моменты вегетации и их продолжительность различные для регионов: самый ранний урожай можно собрать в Туркестане (через 34 дней), в Актобе (через 39 дней) – в Алматы (через 41 дней). В теплице Алматы функция роста урожайности – равномерная и охватывает весь вегетационный период, в Туркестане – функция роста имеет резкий рост и резкий спад из-за неблагоприятного климата, в Актобе - резкий рост и медленный спад.

По рассчитанным оценкам можно сделать вывод о работоспособности системы в реальных условиях теплиц, обеспечивающий бесперебойную работу системы в течение заданного периода.

Также для повышения качества оценки состояния планируется в будущем применить компьютерное зрение растений в двух вариантах: первый вариант - сегментация отдельных растений и оценка (распознавание) и второй вариант - без сегментации для группы растений. Этот способ поможет полностью автоматизировать процесс оценки состояния растений и тем самым повысить точность оценки.

Дальнейшее направление настоящего исследования видится во внедрении и коммерциализации разработанного устройства для различных СХК в масштабе Казахстана и России.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Послание Президента Республики Казахстан Н. Назарбаева народу Казахстана 10 января 2018 г. «Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции».
2. Программа по развитию агропромышленного комплекса в Республике Казахстан на 2010-2014 годы. Постановление Правительства Республики Казахстан от 12.10.2010 года №1052.
3. Государственная программа по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010-2014 годы.
4. Касымбаев Б.М. Исследование и разработка полифункциональной гелиосушки-теплицы для производства плодоовощной продукции: Дис. на соискание степени доктора PhD – Алматы, Казахский национальный аграрный университет, 2016. - 173 с.
5. Ассоциация теплиц Казахстана <http://greenhouses.kz>
6. Умаров А.А. Ауылдың рухани жаңғыруы: шағын жылыжайлар // Қазақ үні. Республикалық қоғамдық саяси газеті 2018, июль. <https://qazaquni.kz/2018/07/17/87636.html>.
7. Обзор рынка овощей РК май 2017.
8. Нурмаганбетов К.Р., Нурмаганбетов К.К. Основные приоритеты развития агропромышленного комплекса Казахстана // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. - Астана. 2011. – № 2(73). – 26 с.
9. Вилесов Е.Н., Науменко А.А., Веселова Л.К., Аубекеров Б.Ж. Физическая география Казахстана: учебное пособие. - Алматы: Қазақ университеті, 2009. - 362 с.
10. Справочник по климату СССР. Вып 18. Казахская ССР. Часть 1. Солнечная радиация. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966.
11. Справочник по климату СССР. Вып 18. Казахская ССР. Часть 2. Температура воздуха и почвы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966.
12. Справочник по климату СССР. Вып 18. Казахская ССР. Часть 3. Ветер. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966.
13. Справочник по климату СССР. Вып 18. Казахская ССР. Часть 4. Влажность воздуха, осадки и снежный покров. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966.
14. Справочник по климату СССР. Вып 18. Казахская ССР. Часть 5. Облачность и атмосферные явления. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966.
15. Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А.. Агроклиматология: учебное пособие для студентов гидрометеорологических специальностей вузов. – Ленинградский гидрометеорологический институт, 1973. – 342 с.
16. Серякова Л.П. Метеорологические условия и растения: учебное пособие по агрометеорологии /– Ленинградский гидрометеорологический институт, 1971. – 77 с.
17. Березина Н.А., Афанасьева Н.Б. Экология растений: учеб. пособие для высш. учеб. заведений / – М.: Изд. Центр “Академия”, 2009. – 400 с.

18. Соколов Л.В. Климат в жизни растений и животных. – СПб., изд-во «ТЕССА», 2010. – 344 с.: ил.
19. Тараканов Г. И., и др. Овощеводство: учебник для высш. учеб. заведений / Под ред. Г. И. Тараканова и В. Д. Мухина. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Колос, 2003. - 472 с.: ил.
20. Скорина В.В. Овощеводство защищенного грунта: Учеб. пособие. / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. Горки, 2016. – 265 с.
21. Медведев С.С. Физиология растений: учебник. – СПб.: БХВ – Петербург, 2012. – 512 с. ил.
22. Плотникова И.В., и др. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие для высш. учеб. заведений. – М.: Изд. центр “Академия”, 2001. – 144 с.
23. Зайцев Г.Н. Оптимум и норма в интродукции растений - М.: Наука, 1983. – 275 с.: ил.
24. Шевелуха С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. - 2-е изд. доп. - М.: Колос. 1980. - 455 с.
25. Щепетков Н.Г., Ысқақов М.А. Жеміс-жидек шаруашылығы: ЖОО студенттеріне арналған оқулық. – Алматы: Дәуір, 2011 – 536 б.
26. Петрова И. Ю., Карпенко А. В. Модели управления микроклиматом в помещении // Фундаментальные исследования. 2016 № 7-2. С. 224–229.
27. Aparicio P., et al. Control of HVAC system comfort by sampling // Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (ICIEOM 2012). Portugal, Guimarães, July 9–11. – 2012. – P. 10.
28. Ahmad M.W., Mourshed M., Yuce B., Rezgui Y. Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review, BUILD SIMUL (2016) 9: P. 359–398, DOI 10.1007/s12273016-0285-4.
29. Бельгибаев Б.А., Умаров А.А., Никулин В.В. Жылыжайдағы микроклимат параметрлерін бақылау және басқару жүйелерінің модельдері: қазіргі күйіне шолу және даму бағыттарын талдау // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» - Уральск: КазИИТУ, 2018 — 384- 397 с.
30. Kramer R., J. van Schijndel, Schellen H. Simplified thermal and hygric building models: A literature review. Frontiers of Architectural Research. – 2012. – № 1(4). – P. 318–325.
31. Zh.Kh. Zhunussova, S.Sh. Iksanov, A.A. Umarov. Smart Campuses: A review of the current state and analysis of the directions of development // Abstracts of the International Conference "Mathematical, Physical Sciences and Engineering Applications", March 9-12, 2018, Davao, Philippine.
32. Умаров А.А., Сарман Е.Б. Исследование температурного режима минитеплицы для условий Казахстана // Вестник Национальной инженерной академии наук Республики Казахстан. - Алматы. 2018. – № 2(68).
33. Luikov A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary porous bodies // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – №18. – P.1–14.
34. Задеев А.Н. Расчет теплового режима теплицы // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2013, №4. - С. 34-38.

35. Perera D.W.U., Pfeiffer C. F., Skeie N.-O. Control of temperature and energy consumption in buildings – A review // *International journal of Energy and Environment*. – 2014. – Vol. 5, Issue 4. – P. 471–484.
36. Rabadi N. J. Developing a Software to Predict Thermal Comfort of Humans at Work // *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. – 2011. – Vol. 5. – № 4. – P. 359–368.
37. Kishore S. P. Yashwanth, V. Suresh Kumar. Real time thermal comfort sensing using a computer aided module // *IJARECE*. – February 2016. – Vol. 5. issue2. – P. 412–415.
38. Ferreira A.P., Mose D., Jae C. Oh Thermal Faults Modeling using a RC model with an Application to Web Farms // *19th Euromicro Conference on Real-Time system (ECRTS'07)*. – 2007. – P. 113–124.
39. Donaisky E., Oliveira G.H.C. and Mendes N., Realtime implementation of PID-based thermal comfort control algorithms, *Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2007) November 5–9, 2007, Brasilia, DF*, (<http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2007/pdf/COBEM2007-2052.pdf>).
40. Құлмамұров С.А., Белгібаев Б.А., Умаров А.А. ПИД-реттеудің тәжірибелік үлгілері: оқу құралы. – Астана, Гумилев атындағы ЕҰУ, 2019. – 164 б.
41. В. А. Belghibayev, А.А. Umarov. Relay Law of Management by a Mini-Hothouse // *The 4th International youth conference “Perspectives of science and education”*, New York: Premier Publishing, USA (2018). 41-47.
42. Иксанов С.Ш., А.А. Умаров, В.В. Никулин. БЛК негізінде жасалған ЕИМ контроллерінің моделі // *ҚР Ұлттық инженерлік ғылым академиясының хабаршысы*. Алматы. 2019. – № 2(72), 35-42 с.
43. Revathi S., Sivakumaran N., Fuzzy Based Temperature Control of Greenhouse // *IFAC Papers OnLine* 49 (1) (2016): 549-554.
44. Rafiuddin Syam, Wahyu H. Piarah and Budi Jaelani, Controlling Smart Green House Using Fuzzy Logic Method // *International Journal on Smart Material and Mechatronics* Vol. 2 No. 2 (2015).
45. Algarín C. R., Cabarcas J. C., Llanos A. P. Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring // *Electronics* (2017), 6, 71-82.
46. Jomaа M., Abbes M., Tadeo F., Mami A. Greenhouse Modeling, Validation and Climate Control based on Fuzzy Logic // *Engineering, Technology & Applied Science Research* (2019), 9, 4405-4410.
47. Бельгибаев Б.А., Никулин В.В., Умаров А.А. Проектирование смарт теплицы, удовлетворяющей критерию цена – качество // *Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика* №1 (105), 2020.
48. Кузнецов Д.И., Купин А.И. Информационная система интеллектуального регулирования микроклимата жилых помещений // *Проблемы физики, математики и техники (Информатика)* №2 (27), 2016. - 84-89 с.
49. Collotta M., Messineo A., Nicolosi G. and Pau G. A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort by Using Neural Network Forecasted

Parameters as the Input // Energies. – 2014. – № 7. – P. 4727–4756; doi:10.3390/en7084727.

50. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse // Energies 2017, 10, 722.

51. Wang Z., Butner J.D., Kerketta R., Cristini V., Deisboeck T. S. Simulating cancer growth with multiscale agent-based modeling // Semin Cancer Biol. — 2014. — pii: S1044-579X(14)00049-2.

52. Nabil Nassif, Stanislaw Kaji, Robert Sabourin. Optimization of HVAC Control System Strategy Using Two-Objective Genetic Algorithm // International Journal of HVAC&R Research. – July 2005. – Vol. 11. – № 3. – P. 459–486.

53. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. - Л., Гидрометеоиздат, 1991. - 312 с.

54. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур.- СПб.: Изд. С.-Петербург. ун-та, 2006. - 396 с.

55. J.H.M. Thornley Mathematical models in plant physiology: Academic press. 1976.

56. R.Rosen Optimality principles in biology. – London, 1967.

57. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. - М.: Гидрометеоиздат, 1981. - 166 с.

58. Шевелуха В.С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе. М., 1992.

59. Михайленко И.М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная Биология. - 2007, №1. - С. 103-111.

60. Лысенко С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах // Исследование земли из космоса, 2019, № 4. - С. 48–59.

61. Савосин С.И. Интеллектуальная система контроля влажности и температуры воздуха в теплице: автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: РГАЗУ, 2009. - 25 с.

62. Войнова Н.Ф. Методы и системы адаптивного управления температурным режимом теплиц: автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: РГАЗУ, 2007. - 22 с.

63. Practice "Neuro-Fuzzy Logic Systems" are based on Heikki Koivo "Neuro Computing. Matlab Toolbox GUI" .

65. Никульчев Е.В. Практикум по теории управления в среде MATLAB: Учебное пособие. – М.: МГАПИ, 2002. – 88 с.; ил.

66. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

67. O.Castillo, P.Melin. Type 2 Fuzzy logic: Theory and Applications / Studies in fuzziness and soft computing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. Vol 223, 237 p.

68. Ross, Timothy J. Fuzzy logic with engineering applications / Timothy J. Ross. – 3rd ed. - 607 p.
69. Штовба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB // Математика в приложениях, 2003. - №2 (2).
70. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. –М.: Гор линия–Телеком, 2007. – 288 с., ил.
71. Мелешин И. Анализ данных и машинное обучение в MATLAB - The Mathworks Inc, 2014. - 60 с.
72. ҚР ҚНЖЕ 3.02-33-2014 «Жылу, желдету, кондиционер жүйелері». – Астана, 2014.
73. СН РК 3.02-33-2014. Теплицы и парники. - Алматы: «КазНИИСА», 2014. 121с.
74. «Умное фермерство»: Обзор ведущих производителей и технологий / Геолайн технологии, <https://geoline-tech.com/smartfarm/#>, 2018.
75. D. Klapwijk. Kasklimaat plantengroei en groeibeheersing onder glas. – Amsterdam: Agon Elsevier, 1971. – 128 p. (Климат теплиц и управление ростом растений / пер. с голландского).
76. Умаров А.А., Иксанов С.Ш. Микроклимат жүйелерін жобалау ерекшеліктері // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» - Уральск: КазИИТУ, 2018, С. 397- 405.
77. Бельгибаев Б.А., Никулин В.В., Умаров А.А. Проектирование смарт теплицы, удовлетворяющей критерию цена – качество. // Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика, N.1(105), 2020.
78. Uwe Schuch, Dennis Danneh, Microclimate control in greenhouses based on phytomonitoring data // Humboldt University of Berlin, Biosystem Engineering division (2013).
79. Фитомониторинг: технология управление урожайностью. <http://agropraktik.ru/rss/comments/65/>
80. Михалейнко И.М. Управление системами точного земледелия. – СПб.: Изд. С.-Петербур. ун-та, 2005. – 234 с.
81. Михайленко И. М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. - СПб.: СпбГТУ, 2017. 250 с.
82. Якушев В.П. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции: автореферат на соискание уч.степ.доктора с-х наук. – СПб.: Изд. С.-Петербур. ун-та, 2013. – 52 с.
83. Ishak S.N., Abd Malik N.N., Abdul Latiff N.M., and cet. Smart Home Garden Irrigation System Using Raspberry Pi // 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 28-30 Nov. 2017, The Puteri Pacific, Johor Bahru, Malaysia.
84. Рыбалев, А.Н. Программируемые логические контроллеры и аппаратура управления: лабораторный практикум: учеб. пособие/ А. Н. Рыбалев. -

Благовещенск: Изд-во Амур. Гос. Ун-та, 2010 - Ч. 2 : Siemens S7 - 200. - 2010. - 99 с.

85. Greenhouse control with Simatic S7-1200. Entry ID: 109757060, V1.0, 05/2018. <http://www.support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/109757060>

86.

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).

87. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino. – СПб., 2012.– 256 с.

88. Петин В. Проекты с использованием контроллера Arduino. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 400 с.: ил. — (Электроника).

89. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации // Пер. с англ. М.: Техносфера, 2011. – 904 с.

90. Noah Gift. Pragmatic AI: An introduction to Cloud-Based Mashine Learning. - Boston, 2015. - 304 p.

91. Mustafa Alper Akkas, Radosveta Sokullu. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micasz motes // Procedia Computer Science 113 (2017). - pp. 603-608.

92. Эрнст Зальцер. Гидропоника для любителей // Пер. с нем., Кеппинген, 1965. - 158 с.: ил.

93. Алиев Э.А. Выращивание овощей в гидропонных теплицах. – 2-е изд., доп. и перераб. – К.: Урожай, 1985. – 160 с.: ил.

94. Пospelов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. - М.: Наука. - Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. - 286 с.

95. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. - 584 с.

96. Умаров А.А., Гриф М. Г., Бельгибаев Б.А. Разработка “умной теплицы” на основе модели “Растение-Среда-Ситуация-Управление” // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3(98 ). – С. 49-64.

97. Amantur Umarov, Baurzhan Belgibaev, Mikhail Grif, Madina Mansurova, Serik Kulmamirov. Smart greenhouse and plant growth control // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. Vol. 9, No. 3, July 2021, pp. 474-493.

98. Умаров А., Бельгибаев Б., Гриф М. Ситуационная экспертная система “Ақылды жылыжай” // Материалы межд. научной конференции в области информационных технологий, посвященной 75-летию профессора У.А. Тукеева. - Алматы: Қазақ университеті, 2021. – 109-115 с.

99. Гриф М.Г. Гибридная экспертная система проектирования человеко-машинных систем и принятия решений ИНТЕЛЛЕКТ-3: уч. пособие - НГТУ, 2007. – 160 с.

100. Grif, M.G., Kochetov, S.A., Ganelina, N.D. Sequential analysis of variants and optimal design techniques for human-machine systems // Journal of Physics: Conference Series, 2019.

101. Бычков А.Г. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и методам оптимизации. - М., 2008. – 224 с.: илл.

102. Руцкая Т. Огород и сад для лентяев – М.: Издательство АСТ, 2016. – 288 с. – (Подворье для фермеров).

103. Amantur Umarov, Murat Kunelbayev, Maxatbek Satymbekov, Gulzat Turken, Bagila Alimbayeva, Kulbarchin Imanzhanova, Laura Duisembayeva. Microclimate Monitoring System for a Home Greenhouse as Part of ESP32 // 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technologies (ICETEST-2020), Bangkok, Thailand 26th – 27th February' 2020.

104. Алгазинов Э.К., Сирота А.А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Под ред. А.А. Сироты. – М.: Диалог-МИФИ, 2009. – 416 с.

105. Лазарев В.Л. Робастное управление в биотехнологической промышленности: учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 196 с.

106. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. – Самара, 2009. – 136 с.

107. Патент на полезную модель «Домашняя смарт-теплица» / Бельгибаев Б.А., А.А. Умаров А.А. - Рег. №2019/1162.2 от 30.12.2019.

108. Авторское свидетельство “Ақылды жылыжай” / Умаров А. А., Бельгибаев Б.А., Мансурова М. Е., Әріпхан Ж.Н. - № 7578 от 17.01.2020.

## Приложение А – Справка о прохождении научной стажировки

20 1362



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

К. Маркса пр., 20, г. Новосибирск, 630073  
Телетайп: 133432KADR.RU  
Телефон: (383) 346-50-01, факс: (383) 346-02-09,  
E-mail: rectori@nstu.ru,  
http://www.nstu.ru  
ОКПО 02068953, ОГРН 1025401485010  
ИНН/КПП 5404105174/540401001

от 18 МАЯ 2020

№ 4035/МС

Ректору  
Казахского национального  
университета им. Аль-Фараби

д.т.н., проф. Мутанову Г.М.

Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71  
индекс 050040  
эл. почта: info@kaznu.kz  
факс 8 (727) 377 33 44

Настоящим подтверждаем, что гражданин Республики Казахстан Умаров Амантур Амангенльдыевич, 30.03.1977 года рождения, паспорт N11601218 (период действия 16.02.2018 – 15.02.2028 г.), в соответствии с утвержденной программой, успешно прошел стажировку с 01 марта по 30 мая 2020 г. в объеме 100 часов (30 аудиторных часов и 70 часов самостоятельной работы) на кафедре автоматизированных систем управления факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) под руководством доктора технических наук профессора кафедры автоматизированных систем управления Грифа Михаила Геннадьевича.

Стажер Умаров Амантур Амангенльдыевич ознакомился с библиотечным фондом университета и Государственной публичной научно-технической библиотеки Сибирского отделения Российской академии наук (ГПНТБ СО РАН), собрал и проанализировал необходимый для диссертации материал, участвовал в семинарах и конференциях, участвовал в экспериментальной части НИР, подготовил и защитил отчет о проделанной работе.

Программа стажировки стажером выполнена полностью.

Проректор по международным связям



В.В. Некрасов

Е.П.Алышевская, 7-383-3460511

## Приложение Б – Авторское свидетельство

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚАРДЫҢ  
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ  
ҚУӘЛІК

2020 жылғы «17» қаңтар № 7578

Автордың (лардың) жөні, аты, әжесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):  
**УМАРОВ АМАНГУР АМАНГЕЛЬДЫЕВИЧ, БЕЛЫНБАЕВ БАУРЖАН АБДРАХИМОВИЧ,  
МАЙСУРОВА МАДІНА ЕСІМХАНОВНА, ӘРІПХАН ЖАСУЛАН НУРТАНУЛЫ**

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: Ақылды жылыжай

Объектіні жасаған күні: 03.01.2020



Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық қатынастар министрлігінің  
"Авторлық құқық" бөлімінің интернет-бөлімі: <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [copyright.kz](https://copyright.kz)  
и разделе «Авторские права» сайта [copyright.kazpatent.kz](https://copyright.kazpatent.kz)

Подписано ЭЦП

Оспанов Е. К.

## Приложение В – Патент на полезную модель



### ВЫПИСКА ИЗ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕЕСТРА ПОЛЕЗНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

РГП "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ"  
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Статус: Действует

(11) № охранного документа	4897
(12)	Патент на Полезную Модель
(21) Номер заявки	2019/1162.2
(22) Дата подачи заявки	30.12.2019
(51) МПК	A01G 9/24
(54) Название	Домашняя смарт-теплица
(73) Патентообладатель	Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Казакский национальный университет имени аль-Фараби» Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)
(72) Автор(-ы)	Бельгибаев Бауржан Абдрахимович Belgbayev Baurzhan Abdrakhimovich(KZ); Умаров Амантур Амангельдыевич Umarov Amanur Amangeldyevich(KZ)
(45) Номер и дата бюллетеня	№ 18 - 06.05.2020
Срок действия	06.01.2021

Дата формирования выписки: 18.12.2020



## Приложение Г – Акты и справки внедрения

### СПРАВКА

#### о внедрении результатов

PhD докторской диссертационной работы  
Умарова Амантура Амангельдыевича

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Умарова А. А. “Разработка ситуационной интеллектуальной системы управления минитеплицей на базе IoT устройств”, включающий методы, алгоритмы и программно-технический комплекс, прошли апробацию в теплице Smart Greenhouse Казну им. аль-Фараби в виде AIoT – устройства “Ақылды жылдыжай” и внедрены в эксплуатацию.

Приняты к внедрению следующие разработки Умарова А.А.:

1. Разработанная автором модель экосистемы “Растение-Среда-Ситуация-Управление”, с рациональным использованием функции подготовки данных (ЭВМ) и функции принятия решения (Человек). Модель позволяет описывать текущую ситуацию, и, в зависимости от ситуации выбирать приемлемое техническое решение для ЛПП.

2. Разработанная автором структура общей экспертной системы для ситуационного управления теплицей, позволяющей реализовать последнюю модель с помощью нечеткой экспертной системы;

3. Разработанный алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений на базе НЛК, позволяющий решать задачу идентификации состояния окружающей среды в суточном и биологическом масштабе времени и задачу нечеткого управления на основе целевого критерия;

4. Разработанный автором макет минитеплицы и ее технологическая схема, включающий минимальный комплект оборудования для автоматизации выращивания растений в домашних условиях и доступный для широкого населения.

5. Разработанное IoT устройство, позволяющее выполнять контроль и смарт управление процессами микроклимата в online и offline режимах через мобильное приложение.

Считаю актуальным и необходимым внедрение разработанной системы для повышения продуктивности процесса выращивания растений в теплице.

Коммерческая и инновационная привлекательность предлагаемого IoT устройства для интеллектуального управления минитеплицей заключается в ее энергоэффективности, доступности малообеспеченным слоям населения, автоматизации процесса получения готовой овощной продукции в маловодных регионах страны.

Предполагаемая экономическая эффективность от внедрения системы 25-30%.

Директор научно – технологического парка  
КазНУ им. аль-Фараби

Темирбаев А.

Заведующая кафедрой биоразнообразия  
и биоресурсов КазНУ им. аль-Фараби,  
д.б.н., профессор



Курманбаева М.

УТВЕРЖДАЮ



Визе-президент по научно-исследовательской  
работе МКТУ имени Ясави, профессор  
10 2020 г.  
К.М.Беркимбаев

Акт внедрения мобильного приложения "Ақылды жылыжай" и

Устройства "Домашняя смарт теплица"

Мы, ниже подписавшиеся, автор разработки А. Умаров с одной стороны, и Директор департамента коммерциализации науки Е. Керимбеков, декан факультета инженерии Н. Сапарходжаев, Заведующий кафедрой "Электронинженерии" Б.Куатбеков, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты работы диссертационной работы старшего преподавателя Умарова Амантура Амангельдыевича имеют теоретическое и практическое значение для оптимизации технологических процессов выращивания овощей.

Результаты разработки внедрены в технологический процесс теплицы университета, были использованы в научных конференциях и на основании научных исследований опубликованы научные статьи.

Основные результаты работы:

1. Мобильное приложение "Ақылды жылыжай"
2. Устройство управления "Домашняя смарт теплица"

Наименование объекта и предмет внедрения: теплица МКТУ имени А. Ясави, мониторинг технологических процессов в теплице.

Эффект от внедрения (использования) результатов разработки: внедрение и использование аппаратно-программного комплекса, включающего в себя мобильное приложение "Ақылды жылыжай" и устройство управления "Домашняя смарт теплица" в теплице позволит выполнить мониторинг технологических процессов и четкое управление режимами в режиме реального времени, и тем самым, увеличить производительность труда сотрудников и уменьшить потребление электрической энергии до 25-30% в период вегетации.

Директор департамента коммерциализации науки		Е. Керимбеков
Декан факультета инженерии		Н.Сапарходжаев
Заведующий кафедрой "Электрическая инженерия"		Б.Куатбеков
Автор разработки, старший преподаватель		А.Умаров

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-методической работе  
МКТУ имени Ясави, д-р техн. наук, профессор  
«07» 10 2020 Умбетов



Акт внедрения в учебный процесс

результатов работы

Мы, ниже подписавшиеся, автор разработки А.Умаров с одной стороны, и директор департамента по академическим вопросам Т.Ниязов, декан факультета инженерии Н.Сапарходжаев, заведующий кафедрой "Электронинженерии" Б.Куатбеков, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты работы диссертационной работы старшего преподавателя Умарова Амантура Амангельдывича имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса.

Результаты разработки внедрены в учебный процесс университета для бакалавров специальности "Автоматизация и управление" 3, 4 курса на лекционных/ практических/ лабораторных занятиях дисциплины Анализ и синтез схем, Схемы систем автоматки и телемеханики в 1 семестре 2020-2021 учебного года.

Основные результаты работы:

1. Мобильное приложение "Ақылды жылбай"
2. Устройство управления "Домашняя смарт теплица"

Наименование объекта и предмета внедрения: теплица МКТУ имени А. Ясави, мониторинг технологических процессов в теплице.

Эффект от внедрения (использования) результатов внедрения: Разработанную программу и устройство управления технологическими процессами теплицы можно применить в качестве лабораторного стенда и имитационной модели процессов микроклимата теплицы.

Директор департамента по академическим вопросам		Т. Ниязов
Декан факультета инженерии		Н.Сапарходжаев
Заведующий кафедрой "Электрическая инженерия"		Б.Куатбеков
Автор разработки, старший преподаватель		А.Умаров

**СПРАВКА**  
**об использовании результатов**  
PhD докторской диссертационной работы  
Умарова Амантура Амангельдыевича

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Умарова А. А. "Разработка ситуационной интеллектуальной системы управления мини теплицей на базе IoT устройств", включающий методы, алгоритмы и программно-технической комплекс, прошли апробацию в теплице Eco product Company в виде AIoT – устройства "Акцалды жылыжай" и внедрены в эксплуатацию.

Приняты к внедрению следующие разработки Умарова А.А.:

1. Модель экосистемы "Растение-Среда-Ситуация-Управление", с рациональным использованием функции подготовки данных (ЭВМ) и функции принятия решения (Человек). Модель позволяет описывать текущую ситуацию, и, в зависимости от ситуации выбирать приемлемое техническое решение для ЛПР.

2. Структура общей экспертной системы для ситуационного управления теплицей, позволяющей реализовать последнюю модель с помощью нечеткой экспертной системы;

3. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений на базе ИЛК, позволяющий решать задачу идентификации состояния окружающей среды в суточном и биологическом масштабе времени и задачу нечеткого управления на основе целевого критерия;

4. IoT устройство, позволяющий выполнять контроль и смарт управление процессами микроклимата в online и offline режимах через мобильное приложение.

Считаю актуальным и необходимым внедрение разработанной системы для повышения продуктивности процесса выращивания растений в теплице.

Коммерческая и инновационная привлекательность предлагаемого IoT устройства для интеллектуального управления минитеплицей заключается в ее энергоэффективности, доступности малообеспеченным слоям населения, автоматизации процесса получения готовой овощной продукции в малопродуктивных регионах страны.

Предполагаемая экономическая эффективность от внедрения системы 25-30%.

Директор  
ТОО «Eco product Company»

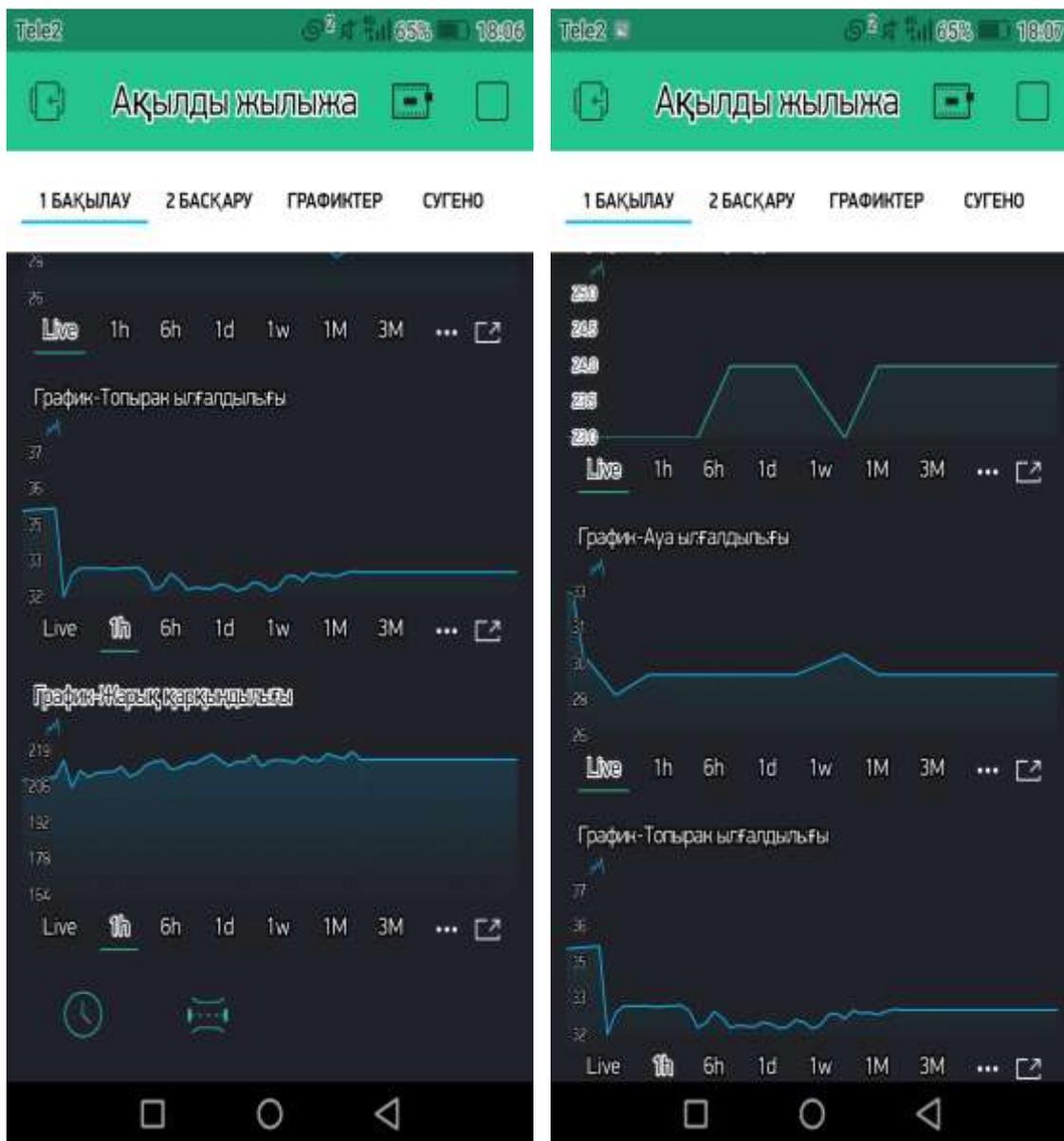


Махатов А.А.

Приложение Д – Полупромышленная установка  
“Домашняя смарт теплица” (прототип)



## Приложение E – Мобильное приложение “Ақылды жылыжай”





# Umarov, Amantur

Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Connect to ORCID [or](#) [is this you?](#) [Connect to Mendelley account](#)

[Edit profile](#) [Set alert](#) [Potential author matches](#) [Export to Scopus](#)

## Metrics overview

2  
Documents by author

0  
Citations by 0 documents

0  
h-index

## Document & citation trends



## Most contributed Topics 2016–2020

District Heating Heat Supply Energy  
1 document

[View all Topics](#)

2 Documents [Cited by](#) 0 Preprints [Co-Authors](#) Topics [Awarded grants](#) **543**

### Note:

Scopus Preview users can only view an author's last 10 documents, while most other features are disabled. Do you have access through your institution? Check your institution's access to view all documents and features.

[Export all](#) [Add all to list](#)

Sort by [Date \(newest\)](#) [v](#)

[View list in search results format](#)

[View references](#)

[Set document alert](#)

### Aside

Smart greenhouse and plant growth control  
Umarov, A., Balgibay, B., Gif, M., Manurova, M., Kulmanirov, S.  
*Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2021, 9(3), pp. 474-483  
[Show abstract](#) [v](#) [Related documents](#)

0  
Citations

### Aside

Energy Calculation Analysis of Differing Solar Collector Systems in Various Climate Conditions of Kazakhstan  
Belyay, T., Baishov, D., Kunlbayev, M., Umarov, A., Sayymbekov, M.  
*ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, 14(20), pp. 7703-7713  
[Show abstract](#) [v](#) [Related documents](#)

0  
Citations