

На правах рукописи



ЛОГИНОВ ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ  
МИКРОКЛИМАТА В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА**

Специальность: 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА»)

Научный руководитель:

**Владыкин Иван Регович**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Воробьев Виктор Андреевич**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электропривод и электро-  
технологии» РГАУ – МСХА имени  
К.А. Тимирязева

**Мохова Ольга Павловна**  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры информационных и электро-  
технических систем и технологий  
ФГБОУ ВО «РГАЗУ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюд-  
жетное образовательное учреждение  
высшего образования «Башкирский  
государственный аграрный универси-  
тет»

Защита состоится «28» июня 2016 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д.006.037.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2. Телефон (499) 171-19-20, факс (499) 170-51-01, e-mail: viesh@dol.ru

С диссертацией и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» и на официальном сайте [www.viesh.ru](http://www.viesh.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять ученому секретарю совета по адресу: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2.

Автореферат разослан «26» апреля 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Некрасов  
Алексей Иосифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электротехнологии защищенного грунта в настоящее время развиваются как энергоэффективная и наукоемкая отрасль агропромышленного комплекса Российской Федерации. Мировые тенденции развития овощеводства защищенного грунта указывают на практически повсеместный переход на интенсивные энергосберегающие технологии выращивания овощных культур. Как показывает опыт, 2014...2015 годов, из-за сложившейся ситуации, когда Россия оказалась в условиях санкций и эмбарго на поставку сельскохозяйственной продукции, стало необходимым производство собственной овощной продукции в целях снижения зависимости от импорта.

Особенно актуальным является снижение энергозатрат, т.к. они занимают значительный процент в себестоимости овощной продукции в теплицах. Анализ научных публикаций, отчетов тепличных комбинатов, а также собственные исследования показали, что энергозатраты на производство овощей в тепличных комбинатах составляют около 40%.

Анализ специальной литературы показал, что производство овощей в защищенном грунте не всегда может быть прибыльным в виду влияния различных факторов как экономического, технологического, так и природного характера. Поэтому снижение затрат на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) в себестоимости продукции защищенного грунта (ЗГ) является актуальным.

Повышение продукции защищенного грунта связано с поддержанием необходимых параметров микроклимата различным электрооборудованием теплиц. При согласованной работе этого электрооборудования можно существенно снизить затраты на ТЭР, а следовательно, и себестоимость продукции защищенного грунта. Взаимосвязанная работа технологического электрооборудования, обеспечивающая требуемые параметры микроклимата, невозможна без применения программируемых логических контроллеров (ПЛК), для которых разрабатывается специальный алгоритм работы и пишется специальная программа. Поэтому повышение эффективности работы электрооборудования для систем поддержания микроклимата в сооружениях защищенного грунта с помощью ПЛК, обеспечивающей повышение продуктивности растений и снижение ТЭР, является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с отраслевой научно-технической программой № 01201350386 «Взаимосвязанные электротехнологии управления микроклиматом в защищенном грунте», проводимой Министерством сельского хозяйства и Продовольствия Удмуртской Республики.

**Цель работы:** повышение эффективности работы электрооборудования для систем поддержания микроклимата в сооружениях защищенного грунта за счет научного обоснования энергоэффективных режимов и согласованной работы существующего электрооборудования, позволяющей увеличить выход продукции при снижении затрат на ТЭР.

### **Задачи исследования:**

1. Провести анализ режимов работы существующего электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте для научного обоснования новых возможностей снижения потребления энергетических ресурсов и себестоимости продукции при сохранении ее качества;
2. Получить математическую модель температурного поля, описывающую изменение температуры в рабочем объеме сооружения защищенного грунта в зависимости от внешних условий окружающей среды и позволяющей с помощью разработанного алгоритма для ПЛК оперативно управлять работой существующего электрооборудования в режиме энергосбережения для поддержания требуемых параметров микроклимата.
3. Разработать алгоритм работы и программу для ПЛК, позволяющих повысить эффективность работы систем поддержания микроклимата в защищенном грунте за счет согласованного режима работы технологического электрооборудования, что приведет к снижению потребления тепловой энергии.
4. Провести испытания в производственных условиях предложенного согласованного режима работы электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте.
5. Определить экономическую эффективность согласованной работы существующего электрооборудования в энергоэффективном режиме для систем поддержания микроклимата в сооружениях защищенного грунта.

**Объектом исследования** является система, состоящая из электрооборудования и технических средств, обеспечивающих энергосберегающий режим работы систем для создания параметров микроклимата и технологических мероприятий, позволяющих повысить продуктивность растений при уменьшении энергетических и приведенных затрат.

**Предметом исследования** являлось изучение процессов воздействия и обоснование энергоэффективных режимов работы существующего и модернизированного электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте на культуру огурца.

### **Научная новизна работы:**

1. Научно обоснован режима работы электропривода энергосберегающего экрана, обеспечивающего согласованную работу системы электрооборудования и позволяющий тем самым повысить эффективность его работы и снизить энергозатраты на обогрев сооружения защищенного грунта;
2. Разработана математическая модель температурного поля, описывающая изменение температуры в рабочем объеме сооружения защищенного грунта в зависимости от внешних условий окружающей среды и позволяющая оперативно управлять работой установленного электрооборудования для поддержания требуемых параметров микроклимата;
3. Разработан алгоритм работы ПЛК, позволяющий повысить эффективность работы электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте за счет согласованного режима работы и позволяющего снизить потребление тепловой энергии.

4. Разработана программа работы для ПЛК с гибкой иерархической структурой по блочно-модульному принципу перестраиваемая в режиме реального времени при изменении технологических задач, позволяющая повысить эффективность работы электрооборудования и технических средств защищенного грунта.

Новизна технических решений подтверждена Патентом Российской Федерации на полезную модель № 127286 и Свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025661513 «Взаимосвязанное управление параметрами микроклимата защищенного грунта», дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29 октября 2015 года.

**Практическая ценность работы** определяется следующими основными результатами:

1. Разработана программа для управления приводом энергосберегающего экрана, позволяющая автоматически закрывать его при превышении температуры летом выше  $30^{\circ}\text{C}$  и зимой при достижении температуры в теплице  $+23^{\circ}\text{C}$ , что позволяет снизить энергозатраты на 10...12%.
2. Разработана программа и алгоритм работы ПЛК, обеспечивающий повышение эффективности работы существующего электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте благодаря согласованной работе этого электрооборудования, позволяющая повысить продуктивность растений и снизить расходы на энергоресурсы.
3. Результаты диссертационных исследований использованы в ряде хозяйств Удмуртской Республики при проектировании системы управления микроклиматом в защищенном грунте, обеспечивающей повышение эффективности работы существующего электрооборудования, что подтверждается актами и протоколами испытаний.
4. Результаты научной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА.

**Реализация результатов исследований.** Результаты работы прошли производственные испытания и внедрены на следующих предприятиях:

1. ОАО «Тепличный комбинат «Завьяловский» Удмуртской Республики (алгоритм управления работой электрооборудования для поддержания температурного режима).
2. ООО «Цветочная компания «Лилия» Удмуртской Республики (программа для логических контроллеров, управляющих температурным режимом с учетом влияния внешней среды).
3. ООО «Декоративно-цветочный комбинат» Удмуртской Республики (алгоритм управления и программа для энергоэффективного режима работы электрооборудованием в условиях защищенного грунта);
4. ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА» (в учебном процессе для обучения студентов).

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная функционально-структурная организация энергосберегающего технологического электрооборудования систем микроклимата, обеспечивает повышение эффективности различных технологических режимов при изменении внешних условий.
2. Проведенные исследования технических средств систем поддержания микроклимата как объектов управления, основанные на анализе материальных потоков, временных, энергетических режимов работы электрооборудования, позволяют обосновать контролируемые и регулируемые параметры процесса выращивания сельскохозяйственной продукции в защищенном грунте, структуру электрооборудования и комплекс информационных технических средств.
3. Предложенный способ энергоэффективного режима работы энергетического экрана позволяет снизить затраты энергии на отопление сооружения защищенного грунта до 10%.
4. Разработанная математическая модель, устанавливающая взаимосвязи режимов работы электрооборудования и технических средств систем микроклимата с показателями качества сельскохозяйственной продукции, позволяет создавать энергоэффективные режимы работы системы для поддержания микроклимата в сооружениях защищенного грунта.
5. Разработанные алгоритм управления и программа работы исполнительных механизмов существующей системы электрооборудования для обеспечения требуемых параметров в сооружениях защищенного грунта, позволяют снизить потребление энергоресурсов и построить работу с возможностью ее адаптации к изменяющимся внешним условиям.

**Методика исследований** заключается в применении аналитических и экспериментальных методов исследования. Использовались методы математического моделирования с применением программного обеспечения MS Excel, MathCAD Prime, Compas graphic V16, CoDeSys, теоретические основы электротехники и электроники, методы программирования логических контроллеров, методы прикладной экономики и современные измерительные приборы.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы доложены и одобрены на международных и зарубежных конференциях: Всероссийская научно-практическая конференции, посвященная 35-летию факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства «Инновационные электротехнологии и электрооборудование – предприятиям АПК» г. Ижевск ФГБОУ ВПО «Ижевская ГСХА» 2012 год; 8-я Международная научно-техническая конференция «Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике» г. Москва, (ГНУ ВИЭСХ). 2012 год; Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА «Научное обеспечение АПК. Итоги и перспективы» г. Ижевск ФГБОУ ВПО «Ижевская ГСХА» 2013 год; 9-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 85-летию академика И.Ф. Бородин «Энергообеспечение и энергосбережение в с.-х.» 21-22 мая 2014 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ;

Science, Technology and Higher Education: materials of the V International research and practice conference Westwood, June 20<sup>th</sup>, 2014/Canada; 6-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Инновации в сельском хозяйстве» г. Москва, ФГБНУ ВИЭСХ, декабрь 2015 года.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 в зарубежных изданиях, одна из которых входит в базу данных Scopus, 1 патент на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Основной текст диссертации изложен на 125 страницах машинописного текста, содержит 108 наименований в списке литературы, 10 приложений, 72 рисунка и 18 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиография содержит 108 наименований из них 6 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи исследования. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются общие сведения, проведен анализ электрооборудования для поддержания микроклимата в сооружениях защищенного грунта (ЗГ). Для реализации доктрины продовольственной безопасности России необходимо: провести модернизацию тепличных комбинатов, применять энергосберегающие технологии выращивания овощей в теплицах для снижения затрат на энергоресурсы. Поэтому повышение эффективности работы электрооборудования для поддержания микроклимата будет актуальной задачей.

Микроклимат в сооружениях защищенного грунта поддерживается путем управления интенсивностью водяного обогрева, положением вентиляционных фрамуг, подкормкой CO<sub>2</sub>, зашториванием экрана, включением циркуляционных вентиляторов и воздушного обогрева. Поддержание заданной температуры воздуха в теплицах производится согласованным управлением температурой теплоносителя в нескольких контурах отопления.

Функционально-структурная организация энергосберегающего электрооборудования систем микроклимата в защищенном грунте представлена на рисунке 1. Основными элементами являются: подогреватель поливной воды (1), насосы-дозаторы (2), растворные баки с мешалками для приготовления питательного раствора (3), клапаны полива (4), поливочные насосы (5), клапан сброса (6), генератор CO<sub>2</sub> (7), регистры обогрева (8), трехходовые смесительные клапаны (9), подмешивающий насос (10), циркуляционные насосы (11).

В существующих системах поддержания микроклимата защищенного грунта электрооборудования работает в энергосберегающем режиме. Однако, мотор-редуктор системы горизонтального зашторивания (12) работает в ручном режиме, выполняя функции закрывания или открытия экрана, и используется только в летний период для снижения уровня естественной облученности.







датчиков, установленных в рабочем объеме сооружения защищенного грунта, подает команду на снижение скорости вращения циркуляционных насосов во всех контурах обогрева, что приводит к снижению расхода теплоносителя и, соответственно, уменьшению энергозатрат.

Таким образом, повышение эффективности работы существующего электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте осуществляется благодаря использованию ПЛК, который и осуществляет согласованную работу этого электрооборудования, что позволяет повысить продуктивность растений и снизить расходы на тепловые энергоресурсы.

**Во второй главе** представлено математическое моделирование температурного поля с учетом влияния всех микроклиматических параметров ЗГ.

Исследование изменения температуры в рабочем объеме защищенного грунта позволит выбрать наиболее подходящие устройства регулирования температурного режима для культивируемых биологических объектов с целью повышения их продуктивности.

Кроме того, необходимо при выборе отопительных установок учитывать значительное влияние на температурный режим в защищенном грунте и других микроклиматических параметров, например, видимого излучения, температуры окружающей среды, теплоносителя и т.д. А также влияние изменения температуры на микроклимат в теплицах – это динамика изменения содержания  $\text{CO}_2$ , влажность воздуха и почвы. При этом все параметры микроклимата должны находится в краевых зонах, и соответствовать требованиям агрономов.

Фундаментальные исследования в области математического моделирования температурного режима и микроклимата в защищенном грунте изложены в работах: академика Бородина И.Ф., Прищепа Л.Г., Шичкова Л.П. Еркова А.А., Живописцева Е.Н., Захарова А.А., Коломийца А.П., Кирилина Н.И., Кондратьевой Н.П., Листова П.Н., Мусина А.М., Судника Ю.А., Сухаревой Л.И. и др.

Анализ литературы, посвященного математическому моделированию температурных полей в ЗГ можно сделать следующие выводы. Не смотря на то, что современные теплицы полностью автоматизированы, используемые в них математические модели изменения температуры не учитывают с достаточной точностью следующие параметры: форму сооружений защищенного грунта; лучистый теплообмен; инфильтрацию наружного воздуха; испарение влаги; парниковый эффект от солнечного излучения.

Не отступая от классических принципов математического моделирования для описания температурного поля в рабочем объеме сооружений защищенного грунта, примем следующие допущения. Поверхность почвы идеально ровная, имеет во всех точках одинаковую температуру, тепловой поток направлен только в направлении от почвы в воздушное пространство теплицы. Следовательно, поверхность почвы можно принять за изотермическую плоскость. Боковые ограждающие конструкции имеют однослойную структуру с идеальной тепловой изоляцией. Боковой и шатровый обогрев не влияют на температурное поле в теплице. Траектория движения тепловых потоков воздушных масс в поперечном сечении теплицы близка к эллиптической форме. Рассматривать ки-

нematику процесса будем, без выяснения причин, которые определяют движение тепловых масс среды по эллиптическим траекториям. Рабочий объем защищенного грунта представим как пространство, ограниченное по бокам плоскостями, а сверху цилиндром, так как, это наиболее близкая геометрическая фигура, которой можно описать теплицу, имеет гладкий контур, а, следовательно – непрерывные первые производные.

Не вызывает сомнения тот факт, что современные сооружения защищенного грунта представляют тела конечных размеров правильной геометрической формы, образованных путем взаимного пересечения неограниченных пластин (рисунок 4).

Если учесть, что в большинстве современных теплиц конек отделен от основного объема механизмом зашторивания с целью снижения тепловых потерь в зимний период и защиты биологических объектов от чрезвычайно сильного солнечного излучения в летний период, то теплица – это параллелепипед конечных геометрических размеров по осям декартовых координат  $x, y, z$ .

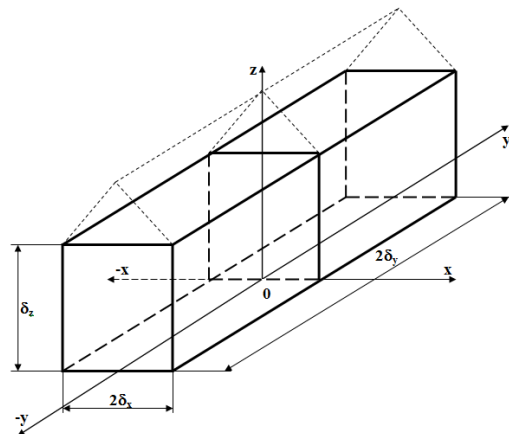


Рисунок 4 Сооружение защищенного грунта в виде тела конечных размеров

Если тело образовано пересечением двух плоских пластин, имеющих толщину  $2\delta_x$  в плоскости  $x$  и  $2\delta_y$  в плоскости  $y$ , то поле температур равно:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_x \cdot \bar{\Theta}_y. \quad (1)$$

Соответственно для параллелепипеда:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_x \cdot \bar{\Theta}_y \cdot \bar{\Theta}_z. \quad (2)$$

Основываясь на результатах других исследователей, примем, к вниманию, тот факт, что охлаждение оказывает на температурное поле существенное влияние и, следовательно, температурное поле под коньком теплицы ограничивается усеченным полуцилиндром.

Таким образом, температурное поле в защищенном грунте можно описать как пересечение двух неограниченных пластин по осям  $x$  и  $y$ , а по оси  $z$  цилиндром. Необходимо, также, учесть, что теплица находится в условиях охлаждения, т.е.  $t_{не} < t_0$ . На основании этого, формула (2) может быть преобразована:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_x \cdot \bar{\Theta}_y \cdot \bar{\Theta}_z = \left[ \frac{t_0 - t(x, \tau)}{t_0 - t_{не}} \right] \cdot \left[ \frac{t_0 - t(y, \tau)}{t_0 - t_{не}} \right] \cdot \left[ \frac{t_0 - t(z, \tau)}{t_0 - t_{не}} \right], \quad (3)$$

где  $t_{не}$  – температура наружного воздуха, т.е. окружающей среды;

$t_0$  – температура воздуха в теплице в момент времени  $\tau=0$ , которая может быть измерена датчиком, установленным в наиболее теплом месте.

Таким образом, для определения общего температурного поля в защищенном грунте нам необходимо определить температурные поля по каждой оси. Описать температурные поля по осям  $x$  и  $y$  можно аналогично, т.е. как в неограниченных пластинах, а по оси  $z$  цилиндром.

Температурное поле в неограниченной плоской пластине, находящейся в условиях охлаждения можно определить, используя дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, которое имеет вид:

$$a \cdot \Delta t + \frac{Q_V}{c \cdot \rho} = \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta t$  – разница температур, °С;  $Q_V$  – объемная плотность источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Решение уравнения (4) в учебниках по теплотехнике приводится методами математической физики. Наиболее простой способ решения этого уравнения – случай одномерной нестационарной теплопроводности без внутренних источников теплоты, следовательно, выражение (4) преобразуем в:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (5)$$

Для решения уравнения (5), как правило, используют метод разделения переменных. В этом случае, температуру  $t$  представляют в виде произведения двух функций:  $t = L^* \cdot T^*$ , где  $L^* = f(x)$  зависит только от  $x$ , а  $T^* = f(\tau)$  зависит только от  $\tau$ . Следовательно:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = L^* \cdot \frac{dT^*}{d\tau}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} = T^* \cdot \frac{dL^*}{dx}; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = T^* \cdot \frac{d^2 L^*}{dx^2}.$$

Подставляя эти значения в выражение (5) получим:

$$\frac{1}{a \cdot T^*} \cdot \frac{dT^*}{d\tau} = \frac{1}{L^*} \cdot \frac{d^2 L^*}{dx^2} \quad (6)$$

Левая часть уравнения (6) является функцией времени, т.е. только  $\tau$ , а правая функция геометрического размера по оси  $x$ . Эти функции могут быть равны лишь в том случае, когда они являются постоянной величиной. В любом другом случае, т.к.  $\tau$  и  $x$  независимые аргументы, равенства быть не может:

$$\frac{1}{a \cdot T^*} \cdot \frac{dT^*}{d\tau} \neq \frac{1}{L^*} \cdot \frac{d^2 L^*}{dx^2}.$$

Если обозначим эту функцию как  $-\beta^2$ , то получим:

$$\frac{1}{a \cdot T^*} \cdot \frac{dT^*}{d\tau} = -\beta^2; \quad (7) \quad \frac{1}{L^*} \cdot \frac{d^2 L^*}{dx^2} = -\beta^2. \quad (8)$$

Решение уравнения (7) примет вид:  $T^* = A \cdot e^{-a \cdot \beta^2 \cdot \tau}$ .

Знак минус у величины  $\beta^2$  соответствует условиям охлаждения, которые можно применить для телиц, так как в течение времени,  $\tau$  несомненно, будет падение температуры  $t$ .

Решение уравнения (8) в нашем случае, т.е. если по оси  $x$  теплица ограничена неограниченной плоской пластиной, имеющей начальную температуру  $t_\delta$  и помещенную в момент времени  $\tau=0$  в среду с температурой  $t_{нв}$  имеет вид:

$$L^* = B \cdot \cos \beta_x + D \cdot \sin \beta_x \quad (9)$$

На границах пластины происходит теплообмен по закону Ньютона. Т.к. задача симметрична, то примем толщину пластины  $2\delta$  и поместим ось  $x$  в центре пластины (рисунок 1). В силу симметричности функции  $\cos$  запишем выражение (9) в виде  $L^* = B \cdot \cos \beta_x$  и уравнение поля температур  $t = L^* \cdot T^*$ :

$$t = C \cdot e^{-a \cdot \beta^2 \cdot \tau} \cdot \cos(\beta_x). \quad (10)$$

Вводя критерии подобия:  $Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda_w}$ ,  $F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{\delta^2}$ ,  $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ , получим:

$$t = C \cdot e^{-(\delta \cdot \beta)^2 \cdot F_0} \cdot \cos(\delta \cdot \beta \cdot \bar{x}), \quad (11)$$

где величина  $\delta \cdot \beta = \mu^*$  может быть найдена из характеристического уравнения:

$$\cot \mu^* = \frac{\mu^*}{Bi}. \quad (12)$$

Уравнение (12) решается графическим путем, и имеет бесчисленное множество корней  $\mu_i^*$  и приводится в нескольких изданиях, посвященных теоретической теплотехнике и математике.

Сумма частных решений дает общее в следующем виде:

$$\bar{\Theta}_x = \left[ \frac{t_\delta - t(x, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot \cos(\mu_i^* \cdot \bar{x}) \cdot e^{-\mu_i^{*2} \cdot F_0} \quad (13)$$

Значения постоянных  $C_i$  определяют из начальных условий ( $\tau=0$ ;  $t_\delta=t_0$ ):

$$C_i = (t_{нв} - t_0) \cdot \frac{2 \cdot \sin \mu_i^*}{\mu_i^* + \sin \mu_i^* \cdot \cos \mu_i^*}. \quad (14)$$

Подставляя значения постоянных  $C_i$  в уравнение (13), можем получить окончательное выражение для поля температур по оси  $x$ :

$$\bar{\Theta}_x = \left[ \frac{t_\delta - t(x, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \sin \mu_i^* \cdot \cos(\mu_i^* \cdot \bar{x})}{\mu_i^* + \sin \mu_i^* \cdot \cos \mu_i^*} \cdot e^{-\mu_i^{*2} \cdot F_0} \quad (15)$$

Будет целесообразно теплицу в сечении по оси  $x$  представить, как неограниченную пластину с граничными условиями третьего рода.

Ряд, для определения температурного поля по оси  $x$ , является сходящимся. Это значит, что с определенного значения  $F_0 \geq 0,3$  все последующие члены ряда по сравнению с первым ничтожно малы. Следовательно, при  $F_0 \geq 0,3$  можно ограничиться только первым членом ряда, тогда мы получим:

$$\bar{\Theta}_x = \left[ \frac{t_\delta - t(x, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = \frac{2 \cdot \sin \mu_1^* \cdot \cos(\mu_1^* \cdot \bar{x})}{\mu_1^* + \sin \mu_1^* \cdot \cos \mu_1^*} \cdot e^{-\mu_1^{*2} \cdot F_0}. \quad (16)$$

В конкретной точке пластины, а, следовательно, и теплицы по оси  $x$ , ее температура зависит только от критериев подобия, принятым выше,  $Bi$  и  $F_0$ .

Поскольку, внутреннее термическое сопротивление теплицы по сравнению с внешним термическим сопротивлением окружающей среды велико, т.е.  $Bi \rightarrow \infty$ , то в этой задаче, граничные условия третьего рода переходят в граничные условия первого рода. При этих условиях ( $Bi \rightarrow \infty$  и  $F_0 \geq 0,3$ ) из уравнения (16) получим ( $\mu_1^* = \frac{\pi}{2}$ ,  $\cos \mu_1^* = 0$ ,  $\sin \mu_1^* = 1$ ):

$$\bar{\Theta}_x = \left[ \frac{t_\delta - t(x, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \bar{x}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} F_0} \quad (17)$$

Проводя аналогичные вычисления, температурное поле в теплице по оси  $y$  можно представить как:

$$\bar{\Theta}_y = \left[ \frac{t_\delta - t(y, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \bar{y}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} F_0} \quad (18)$$

По оси  $z$  температурное поле можно описать аналогично процессам нагрева в половине цилиндра, т.е. аналитическим выражением:

$$\bar{\Theta}_z = \left[ \frac{t_\delta - t(z, \tau)}{t_\delta - t_{нв}} \right] = 1 - \frac{2 \cdot a \cdot \alpha \cdot \tau}{\lambda_w \cdot r} \cdot e^{-\frac{1}{4 F_0}}, \quad (19)$$

где  $a$  – коэффициент изобарной температуропроводности, для воздуха составляет  $18,88 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$ ;  $\lambda_w = 0,027 \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $\alpha$  – коэффициент конвективной отдачи для воздуха равен  $500 \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$ ;  $\tau$  – текущий момент времени, с;  $r$  – радиус цилиндра, равный высоте  $z$  от поверхности земли до точки в которой необходимо определить температуру.

Кроме того, нельзя не учитывать обстоятельство, что ширина и длина теплицы в несколько раз больше высоты сооружения защищенного грунта, т.е.  $l \gg z$  или  $\delta \gg z$ . Поэтому, считаем, что в выражение (19) необходимо внести геометрический коэффициент сооружения защищенного грунта  $k_{\Gamma}$ , который, по сути, является коэффициентом сжатия, вписанного в поперечное сечение теплицы половины эллипса. Следовательно,  $k_{\Gamma} = \frac{2 \cdot z}{l}$ .

Далее можно от безразмерных величин температурного поля перейти к конкретным значениям температуры в какой-либо точке рабочего объема защищенного грунта.

Учитывая, что  $\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_x \cdot \bar{\Theta}_y \cdot \bar{\Theta}_z$ , получим:

$$t = t_d - \left[ \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \bar{x}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} \cdot F_0} \right] \cdot \left[ \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \bar{y}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4} \cdot F_0} \right] \cdot \left[ \frac{2 \cdot z}{l} - \frac{4 \cdot z \cdot a \cdot \alpha \cdot \tau}{l \cdot \lambda_w \cdot z} \cdot e^{-\frac{1}{4} F_0} \right] \cdot (t_d - t_{\text{нв}}) \quad (20)$$

Проведя ряд математических преобразований и переводя относительные величины  $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$  и  $\bar{y} = \frac{y}{l}$  в реальные в выражения (20) получим:

$$t = t_d - \left[ \frac{16}{\pi^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot \delta}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot l}\right) \cdot e^{-\frac{\pi^2}{2} \cdot F_0} \right] \cdot \left[ \frac{2 \cdot z}{l} - \frac{4 \cdot a \cdot \alpha \cdot \tau}{\lambda_w \cdot l} \cdot e^{-\frac{1}{4} F_0} \right] \cdot (t_d - t_{\text{нв}}) \quad (21)$$

где  $l$ ,  $\delta$ ,  $z$  – длина, ширина и высота теплицы соответственно, м

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных (рисунок 5) позволил сделать вывод, что разработанная математическая модель температурного поля в рабочем объеме защищенного грунта, позволяет с достаточной точностью определять температуру в любой точке теплицы.

Используя модель, представленную выражением (21), система управления, позволяет решать следующие задачи. Учитывать температуру в любой точке рабочего объема защищенного грунта, получая данные с температурных датчиков, установленных в окружающей среде и в геометрическом центре теплицы  $t_d$ . Электрооборудование при этом способно работать во взаимосвязанном режиме с учетом освещенности биологических объектов и других параметров микроклимата в теплице, при этом выполнять функции энергосбережения, закрывая экран за-

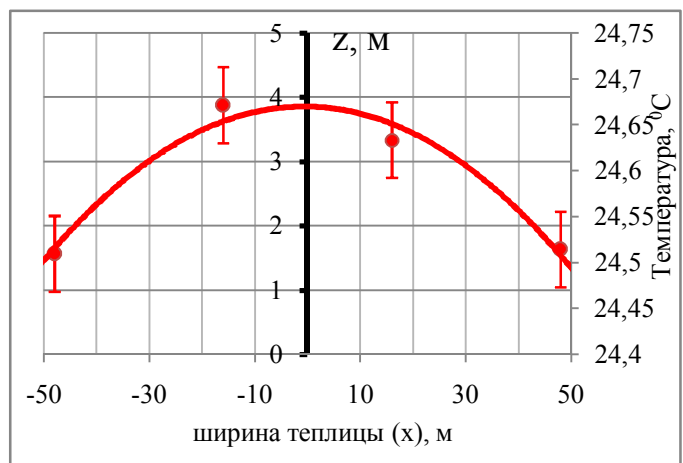


Рисунок 5 Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных

шторивания. Принимать решения о повышении температуры в теплицы для удаления чрезмерного снежного покрова на коньках теплицы, снижающего освещенность биологических объектов ниже допустимого.

**В третьей главе** для доказательства взаимного влияния параметров микроклимата и подтверждения математической модели и доказательства ее адекватности представлены результаты экспериментов, проведенных нами экспериментальных исследований параметров микроклимата в нескольких теплицах на различных предприятиях Удмуртской Республики.

Исследований и анализа экспериментальных данных, посвященных напрямую взаимосвязи солнечного излучения, температуры и влажности в защищенном грунте нет. Для исследования мы применяли приборы, зарегистрированные в государственном реестре и имеющие свидетельство о поверке в сертифицированных центрах стандартизации и метрологии.

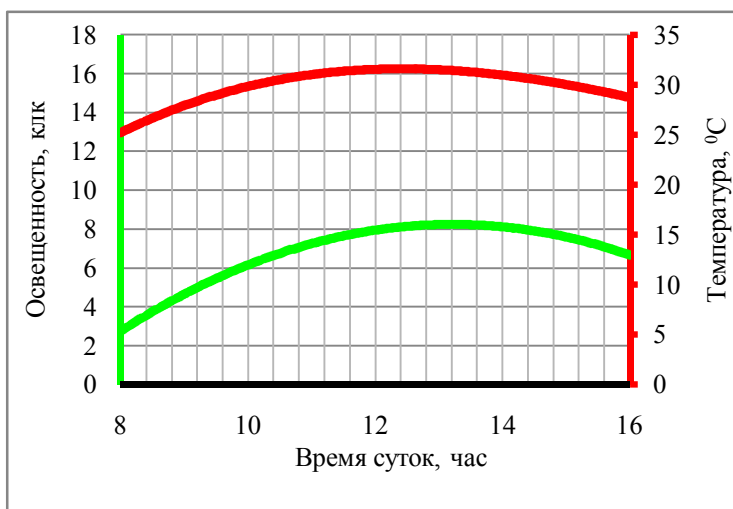


Рисунок 6 Динамика освещенности и температуры

Несомненно, в условиях защищенного грунта присутствует влияние естественного солнечного излучения на температурный режим. Математическая обработка экспериментальных данных усредненных значений естественной освещенности и температуры в теплицах показала результат, представленный на рисунке 6.

Аналогичным образом были получены зависимости взаимного влияния микроклиматических факторов в условиях ЗГ.

Анализ этих зависимостей показывает, что при повышении естественной освещенности в условиях защищенного грунта, не смотря на возмущающие воздействия окружающей среды, повышается температура. Аналогично: при повышении температуры, как и в естественных условиях, снижается влажность. Таким образом, освещенность влияет как на температуру, так и на влажность воздуха в условиях защищенного грунта.

Анализ изменения температуры в поперечном сечении теплицы во всех исследуемых объектах защищенного грунта показал, что температура под коньком теплицы может быть описано полиномиальной функцией 2-го порядка с экстремумом, т.е. параболической кривой. Таким образом, температурное поле в теплице можно описать телом вращения полиномиальной кривой второго порядка – эллипсоидом, вписанным в геометрические размеры объекта защищенного грунта, т.е. параллелепипеда. Повышение порядка функции не принесло повышения достоверности аппроксимации. Это подтверждают и изо-

термические кривые, полученные нами при исследовании, имеющие выпукло-образный характер.

На основании результатов собственных экспериментальных исследований, изложенных в настоящей главе, можно сделать следующие выводы. Определяющим микроклиматическим фактором является естественная освещенность. В современных условиях ЗГ регулирование верхнего предела уровня естественной освещенности не представляется возможным, но, как правило, находится в пределах 50 клк в средней широте РФ. Температура зависит от уровня естественной освещенности. Температурное поле в теплице представляет собой эллипсоид, образованный вращением изотермических кривых, которые имеют достоверность аппроксимации  $R^2=0,96$ , и описываются полиномиальными функциями второго порядка. Влажность косвенно зависит от естественной освещенности: при повышении освещенности повышается температура и, как следствие, снижается влажность. Влажность и температура хорошо регулируются современными средствами автоматизации в условиях защищенного грунта. Концентрация  $CO_2$  в воздухе зависит от освещенности и косвенно от температуры. При повышении освещенности концентрация  $CO_2$  снижается, поэтому для получения высоких урожаев концентрацию  $CO_2$  в условиях защищенного грунта необходимо искусственно поддерживать в пределах 0,007%. Алгоритмы управления взаимосвязанных электротехнологий и микроклиматом в теплицах должны учитывать взаимное влияние параметров микроклимата друг на друга и оперативно реагировать на их изменение, что позволит сократить затраты энергоресурсов.

**В четвертой главе** анализ существующих алгоритмов управления параметрами микроклимата через соответствующее электротехнологическое оборудование в условиях защищенного грунта показал, что, в основном, разработаны алгоритмы, учитывающие взаимное влияние максимум двух параметров друг на друга. Но нельзя отрицать взаимное влияние всех основных четырех параметров микроклимата друг на друга. Предлагаемый нами алгоритм проводит расчет температуры в рабочем объеме защищенного грунта по математической модели, предложенной во второй главе настоящей работы. Новизна, предлагаемого нами, взаимосвязанного алгоритма управления параметрами микроклимата (рисунок 7) заключается в следующем.

Определяющим параметром микроклимата принята естественная освещенность. Учитываются влияние освещенности на температуру воздуха вследствие парникового эффекта, влажность воздуха и концентрацию углекислого газа. Первый блок алгоритма регулирует облученность растений включением источников искусственного излучения, а также открытием или закрытием затеняющего экрана, который иногда называют энергетическим экраном. Следующий блок алгоритма позволяет использовать затеняющий экран в качестве энергосберегающего в климатических условиях умеренного климата, придав ему следующую функцию. При резком снижении температуры окружающей среды, во-первых, повышается температура теплоносителя в контурах отопления, во-вторых, экран закрывается. Это позволит отсечь значительный объем



сооружения защищенного грунта и снизить нагрузку на систему отопления для поддержания требуемых значений температуры. Как следствие – снежный покров перестает подтаивать и добавляет энергосберегающий эффект, поскольку является естественным термоизолятором. При этом крыша конструкций современных теплиц позволяет выдерживать значительные снеговые нагрузки. Остальная часть алгоритма поддерживает в краевых зонах такие параметры микроклимата как влажность и концентрацию углекислого газа в зависимости от освещенности и температуры.

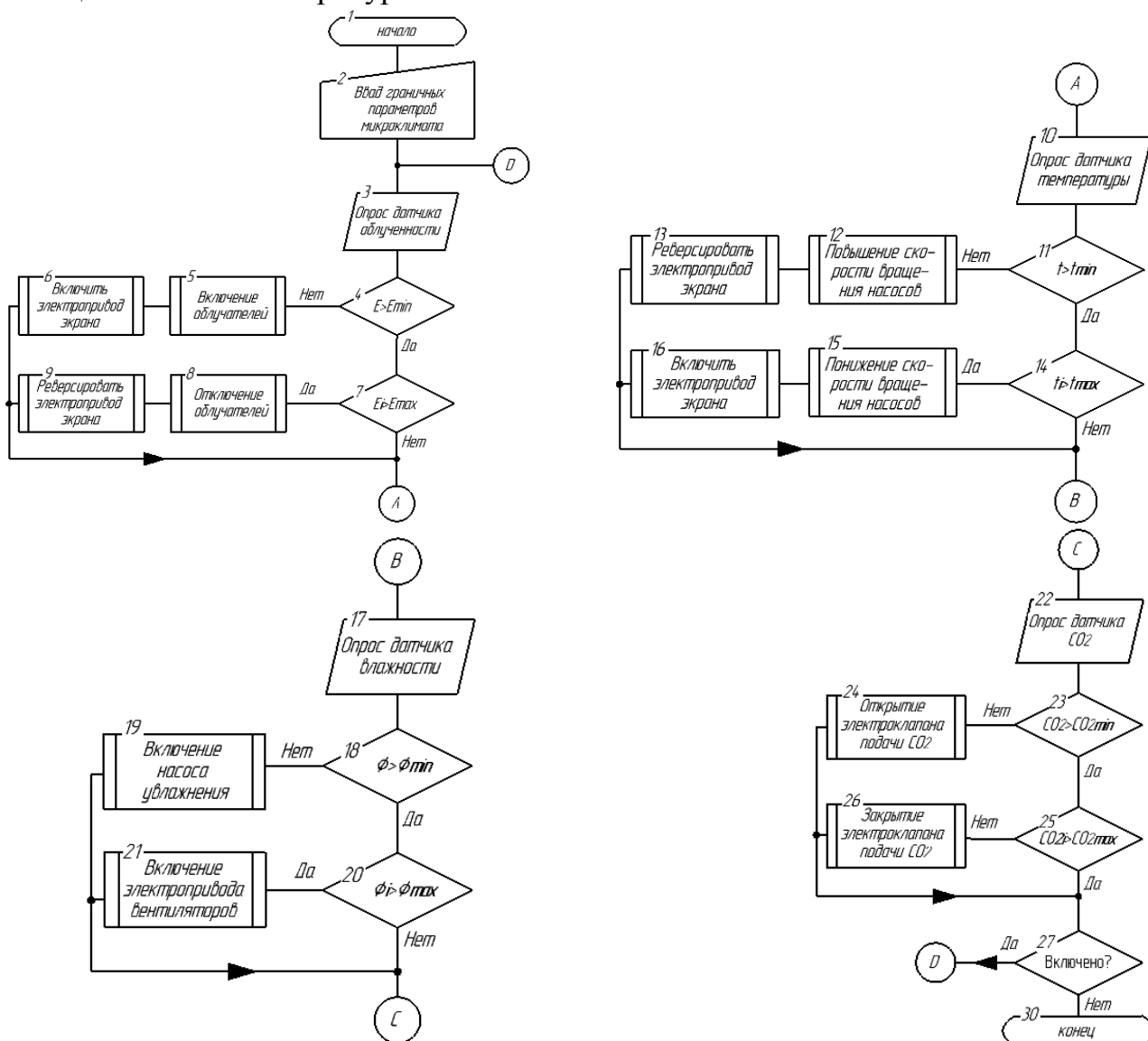


Рисунок 7 Взаимосвязанный алгоритм управления микроклиматом в защищенном грунте

При вводе данных с датчиков освещенности, температуры наружного воздуха и воздуха сооружения защищенного грунта, влажности и концентрации CO<sub>2</sub> микроконтроллер определяет значение параметров микроклимата и затем в соответствии с агротехнологическими требованиями выдает управляющие воздействия на электрооборудование.

Для программирования микроконтроллера и реализации этого алгоритма был применен язык программирования «Функциональных блоковых диаграмм» (FBD). Этот язык программирования микроконтроллеров является удобным

также для создания и пополнения библиотеки типовых функциональных блоков, которую можно многократно использовать при программировании задач промышленной автоматизации электрооборудования. В качестве среды программирования мы выбрали CoDeSys отечественного производства, т.к. иностранные производители предлагают устаревшие версии, а CoDeSys, проходят систематические обновления.

Работа с отечественным производителем более удобна, т.к. поздние версии ПЛК будут поддерживать, разработанные ранее программы без их систематического обновления.

Основной задачей предложенного в нашей работе алгоритма в программный комплекс CoDeSys является реализация математической модели, выражение (21). С помощью стандартных математических блоков в первой диалоговой строке программной среды переведем модель из математической формы в язык, воспринимаемый компьютером (рисунок 8). Таким образом, микроконтроллер может рассчитать температуру воздуха во всем рабочем объеме сооружения защищенного грунта, получая данные с датчиков температуры.

**В пятой главе** для проведения оценки работы электрооборудования при создании микроклимата проведен анализ технико-экономического производства на примере ОАО «Тепличный комбинат «Завьяловский» на двух участках.

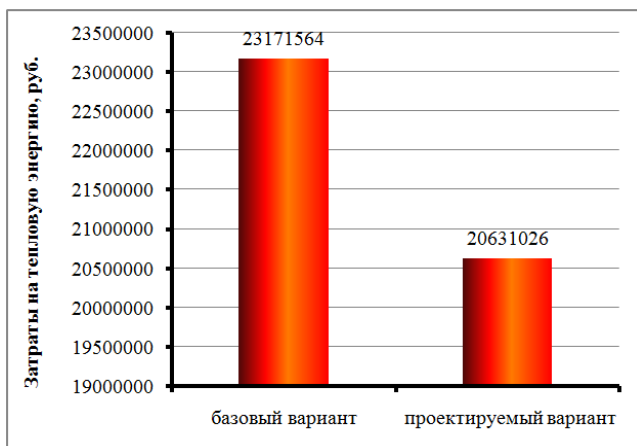


Рисунок 9 Затраты на тепловую энергию сооружением 15000 м<sup>2</sup> в 2014 году

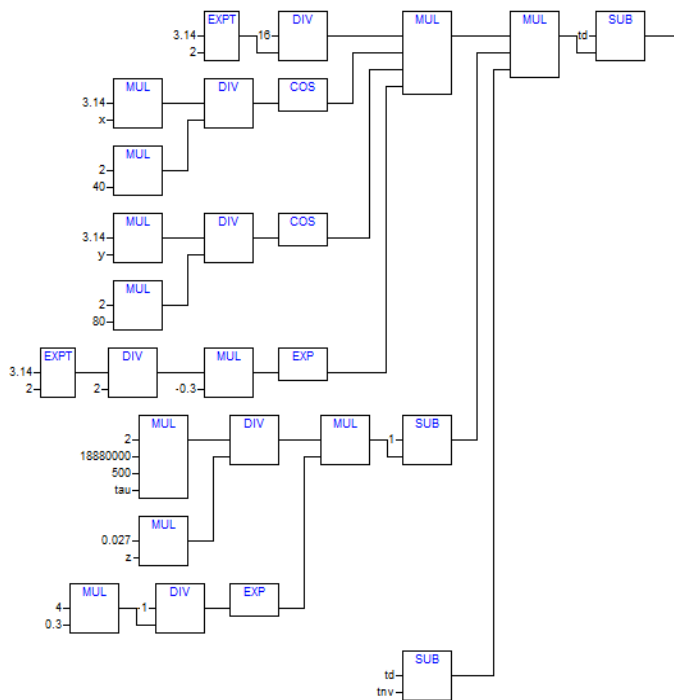


Рисунок 8 Математическая модель в программной среде CoDeSys

Это типовые промышленные теплицы площадью 1,58 га, построенных по типовому проекту 373Д-60/2012, полезной площадью 15000 м<sup>2</sup>.

На одном участке нами была внедрена система управления работой электрооборудования для поддержания микроклимата с учетом их взаимного влияния и применением предложенного нами способа энергоэффективного режима работы энергетического экрана. Далее он представлен как «проектируемый вариант». Теплица, где работа электрооборудованием осу-

ществлялась по существующей технологии, обозначен как «базовый вариант».

Производственные испытания показали, что внедрение микроконтроллера с усовершенствованным алгоритмом управления работой электропривода энергетического экрана и электрооборудования для поддержания микроклимата в сооружении защищенного грунта площадью 15000 м<sup>2</sup> позволит снизить затраты на тепловую энергию на 10,62% (рисунок 9). Следовательно, при капитальных затратах в 84 213,79 рублей, экономия потребления тепловой энергии составит 2 540 538 рублей с сооружения защищенного грунта площадью 15 000 м<sup>2</sup>. При этом окупаемость оборудования для модернизации составит один год.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Анализ работы электрооборудования в сооружениях защищенного грунта показал, что существует возможность снижения потребления энергетических ресурсов, за счет согласованной работы существующего оборудования, которая осуществляется ПЛК с учетом, изменяющихся внешних условий, а предложенный нами энергоэффективный режим работы энергетического экрана в зимний период позволяет снизить затраты энергии на отопление сооружения защищенного грунта до 10%.
2. Разработана математическая модель температурного поля, описывающая изменение температуры в рабочем объеме сооружения защищенного грунта в зависимости от внешних условий окружающей среды и позволяющая с помощью ПЛК оперативно управлять работой существующего электрооборудования для поддержания требуемых параметров микроклимата. Расчеты показали, что при повышении естественной облученности до 2 клк повышается температура на 2...2,5 °С, а повышение температуры на 1°С снижает влажность воздуха на 2%, что подтверждается экспериментально полученными данными.
3. Разработаны алгоритм работы и программа для ПЛК, позволяющие повысить эффективность работы существующего электрооборудования для систем поддержания микроклимата в защищенном грунте за счет согласованного режима работы, что позволило снизить потребление тепловой энергии на 10...12% в сооружениях защищенного грунта площадью 15 000 м<sup>2</sup>.
4. Испытания по повышению эффективности работы существующего электрооборудования в согласованном режиме за счет разработанной программы для ПЛК с гибкой иерархической структурой по блочно-модульному принципу перестраиваемой в режиме реального времени при изменении технологических задач, позволили сэкономить на 10...12 % расходы на ТЭР и повышении продуктивности культуры огурца на 8%.
5. Техничко-экономические расчеты показали, что применение предлагаемых технических решений позволяет снизить затраты на тепловую энергию в сооружениях защищенного грунта площадью 15 000 м<sup>2</sup> на 169,4 руб./м<sup>2</sup> в год со сроком окупаемости около одного года.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

**В изданиях из перечня ВАК:**

1. Логинов, В.В. Энергосберегающий режим работы отопительно-вентиляционных установок в теплицах. [Текст]/ Владыкин И.Р // Безопасность труда в промышленности. 2012, №4, С. 23-26.
2. Логинов, В.В. Температурно-влажностный режим работы отопительно-вентиляционных установок в теплицах. [Текст]/ Владыкин И.Р., Логинов В.В., Евтишин В.А., Елесин И.С // Безопасность труда в промышленности. 2013, №3, С. 53-56.
3. Логинов, В.В. Взаимосвязанная система управления отопительно-вентиляционными установками в защищенном грунте. [Текст]/ Владыкин И.Р., Кондратьев Р.Г., Логинов В.В., Евтишин В.А., Елесин И.С. // Инженерный вестник Дона. 2013, Т. 24, №1 (24), С. 17-22.

**Патенты**

4. Светодиодная система для облучения меристемных растений [Текст]/ Патент на полезную модель №127286. Заявка №2012130687/ Юран С.И., Кондратьева Н.П., Владыкин И.Р., Логинов В.В., Кондратьев Р.Г., Маркова М.Г., Валеев Р.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА.
5. Взаимосвязанное управление параметрами микроклимата защищенного грунта [Текст]/ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661513. Заявка № 2015617389/69 от 24.09.2015 года/ Владыкин И.Р.; Кондратьева Н.П.; Краснолуцкая М.Г.; Логинов В.В.; Баранова И.А.; Большин Р.Г.; заявитель и правообладатель НОУ ДПО «УНИЦ «ОМЕГА».

**В изданиях:**

6. Логинов, В.В. Энергосберегающий режим работы отопительно-вентиляционных установок в защищенном грунте. [Текст]/ Владыкин И.Р // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 35-летию факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства «Инновационные электротехнологии и электрооборудование – предприятиям АПК», Ижевск апрель, 2012 г., с. 60-68.
7. Логинов, В.В. Повышение качества энергосберегающих режимов работы отопительно-вентиляционных электроустановок в защищенном грунте. [Текст]/ Владыкин И.Р // Труды 8-й Международной научно-технической конференции (16-17 мая 2012 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Часть 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике, с. 177-182.
8. Логинов, В.В. Термографическое обследование ограждающих конструкций защищенного грунта. [Текст]/ Владыкин И.Р // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА «Научное обеспечение АПК. Итоги и перспективы» 16-18 октября 2013 г., Том II, С. 3-7.

9. Логинов, В.В. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций теплиц. [Текст]/ Владыкин И.Р. // Труды 9-й Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию академика И.Ф. Бородинна «Энергообеспечение и энергосбережение в с.-х.» (21-22 мая 2014 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ) Часть 2, С. 162-167.

**В изданиях за рубежом:**

10. Loginov V. The thermo vision inspection of protective structures of greenhouses. [Text]/ Vladykin I, Kochurova O. // **Science**, Technology and Higher Education [Text] : materials of the V International research and practice conference, Westwood, June 20<sup>th</sup>, 2014 / publishing office Accent Graphics communications – Westwood – Canada, P. 30-34.
11. Loginov V. Mathematical model of temperature field in a greenhouse. [Text]/ Vladykin I, Kochurova O. // Yale Review of Education and Science, 2015, No.1. (16), (January-June). Volume VI. “Yale University Press”, 2015. – Connecticut, USA, P. 157-164.