

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление и проектиро-  
вание»

УТВЕРЖДАЮ  
ведущий кафедрой

За-

\_\_\_\_\_ С.В. Ченцов

« \_\_\_\_\_ » июня 2018 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

### РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВ- НОСТИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИФ- ФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Направление 09.04.02 «Информационные системы и технологии»  
Магистерская программа 09.04.02.02 Информационные системы и технологии в  
управлении технологическими процессами

Научный руководитель _____	____.06.2018	доц., канд. физ.-мат. наук А. Ш. Любанова
Выпускник _____	____.06.2018	Л. А. Тюлюш
Рецензент _____	____.06.2018	канд. физ.-мат. наук А. В. Шмидт
Нормоконтролер _____	____.06.2018	Т. А. Грудинова

Красноярск 2018

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Разработка экспертной системы для оценки эффективности сети электроснабжения на основе метода дифференциальной эволюции» содержит 85 страниц текстового документа, 4 приложения, 31 использованный источник.

МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ, СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ, ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.

Цель исследования: разработка методики экспертизы и создание экспертной системы для оптимизации потребления энергии электрооборудованием в электрических сетях на основе метода дифференциальной эволюции.

Задачи исследования:

- определить критерии оптимизации сети электроснабжения и связи между ними;
- разработать математическую модель принятия решения;
- адаптировать метод дифференциальной эволюции для оптимизации сетей электроснабжения;
- разработать экспертную систему оценки эффективности сети электроснабжения для производственного участка цеха за счет минимизации приведенных затрат методом дифференциальной эволюции без учета затрат на потери в линиях электропередач, потери освещения и внутренние потери в проводниках.

В результате проведенного исследования была разработана методика выбора оптимального электрооборудования для сети, на основе которой разработано программное приложение «Сети электроснабжения» – экспертная система для оценки эффективности сетей электроснабжения на основе метода дифференциальной эволюции.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Экспертные системы и современные методы управления .....	8
1.1 Экспертные системы .....	8
1.2 Современные методы управления техническими .....	23
системами.....	23
1.3 Цель работы и постановка задачи.....	25
1.3.1 Цель и актуальность работы .....	25
1.3.2 Формулировка задачи .....	26
1.3.3 Исходные данные .....	26
1.3.4 Выходные данные .....	27
1.3.5 Используемые методы .....	28
1.4 Выводы по разделу .....	28
2 Моделирование экспертной системы .....	30
2.1 Метод дифференциальной эволюции.....	30
2.2 Особенности электрической сети как системы .....	33
2.3 Модель управления сетью .....	36
2.3.1 Структура сети.....	36
2.3.2 Критерии эффективности .....	38
2.3.3 Модель принятия решения.....	42
2.3.4 Модели данных и знаний .....	46
2.3.5 Алгоритмы принятия решения .....	47
2.4 Выводы по разделу .....	49
3 Разработка программного обеспечения экспертной системы.....	51
3.1 Проектирование справочной базы данных .....	51
3.2 Выбор и обоснование среды программирования.....	52
3.3 Структура информационных потоков .....	55
3.4 Проектирование экспертной системы .....	56
3.4.1 Описание основных модулей и взаимодействие между ними .....	56
3.4.2 Модуль авторизации .....	56

3.4.4	Модуль расчета.....	58
3.4.5	Модуль сохранения данных .....	59
3.4.6	Модуль администрирования .....	59
3.4.7	Модуль вывода данных .....	60
3.4.8	Справочный модуль .....	61
3.5	Порядок работы программы.....	62
3.5.1	Численный эксперимент.....	62
3.5.2	Руководство пользователя.....	64
	Заключение .....	71
	Список использованных источников .....	72
	Приложение А .....	76
	Приложение Б.....	77
	Приложение В.....	78
	Приложение Г .....	81

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования электрических сетей требует обработки большого количества информации. Чем больше вариантов использования будет рассмотрено, тем более подходящее решение будет найдено. Полный процесс проектирования без использования ЭВМ требует большого количества времени, а так же увеличивает вероятность ошибки в расчетах, что может привести либо к выбору электрооборудования недостаточной мощности, а вследствие этого – к его поломке при эксплуатации, либо к выбору электрооборудования с намного большим объемом потребления электроэнергии, чем это необходимо для работы, что повлечет за собой перерасход средств на оплату электроэнергии.

В данный момент внимание уделяется вопросу сокращения времени поиска подходящих двигателей и трансформаторов при проектировании электрических сетей и автоматизации выбора оптимального электрооборудования. Решением этого вопроса может стать специально разработанная экспертная система.

В связи с этим основной целью данной работы является разработка методики экспертизы и создание экспертной системы для оптимизации потребления энергии электрооборудованием (трансформаторами и двигателями) в электрических сетях на основе метода дифференциальной эволюции.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить структуру и особенности разработки современных экспертных систем;
- провести анализ основных параметров электрооборудования;
- определить критерии оптимизации сети электроснабжения и связи между ними;
- разработать математическую модель принятия решения;
- адаптировать метод дифференциальной эволюции для оптимизации сетей электроснабжения;
- разработать структуру базы данных;

- разработать способы представление и организация знаний;
- спроектировать экспертную систему оптимизации энергозатрат;
- разработать экспертную систему оценки эффективности сети электро-снабжения для производственного участка цеха за счет минимизации приведенных затрат методом дифференциальной эволюции без учета затрат на потери в линиях электропередач, потери освещения и внутренние потери в проводниках.

Данная работа состоит из следующих разделов: введение, аналитическая часть, специальная часть, заключение, список использованных источников и приложения.

В первом разделе приведены основные сведения об экспертных системах и их проектировании, обзор существующих экспертных систем по назначению, постановка задачи.

Второй раздел содержит анализ предметной области и методов, используемых в работе, описание электрической схемы и основные критерии эффективности, математическую модель и алгоритмы принятия решения.

Третий раздел посвящен проектированию экспертной системы, которое включает в себя анализ информационных потоков в системе, разработку структуры программы «Сети электроснабжения», описание модулей программы и структуры базы данных.

Результаты работы планируется использовать в учебном процессе для выполнения курсового и дипломного проектирования, а также при проектировании электрических сетей для сокращения потребления энергозатрат.

# **1 Экспертные системы и современные методы управления**

## **1.1 Экспертные системы**

В середине семидесятых годов в исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление, получившее название экспертные системы.

На основе рассмотренных работ и определений различных исследователей, было выбрано следующее значение данного понятия:

Экспертные системы - это прикладные программы области искусственного интеллекта, в которых база знаний представляет собой формализованные эмпирические знания высококвалифицированных специалистов в какой-либо узкой предметной области. Экспертные системы предназначены для замены экспертов при решении профессионально сложных задач в силу недостаточного количества специалистов, недостаточной оперативности при принятии решений экспертами или из-за присутствия негативных факторов, которые могут влиять на работу специалистов.

Обычно экспертные системы рассматриваются с точки зрения их применения в двух аспектах: для решения конкретных задач, где они могут быть использованы и в какой области деятельности.

### **1.1.1 Классификация экспертных систем**

Классификацию экспертных систем проводят по четырем признакам: по решаемой задаче, по связи с реальным временем, по типу ЭВМ и по степени интеграции. Общая классификация экспертных систем представлена на рисунке 1.1. Рассмотрим более детально классификацию по каждому признаку.

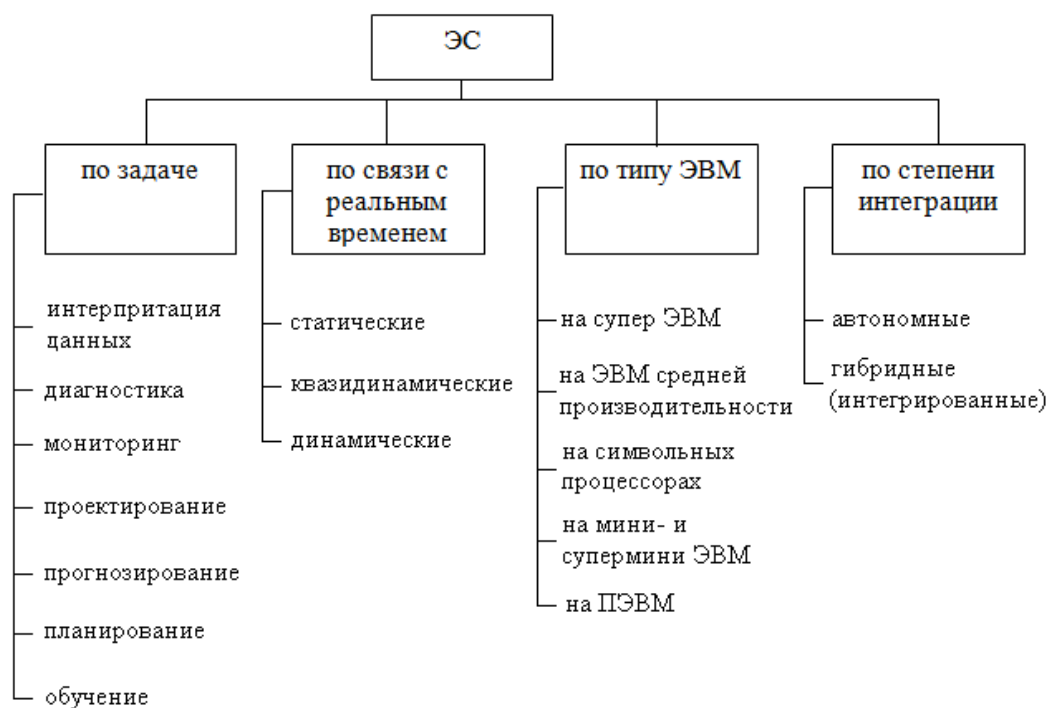


Рисунок 1.1 – Классификация экспертных систем по областям применения

### *Классификация по решаемой задаче*

По решаемой задаче экспертные системы подразделяются на семь видов.

Интерпретация данных – одна из традиционных задач для экспертных систем. Под интерпретацией понимается определение смысла данных, результаты которого должны быть согласованными и корректными. Обычно предусматривается многовариантный анализ данных.

Пример: HASP/SIAP - интерпретирующая система, которая определяет местоположение и типы судов в Тихом океане по данным акустических систем слежения.

Экспертные системы диагностики. Под диагностикой понимается обнаружение неисправности в некоторой системе, т.е. отклонение от нормы. Такая трактовка позволяет с единых теоретических позиций рассматривать и неисправность оборудования в технических системах, и заболевания живых организмов, и всевозможные природные аномалии.



Пример: *Simptomius* - сервис онлайн-диагностики заболеваний. Пациенты указывают симптомы, а *Simptomus* на основе экспертной системы выводит список возможных диагнозов.

Основная задача экспертных систем мониторинга - непрерывная интерпретация данных в режиме реального времени и сигнализация о выходе тех или иных параметров за допустимые пределы.

Пример: *REACTOR* – помощь диспетчерам атомного реактора.

Задача экспертных систем проектирования состоит в подготовке спецификаций на создание «объектов» с заранее определёнными свойствами. Под спецификацией понимается весь набор необходимых документов - чертёж, пояснительная записка и так далее. Для организации эффективного проектирования и, в ещё большей степени, перепроектирования необходимо формировать не только сами проектные решения, но и мотивы их принятия. Таким образом, в задачах проектирования тесно связываются два основных процесса, выполняемых в рамках соответствующей экспертной системы: процесс вывода и процесс объяснения.

Пример: *XCON* (или *R1*) – проектирование конфигураций ЭВМ *VAX* – 1/780/

Прогнозирующие системы логически выводят вероятные следствия из заданных ситуаций. В прогнозирующей системе обычно используется параметрическая динамическая модель, в которой значения параметров «подгоняются» под заданную ситуацию. Выводимые из этой модели следствия составляют основу для прогнозов с вероятностными оценками.

Пример: *ECON* – прогнозы в экономике.

Под системами планирования понимается нахождение планов действий, относящихся к объектам, способным выполнять некоторые функции. В таких экспертных системах используются модели поведения реальных объектов с тем, чтобы логически вывести последствия планируемой деятельности.

Пример: *STRIPS* – планирование поведения робота.

Системы обучения диагностируют ошибки при изучении какой-либо дисциплины с помощью ЭВМ и подсказывают правильные решения. Они аккумулируют знания о гипотетическом «ученике» и его характерных ошибках, затем в работе способны диагностировать слабости в знаниях обучаемых и находить соответствующие средства для их ликвидации. Кроме того, они планируют акт общения с учеником в зависимости от успехов ученика с целью передачи знаний.

Пример: PROUST – обучение языку Паскаль

В общем случае все системы, основанные на знаниях, можно подразделить на системы, решающие задачи анализа, и на системы, решающие задачи синтеза. Основное отличие задач анализа от задач синтеза заключается в следующем: если в задачах анализа множество решений может быть перечислено и включено в систему, то в задачах синтеза множество решений потенциально строится из решений компонентов или подпроблем. Задача анализа - это интерпретация данных, диагностика; к задачам синтеза относятся проектирование, планирование. Комбинированные задачи: обучение, мониторинг, прогнозирование.[8]

*Классификация по связи с реальным временем*

По связи с реальным времени экспертные системы подразделяются на статические, квазидинамические и динамические.

Статические ЭС используются для предметных областей, в которых база знаний и интерпретируемые данные не меняются во времени. Они стабильны.

Квазидинамические ЭС интерпретируют ситуацию, которая изменяется с некоторым фиксированным интервалом времени.

Динамические ЭС работают в сопряжении с датчиками объектов в режиме реального времени. Такие ЭС работают с непрерывной интерпретацией поступающих в нее данных.

*Классификация по типу ЭВМ*

На сегодняшний день существуют следующие экспертные системы по типу ЭВМ:

- ЭС для уникальных стратегически важных задач на суперЭВМ (Эльбрус, CRAY, CONVEX и др.);
- ЭС на ЭВМ средней производительности (типа ЕС ЭВМ, mainframe);
- ЭС на символьных процессорах и рабочих станциях (SUN, Silicon Graphics, APOLLO);
- ЭС на мини- и супермини-ЭВМ (VAX, micro-VAX и др.);
- ЭС на персональных компьютерах (IBM PC, MAC II и т. п.).

#### *Классификация по степени интеграции с другими программами*

По степени интеграции с другими программами экспертные системы можно разделить на автономные и гибридные.

Автономные ЭС работают непосредственно в режиме консультаций с пользователем для специфически «экспертных» задач, для решения которых не требуется привлекать традиционные методы обработки данных (расчеты, моделирование и т. д.).

Гибридные ЭС представляют программный комплекс, агрегирующий стандартные пакеты прикладных программ (например, математическую статистику, линейное программирование или системы управления базами данных) и средства манипулирования знаниями. Это может быть интеллектуальная надстройка над пакетами прикладных программ или интегрированная среда для решения сложной задачи с элементами экспертных знаний [8].

### **1.1.2 Структура экспертных систем**

Обобщенная структура экспертной системы представлена на рисунке 1.2. Следует учесть, что реальные экспертные системы могут иметь более сложную структуру, однако блоки, изображенные на рисунке, непременно присутствуют в любой экспертной системе. В целом процесс функционирования можно представить следующим образом: пользователь, желающий получить нужную информацию, через пользовательский интерфейс посылает запрос к ЭС; решатель, пользуясь базой знаний, генерирует и выдает пользователю под-

ходящую рекомендацию, объясняя ход своих рассуждений при помощи подсистемы объяснений.

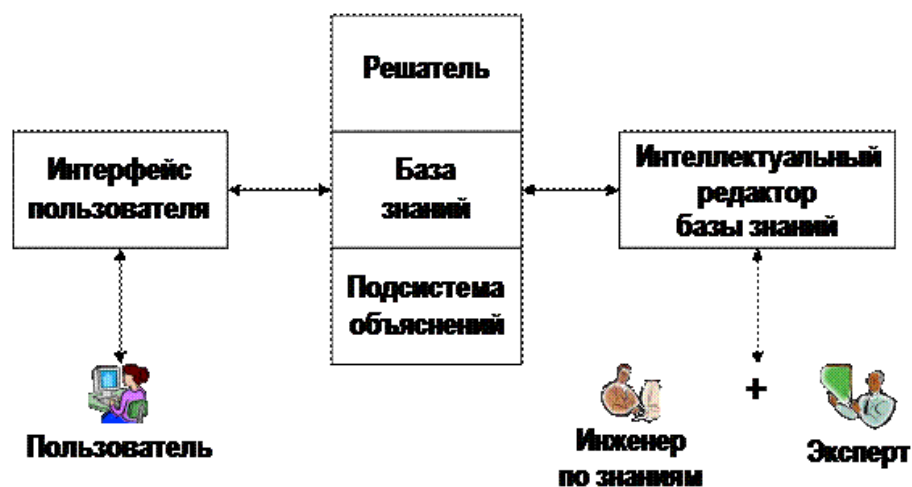


Рисунок 1. 2 – Структура экспертной системы

Так как терминология в области разработки ЭС постоянно модифицируется, определим основные термины в рамках данной работы.

Пользователь – специалист предметной области, для которого предназначена система. Обычно его квалификация недостаточно высока, и поэтому он нуждается в помощи и поддержке своей деятельности со стороны ЭС.

Инженер по знаниям – специалист в области искусственного интеллекта, выступающий в роли промежуточного буфера между экспертом и базой знаний.

Интерфейс пользователя – комплекс программ, реализующих диалог пользователя с экспертной системой как на стадии ввода информации, так и при получении результатов.

База знаний – ядро экспертной системы, совокупность знаний предметной области, записанная на машинный носитель в форме, понятной эксперту и пользователю (обычно на некотором языке, приближенном к естественному). Параллельно такому «человеческому» представлению существует БЗ во внутреннем «машинном» представлении.

Решатель – программа, моделирующая ход рассуждений эксперта на основании знаний, имеющихся в базе знаний. Синонимы: дедуктивная машина, машина вывода, блок логического вывода.

Подсистема объяснений – программа, позволяющая пользователю получить, понять, как была получена рекомендация и почему принято такое решение. Ответом на как получено решение является получения решения с указанием всех шагов цепи умозаключений. Ответом на вопрос почему принято то или иное решение есть ссылка на умозаключение, непосредственно предшествовавшее полученному решению, то есть отход на один шаг назад. Развитые подсистемы объяснений поддерживают и другие типы вопросов.

Интеллектуальный редактор базы знаний – программа, представляющая инженеру по знаниям возможность создавать базу знаний в диалоговом режиме. Включает в себя систему вложенных меню, шаблонов языка представления знаний, подсказок и других сервисных средств, облегчающих работу с базой [8].

Система, объявленная разработчиками как экспертная, считается такой только наличие всех блоков из рисунка 1.2 и гарантирует реальное использование аппарата обработки знаний. Однако промышленные прикладные экспертные системы могут быть существенно сложнее и дополнительно включать базы данных, интерфейсы обмена данными с различными пакетами прикладных программ, электронными библиотеками и т. д.

Знания, передаваемые экспертной системе, можно делить на три категории.

К первой относят концептуальное (на уровне понятий) знание – это знание, воплощенное в словах человеческой речи или, конкретнее, – о в научно-технических терминах и, естественно, в стоящих за этими терминами классах и свойствах объектов окружающей среды. Сюда же входят связи, отношения и зависимости между понятиями и их свойствами, причем связи абстрактные, также выраженные словами и терминами.

Вторая категория – фактуальное, предметное знание – это совокупность сведений о качественных и количественных характеристиках конкретных объектов. Любое знание несет информацию и может быть представлено в виде данных. Современную форму накопления данных принято называть базами данных. Для организации баз данных, для поиска в них нужной информации надо опираться на концептуальное знание.

Третью категорию представляет алгоритмическое, процедурное знание – в вычислительном деле алгоритмическое знание реализуется в виде алгоритмов, программ и подпрограмм, которые могут передаваться из рук в руки и использоваться без участия авторов. Такая реализация алгоритмического знания называется программным продуктом. Организация и использование пакетов прикладных программ базируется на концептуальном знании [19].

### **1.1.3 Сравнительная характеристика экспертных систем и человека – эксперта**

Для того чтобы выявить достоинства и недостатки использования экспертных систем, проанализировав источники, составим сравнительную характеристику разных показателей, представленных в таблице 1. 1.

Таблица 1.1 - Сравнительная характеристика ЭС и человека-эксперта

№	Показатель	Человек-эксперт	Экспертная система
1	2	3	4
1	Постоянство	Человеческая компетенция ослабевает со временем. Перерыв в деятельности человека - эксперта может серьезно отразиться на его профессиональных качествах.	Экспертная система документирует процесс решения и выполнять обзор всех транзакций, а человек - эксперт может сделать обзор только отдельной выборки.

Окончание таблицы 1.1.

1	2	3	4
2	Лёгкость передачи	Передача знаний от одного человека другому – долгий и дорогой процесс.	Передача искусственной информации – это процесс копирования .
3	Устойчивость и воспроизводимость результатов	Человек же легко поддается влиянию внешних факторов, которые непосредственно не связаны с решаемой задачей. Эксперт - человек может принимать в тождественных ситуациях разные решения из-за эмоциональных факторов.	Экспертные системы устойчивы к «помехам». Результаты экспертной системы – стабильны. Можно сделать любое количество копий экспертной системы, а обучение новых экспертов отнимает много времени и средств..
4	Стоимость	Привлечение экспертов, особенно высококвалифицированных, связано с высокими финансовыми затратами.	Дают возможность для увеличения производительности и снижения расходов на персонал, но разработка может быть дорогостоящей.
5	Обучение	Человек - эксперт автоматически адаптируется к изменению среды.	Экспертные системы нужно модифицировать.
6	Возможность получения экспертных знаний из многих источников	Используются знания одного человека-эксперта.	Уровень экспертных знаний , скомбинированных путем объединения опытов нескольких экспертов , может превышать уровень знаний отдельно взятой эксперта-человека.
7	Объяснение	Эксперт-человек может оказаться неспособным объяснить свои выводы.	Экспертная система способна детально объяснить свои соображения, которые привели к определенному выводу.

Следует отметить, что экспертные системы обладают недостатками по сравнению с человеком – экспертом: здравый смысл, творческий потенциал, сенсорный опыт. В дополнение к широкому техническому знанию, человек – эксперт имеет здравый смысл. Человек – эксперт может реагировать творчески на необычные ситуации, экспертные системы такой способностью не обладают. Человек – эксперт располагает широким диапазоном сенсорного опыта; экспертные системы в настоящее время основаны на вводе символов.

#### **1.1.4 Отличие экспертных систем от традиционных программ**

Моделирование механизма мышления человека применительно к решению задач в проблемной области существенно отличает экспертные системы от систем математического моделирования или компьютерной анимации. Программа не полностью воспроизводит психологическую модель специалиста в этой предметной области (эксперта), но важно, что основное внимание отведено воспроизведению компьютерными средствами методики решения проблем, которая применяется экспертом, т.е. выполнению некоторой части задач так же (или даже лучше), как это делает эксперт.

Система, помимо выполнения вычислительных операций, формирует определенные соображения и выводы, основываясь на тех знаниях, которыми она располагает. Знания в системе представлены, как правило, на некотором специальном языке и хранятся отдельно от собственно программного кода, который и формирует выводы и соображения. Этот компонент программы принято называть базой знаний.

При решении задач основными являются эвристические и приближенные методы, которые, в отличие от алгоритмических, не всегда гарантируют успех. Эвристика является правилом влияния, которое в машинном виде представляет некоторое знание, приобретенное человеком по мере накопления практического опыта решения аналогичных проблем. Такие методы не требуют исчерпывающей исходной информации, а также существует определенная сте-



пень уверенности (или неуверенности) в том, что предлагаемое решение является верным.

Экспертные системы отличаются от традиционных систем тем, что они содержат знания в определенной предметной области, накопленные в результате практической деятельности человека, и используют их для решения проблем, специфичных для этой области.

Экспертные системы отличаются и от других видов программ искусственного интеллекта.

Экспертные системы имеют дело с предметами реального мира, операции с которыми обычно требуют наличия значительного опыта, накопленного человеком. Множество программ из области искусственного интеллекта являются исследовательскими, где основное внимание в них уделяется абстрактным математическим проблемам или упрощенным вариантам реальных проблем, а целью выполнения такой программы является отработка методики. Экспертные системы имеют ярко выраженную практическую направленность в научной или коммерческой области.

Одной из основных характеристик экспертной системы является ее производительность, т.е. скорость получения результата и его достоверность (надежность). Исследовательские программы искусственного интеллекта – это инструмент исследования, а не программный продукт, поэтому они могут быть не очень быстрыми, а также не исключаются возникающие в них отказы. Экспертная система должна за приемлемое время найти решение, которое было бы не хуже, чем то, которое может предложить специалист в этой предметной области.

Экспертная система должна обладать способностью объяснить, почему предложено именно такое решение, и доказать его обоснованность.

Экспертная система проектируется в расчете на взаимодействие с разными пользователями, для которых ее работа должна быть, по возможности, прозрачной.

Разработка экспертной системы имеет существенные отличия от разработки обычного программного продукта. Использование методологии разработки, принятой в традиционном программировании, неэффективны для экспертных систем, так как затягивают процесс создания, либо приводит к отрицательному результату. Неформализованность задач, решаемых экспертными системами, отсутствие завершённой теории и методологии их разработки приводят к необходимости модифицировать принципы и способы построения экспертной системы в ходе процесса разработки по мере того, как увеличивается знание разработчиков о проблемной области.

### 1.1.5 Процесс разработки: проблемы и перспективы

На основе анализа работ [6, 7, 29, 30] было выявлено, что экспертные системы объединяют в себе такие передовые методы искусственного интеллекта, как методы представления знаний в формализованном виде; методы логического вывода; научные методы эвристического поиска; распознавания предложений на естественном языке и др.

В настоящее время сложилась определенная технология разработки экспертных систем, которая включает шесть этапов. Описание этапов разработки экспертных систем представлено в таблице 1. 2.

Таблица 1. 2 – Этапы разработки экспертных систем

№	Этап	Описание
1	2	3
1	Постановка задачи	Определяет проблемную область и задачи; происходит поиск задействованных в работе лиц (эксперт, разработчик, инженер по знаниям); выбирается подход к решению проблемы и анализируются экономические показатели; составляется план.

Окончание таблицы 1.2.

1	2	3
2	Разработка прототипа и его доработка	Доведение тестового прототипа до промышленной системы. Также стоит учесть, что создание прототипа производится пошагово и будет описано ниже
3	Оценка	Оценку производят с точки зрения пользователей, разработчиков и приглашенных специалистов, в первую очередь учитывая, точность и полезность системы.
4	Стыковка	Отвечает за взаимосвязь между экспертной системой с существующими базами данных и другими системами предприятия. Процесс стыковки предполагает улучшение системных показателей, зависящих от времени, для обеспечения эффективной работы. Также этап предполагает обучение пользователей системы для дальнейшей эксплуатации и обслуживания.
5	Поддержка	Этап целесообразен при дальнейшем развитии и усовершенствовании системы.

Главное в создании прототипа заключается в том, чтобы этот прототип обеспечил проверку адекватности идей, методов и способов представления знаний решаемым задачам. Создание первого прототипа должно подтвердить, что выбранные методы решений и способы представления знаний пригодны для успешного решения задачи или ряда задач из актуальной предметной области, а также продемонстрировать тенденцию к получению эффективных решений для всех задач предметной области по мере увеличения объема знаний. На рисунке 1.3 показаны этапы создания прототипа и связи между ними.

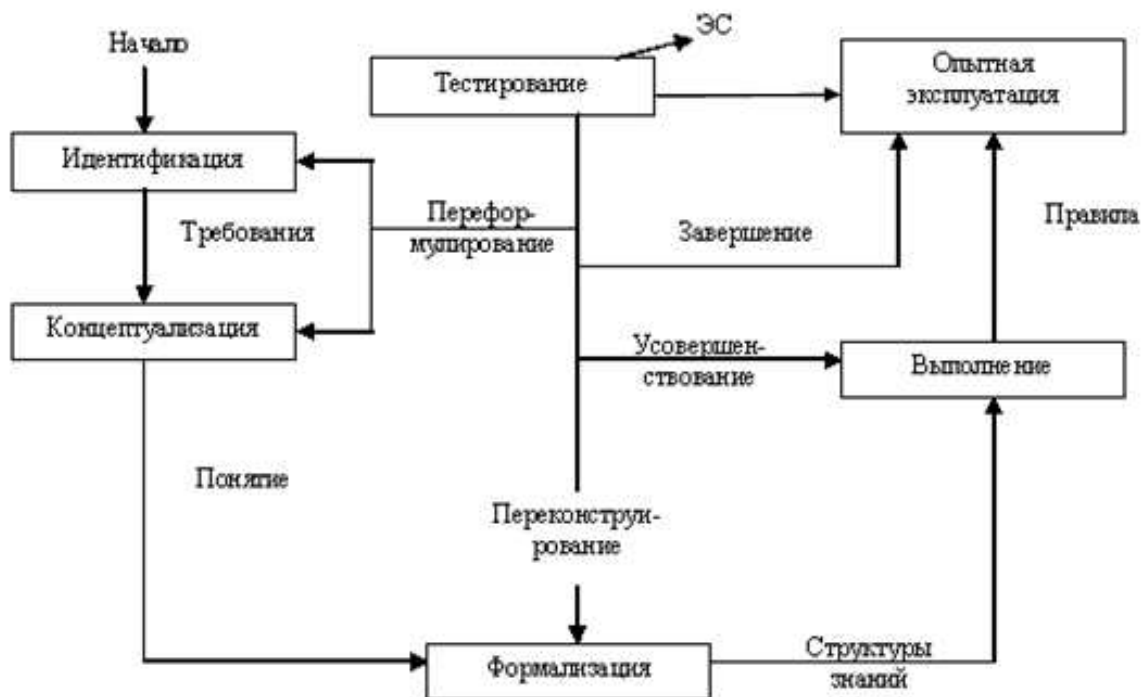


Рисунок 1. 3 – Этапы разработки прототипа экспертной системы

Этапы разработки прототипа экспертной системы включают идентификацию проблемы, извлечение и структурирование знаний, формализацию, реализацию и тестирование. В таблице 1.3 описаны технические проблемы, решаемые на каждом из этапов разработки прототипа экспертной системы.

Таблица 1.3 – Этапы создания прототипа экспертной системы и их назначение

Название этапа	Содержание
Идентификация проблем	Определяются цели, задачи, разработки, определяются эксперты и типы пользователей.
Извлечение знаний	Проводится содержательный анализ проблемной области, выявляются понятия и их взаимосвязи, определяются методы решения задач.

### Окончание таблицы 1.3.

Структурирование знаний	Определяются способы представления всех видов знаний, определяются способы интерпретации знаний, моделируется работа системы, оценивается адекватность целям системы зафиксированных понятий, методов решений, средств представления и манипулирования знаниями.
Формализация	Осуществляется наполнение экспертом базы знаний. В связи с тем, что основной экспертных систем являются знания, данный этап является наиболее важным и наиболее трудоемким этапом разработки.
Реализация	Создается один или несколько типов системы, решающие требуемые задачи.
Тестирование	Производится оценка выбранного способа представления знаний в экспертной системе в целом.

Перед тем как приступить к разработке экспертной системы, инженер по знаниям должен оценить, следует ли разрабатывать экспертную систему для данного приложения, основываясь на следующих требованиях:

- существуют эксперты в данной области, которые решают задачу значительно лучше, чем начинающие специалисты;
- эксперты сходятся в оценке предлагаемого решения, иначе нельзя будет оценить качество разработанной экспертной системы;
- эксперты способны вербализовать (выразить на естественном языке) и объяснить используемые ими методы, в противном случае трудно рассчитывать на то, что знания экспертов будут переданы экспертной системе;
- решение задачи требует только рассуждений, а не действий;
- задача не должна быть слишком трудной (т.е. ее решение должно занимать у эксперта несколько часов или дней, а не недель);

- должны быть выделены основные понятия, отношения и известные способы получения решения задачи.

Применение экспертной системы может быть оправдано одним из следующих факторов: решение задачи принесет значительный эффект, например, экономический; использование человека-эксперта невозможно либо из-за недостаточного количества экспертов, либо из-за необходимости выполнять экспертизу одновременно в различных местах. Использование экспертной системы целесообразно в тех случаях, когда при передаче информации эксперту происходит недопустимая потеря времени или информации, а также при необходимости решать задачу в окружении, враждебном для человека.

## **1.2 Современные методы управления техническими системами**

Оптимизация (от лат. optimum – наилучший) – это процесс нахождения экстремума некоторой количественной величины (параметра) проектируемого объекта, представляемой в виде функции (функционала). Если эта функция характеризует положительное свойство объекта, то ищется максимальное ее значение, если отрицательное – то минимальное [5].

В задачах энергетики оптимизация – это стремление математически сформулировать наилучшие условия работы системы, представив их в виде целевой функции, и определить значения регулируемых параметров, соответствующих экстремальному значению целевой функции [24].

Если классифицировать стратегии поиска оптимума, то можно их разделить на четыре группы: аналитические, рекурсивные, итерационные, стохастические.

Аналитические методы находят применение при решении классических задач и задач с ограничениями в виде уравнений. Для решения задач без ограничений используют методы исследования производной функции. Путем приравнивания производной нулю отыскиваются точки экстремума, а затем иссле-

дуются точки с помощью второй производной для отыскания максимума. Метод эффективен при небольшом количестве переменных и ограничений; с увеличением числа переменных и ограничений возрастает сложность решения уравнений [24].

Рекурсивные методы относятся к методам, позволяющим определить одну переменную за одну расчетную операцию. Решение всей задачи осуществляется путем поочередного определения переменных.

Итерационные методы объединяют наибольшую группу методов поиска оптимумов. К ним относятся способы расчета функции цели в одной или нескольких вероятностных точках для определения оптимальной точки. Расчет выполняют до тех пор, пока не приблизятся к назначенному критерию на расстояние, меньшее некоторого заданного значения. Эти методы позволяют устанавливать только локальные оптимумы, однако они могут применяться в случаях, когда оптимизацию проводят в различных исходных точках. Оптимумы, определяемые этим способом, представляют собой достаточно точное решение относительно абсолютного оптимума.

Стохастические методы оптимизации (методы случайного поиска решений) включают процедуры накопления и обработки информации, в которые сознательно вводится элемент случайности. Преимущества этих методов заключаются в их простоте, надежности, достаточной точности и легкости программирования. В результате методы случайного поиска стали одними из наиболее эффективных методов оптимизации. Стохастические методы оптимизации применяются для различных задач технологического проектирования при наличии большого числа случайных факторов, которые не представляется возможным описать в традиционной математической форме [22].

## **1.3 Цель работы и постановка задачи**

### **1.3.1 Цель и актуальность работы**

При проектировании системы сети электроснабжения много времени занимают поиск нужной информации, произведения отчетов и их анализ. Поиск нужной информации сопровождается просмотром большого объема статей, справочников, методик расчета, списков электрооборудования, их характеристик и т.д.

При проектировании сети электроснабжения такой параметр, как потребление электроэнергии, является основным критерием выбора оборудования. От этого параметра зависит цена на обслуживание оборудования, а в следствии - цена на выпускаемую продукцию, что позитивно складывается на экономическом аспекте деятельности предприятия.

На сегодняшний день 80% энергии получают из природного топлива – нефти, газа, угля. Эти ресурсы, как известно, невозобновляемы. Следовательно, рано или поздно запасы этих земных богатств иссякнут, и к этому дню человечество должно быть готово перейти на другие источники энергии. Кроме этого, при сжигании ископаемого топлива в атмосферу выделяется существенное количество углекислого газа, что приводит к необратимым изменениям климата.

Снижение потребления электроэнергии дает не только выгоду от экономии на энергозатратах, но и сохранение запасов полезных ископаемых и улучшение экологии окружающей среды.

Целью работы является разработка методики экспертизы и создание экспертной системы для оптимизации потребления энергии электрооборудованием (трансформаторами и двигателями) в электрических сетях на основе метода дифференциальной эволюции.



### **1.3.2      Формулировка задачи**

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить структуру и особенности разработки современных экспертных систем;
- провести анализ основных параметров электрооборудования;
- определить критерии оптимизации сети электроснабжения и связи между ними;
- разработать математическую модель принятия решения;
- адаптировать метод дифференциальной эволюции для оптимизации сетей электроснабжения;
- разработать структуру базы данных;
- разработать способы представления и организация знаний;
- спроектировать экспертную систему оптимизации энергозатрат;
- разработать экспертную систему оценки эффективности сети электроснабжения для производственного участка цеха за счет минимизации приведенных затрат методом дифференциальной эволюции без учета затрат на потери в линиях электропередач, потери освещения и внутренние потери в проводниках.

### **1.3.3      Исходные данные**

В качестве входных данных используются справочники с основными электрическими показателями, структурная схема электрической сети и методический материал для расчетов.

В данной экспертной системе исходные данные делятся на 3 группы. Первая группа – это данные, вводимые пользователем, для оценки эффективности сети электроснабжения. В эту группу входят параметры: номинальная мощность трансформатора, номинальная мощность двигателя, коэффициент мощности двигателя, коэффициент полезного действия двигателя.

Вторая группа – это данные, описанные в исходном коде программы. Эта группа содержит: нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, единовременные капитальные вложения, количество трансформаторов, количество двигателей, стоимость трансформаторов, стоимость оборудования (двигателей).

Третья группа – это данные, содержащиеся в таблице базы данных, описывающие паспортные характеристики или данные из других нормативных документов (формуляры, сертификаты, инструкции, техническое описание и др). Третья группа включает: коэффициент расчетной мощности, амортизационные отчисления, коэффициент полезного действия трансформатора, коэффициент полезного действия двигателя, активные потери холостого хода трансформатора, активные потери короткого замыкания, коэффициент загрузки.

#### **1.3.4 Выходные данные**

Выходные параметры экспертной системы можно разделить на промежуточные и основные. К промежуточным параметрам относятся переменные, содержащие промежуточные расчеты, которые будут использованы для выбора трансформаторов и вычисления основных параметров. В эту группу входят: потери активной энергии в двигателях, потери активной энергии в трансформаторах, бегта коэффициент, полная расчетная мощность, полная расчетная активная мощность, полная расчетная реактивная мощность, ежегодные текущие затраты, сумма амортизационных отчислений и стоимости потерь электроэнергии, эффективное число электроприемников, средняя реактивная мощность.

Основные параметры – это данные, которые выводятся программой на экран компьютера. Они служат для краткого описания электрической сети и характеристик, на основе которых и была определена эффективность электрической сети. Группа основных параметров состоит из: списка типа трансформаторов, списка типа двигателей, номинальные мощности двигателей, КПД двигателей, номинальные мощности трансформаторов.

### **1.3.5 Используемые методы**

Используемые методы можно разделить на следующие группы: расчетные методы сети, методы управления, методы теории принятия решений.

К расчетным методам сети относятся технология принятия решения, которая используется при выборе подходящих моделей электроустановок. Также в эту группу входят методика расчета разомкнутых сетей, методы расчета токов и напряжений в электрических сетях, метод средних нагрузок для расчета нагрузок.

Для управления используется метод дифференциальной эволюции, который относится к классу стохастических методов оптимизации, а также строится на базе генетических алгоритмов с небольшими модификациями.

Для построения математической модели экспертизы сети (эффективности сети) используются методы теории выбора и принятия решения.

## **1.4 Выводы по разделу**

Проведя анализ источников по разработке и внедрению экспертных систем в различных областях науки, выяснилось, что данный тип программного решения наиболее эффективен при использовании в узких предметных областях. В том случае, когда работа эксперта занимает довольно продолжительное количество времени или когда наличие необходимого числа экспертов по каким-либо причинам невозможно.

Выявлено, что для любой экспертной системы характерно:

- ограничение применения определенной сферой экспертизы;
- способность объяснить цепочку рассуждений понятным способом;
- способность принимать решения и выдавать комментарии и советы при сомнительных исходных данных;
- наличие возможности постепенного наращивания системы;
- использование набора формализованных правил;

- способность самообучаться;
- получение совета не в виде таблицы из цифр, а четкий совет – ответ системы.

Стоит учитывать тот факт, что для разработки такой предметной экспертной системы необходимо участие особого рода специалистов, обладающих совокупностью знаний и выступающих в качестве посредников между экспертами в предметной области и компьютерными (экспертными) системами.

Были сформулированы цель, задачи и актуальность выбранной темы. Приведены примеры использования экспертных систем в различных областях, таких как прогнозирование, диагностика, проектирование, мониторинг и т.д. Выделены входные и выходные данные экспертной системы, а также описаны основные методы, используемые в работе.

## 2 Моделирование экспертной системы

### 2.1 Метод дифференциальной эволюции

Алгоритм метода дифференциальной эволюции впервые был предложен в 1995 году Рэйнером Сторном и Кеннетом Прайсом [31].

Метод дифференциальной эволюции (англ. *differential evolution*) — метод многомерной математической оптимизации, относящийся к классу стохастических алгоритмов оптимизации (то есть работает с использованием случайных чисел) и использующий некоторые идеи генетических алгоритмов, но, в отличие от них, не требует работы с переменными в бинарном коде [5]. Данный метод является прямым, т.е. требуется вычисление значения целевой функции, а не ее производных.

В общем виде алгоритм метода дифференциальной эволюции может быть описан следующим образом.

Пусть критерий оптимальности  $f$  принимает форму

$$f(X) \rightarrow \min X \quad (2.1)$$

посредством оптимизации значений ее параметров

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n \quad (2.2)$$

Обычно параметры целевой функции ограничены своими предельными значениями  $L$  и  $H$ :

$$l_j \leq x_j \leq h_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

Как и все эволюционные алгоритмы оптимизации, ДЭ работает с популяцией решений. Популяция  $P$  поколения  $G$  содержит  $NP$  векторов решений,

так называемых индивидуумов популяции. Каждый такой вектор представляет собой потенциальное решение проблемы оптимизации:

$$P^{(G)} = X_i^{(G)}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad G = 1, \dots, g_{max}, \quad (2.4)$$

Каждый из  $NP$  индивидуумов популяции  $P$  содержит  $n$  параметров (хромосом индивидуума):

$$P^{(G)} = X_i^{(G)} = x_{i,j}^{(G)}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.5)$$

Для инициализации популяции используется способ случайного разброса при заданных предельных значениях:

$$P^{(0)} = x_{i,j}^{(0)} = rand_{i,j} \times (\square_j - l_j) + l_j, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, n, \quad (2.6)$$

б)

где  $rand$  – это функция, генерирующая случайные значения, распределенные равномерно на интервале  $[0, 1]$ .

Схема репродукции популяции в ДЭ отличается от остальных алгоритмов. Начиная с первого поколения  $P^{(1)}$ , последующее поколение популяции  $P^{(G+1)}$  воспроизводят себя на основании предыдущих  $P^{(G)}$ , но сначала формируется промежуточное поколение  $P^{(G+1)} = U_i^{(G+1)} = u_{i,j}^{(G+1)}$ ,

$$u_{i,j}^{(G+1)} = \begin{cases} X_{C_{i,j}}^{(G)} + F \cdot (X_{A_{i,j}}^{(G)} - X_{B_{i,j}}^{(G)}), & \text{если } (rand_{i,j} \leq Cr) \vee (j = D_i), \\ X_{i,j}, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (2.7)$$

где  $A, B, C = rand [1, NP], A_i \neq B_i \neq C_i \neq i$ ;

$D = rand [1, n], i=1, \dots, NP, j = 1, \dots, n$ ;

$Cr \in [0, 1] \subset R; F \in [0, 2] \in R$ .

$C$  – три случайно выбранных отличных друг от друга индекса, т.е. три случайно выбранных индивидуума популяции. Они также отличны от индекса текущего индивидуума, подлежащего изменениям.  $D$  – указывает на случайно выбранную хромосому у каждого индивидуума и, таким образом, заверяет, что индивидуум следующего поколения будет отличаться хотя бы на одну хромосому от индивидуума предыдущего поколения.  $Cr$  и  $F$  – управляющие параметры, оба значения остаются неизменными в процессе поиска, так же и  $NP$  – размер популяции.  $F$  – параметр, управляющий усилением дифференциальных вариаций.  $Cr$  – параметр, управляющий вероятностью выбора мутированного значения. Оба параметра влияют на скорость сходимости и робастность процесса поиска. Их оптимальные значения зависят от целевой функции, ограничений и размера популяции. В большинстве случаев эти параметры находятся методом проб и ошибок.

В классической схеме выбора дифференциальной эволюции популяция следующего поколения выбирается так

$$X_i^{(G+1)} = \begin{cases} U_i^{(G+1)}, & \text{если } f(U_i^{(G+1)}) \leq f(X_i^{(G)}), \\ X_i^{(G)}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2.8)$$

Таким образом, каждый индивидуум временной популяции сравнивается со своим двойником из текущей популяции. И тот, кто больше отвечает условиям оптимальности, переходит в следующее поколение. Отметим, что индивидуумы следующего поколения либо остаются такими же хорошими, либо становятся лучше по сравнению с их дубликатами в предыдущем поколении. Также в схеме выбора ДЭ промежуточный (пробный) индивидуум не сравнивается со всеми индивидуумами текущей популяции, а только противопоставляется своему дубликату [19].

Из материалов [1, 5, 15,17,19, 26,27] можно сделать вывод о том, что использование метода дифференциальной эволюции не широко применяется в

различных областях, но и дает положительные результаты. В работах [1, 17]. отмечается, метод ДЭ наиболее эффективен, в отличие от классических методов оптимизации. В заключение приложения первого материала [19] приведены сравнительные характеристики различных методов оптимизации, где подчеркивается, что ДЭ – это один из перспективнейших эвристических методов оптимизации среди эволюционных алгоритмов, также не уступает по скорости методам имитации и превосходит по точности генетические алгоритмы, невзирая на свою практичность в использовании и несложную реализацию.

Не смотря на высокую эффективность метода, в статьях [15, 26] авторы отмечают зависимость, как и во всех эволюционных алгоритмах, от своих параметров: иногда даже небольшое изменение какого-либо параметра может привести к улучшению результата. Если популяция мала и время вычисления фиксировано, она успеет создать большое количество поколений, но вероятность схождения к локальному экстремуму повышается. Слишком большой размер популяции может привести к тому, что число поколений станет недостаточным для нахождения глобального экстремума. Вопрос об теоретически оптимальном размере популяции в алгоритмах с мутацией остаётся открытым. Увеличивая силу мутации  $F$ , мы увеличиваем стохастическую составляющую алгоритма. Локальная структура целевой функции при этом практически не используется. Скорость сходимости при этом сильно уменьшается. При небольшой же силе мутации алгоритм приближается к градиентным методам, так как за счет подстройки облака точек к структуре функции он фактически строит приближение градиента [17].

## **2.2 Особенности электрической сети как системы**

Системой электроснабжения называют совокупность устройств для производства, передачи и распределения электроэнергии. Они создаются для обеспечения приемников электроэнергии, к которым относят: электродвигатели



различных механизмов, электрические печи, электролизные установки, аппараты и машины для электрической сварки, осветительные установки и др.

Энергетической системой называют совокупность электростанций, подстанций и приемников электроэнергии, связанных между собой линиями электрической сети.

Электрической системой называют часть энергетической системы, состоящую из генераторов, распределительных устройств, повысительных и понизительных подстанций, линий электрической сети и приемников электроэнергии. Отличие ее от предыдущей системы в том, что в электрическую не входит часть, относящаяся к первичным двигателям и устройствам, которые обеспечивают их питание.

Электрическими сетями называют часть электрической системы, состоящие из подстанций и линий различных напряжений. Данные сети подразделяются по напряжению: до 1000 В и больше 1000В, прописанные в ГОСТ 721 -97. Электрическая сеть служит для передачи электроэнергии от места ее производства к местам потребления и распределения между потребителями.

К промышленным предприятиям относят: заводы, комбинаты, фабрики, шахты, карьеры, производственные и ремонтные базы, типографии, предприятия железнодорожного, водного, воздушного, трубопроводного и городского транспорта и др. К гражданским – жилые и общественные объекты.

Электроснабжение предприятий подразделяют на внешнее и внутреннее. Под внешним электроснабжением понимают комплекс сооружений, обеспечивающих передачу электроэнергии от выбранной точки присоединения к энергосистеме до приемных подстанций предприятий или гражданских зданий.

Внутреннее электроснабжение – комплекс сетей и подстанций, расположенных, как правило, на территории предприятия и его цехах.

Разработку проекта электроснабжения промышленного предприятия начинают с изучения технологического процесса и его особенностей. На первой стадии анализируют взаимосвязь отдельных технологических процессов и агрегатов, возможные последствия перерывов в электроснабжении всего предприя-

тия, а также отдельных агрегатов или цехов. Рассчитывают ожидаемые электрические нагрузки цехов и отдельных крупных технологических агрегатов, а также ожидаемую расчетную нагрузку предприятия в целом.

Электроэнергия на пути от источника до электроприемника на современных промышленных предприятиях преобразуется один или несколько раз, а токи ее по мере приближения к потребителям, дробятся на менее мелкие и разветвляются.

Преобразование электроэнергии по напряжению производят на трансформаторных подстанциях, которые (в зависимости от места их расположения в схеме электроснабжения) называют главными понизительными подстанциями (ГПП) и цеховыми трансформаторными подстанциями (ТП).

Для внутреннего электроснабжения промышленных предприятий применяют радиальные, магистральные и смешанные схемы. Радиальные схемы получили наибольшее распространения. Магистральные – применяют реже, в основном в тех случаях, когда электроприемники имеют большую мощность и расположены вблизи трасс, удобных для прокладки магистралей. Чаще их применяют в сочетании с радиальными.

Принятый способ передачи электроэнергии в значительной мере определяет схему электроснабжения предприятия. На выбор схемы оказывают влияние взаимное расположение потребителей, требования к бесперебойности питания, число, мощность и напряжение источников питания, принятое напряжение сетей, значения токов короткого замыкания, условия генерального плана предприятия, конструктивные особенности и технико – экономические характеристики электрооборудования. Напряжение сети, число, мощность и расположение распределительных и трансформаторных подстанций набирают на основе технико – экономических расчетов [21].

Анализ электрической сети как системы в первую очередь должен выявить основные параметры, определяющие эффективность сети электроснабжения. К ним относят:

а) коэффициент полезного действия – КПД –  $\eta$  – показатель эффективности системы (устройства, машины) в плане преобразования либо передачи энергии, который определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{полн}}} \%, \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{пол}}$  – полезная мощность;

$P_{\text{полн}}$  – полная мощность (суммарная);

б) коэффициент мощности  $\cos\varphi$  – показатель системы (устройства, машины), характеризующая наличие реактивной составляющей в нагрузке и определяется по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{пол}}}{S_{\text{полн}}} \%, \quad (2.10)$$

где  $S_{\text{полн}}$  – полная реактивная мощность;

в) потери активной энергии, возникающие в двигателях и трансформаторах;

г) технико – экономические расчеты;

д) ограничения, налагаемые на электрооборудование.

Исходя из того, что в работе используется схема с входным номинальным напряжением 380/220 В и имеющая магистральную топологию, то будут использоваться соответствующие величины и методы расчета нагрузок сети.

## **2.3 Модель управления сетью**

### **2.3.1 Структура сети**

На рисунке 2.1 представлена схема электрической сети, являющаяся типовой для участка цеха, например, сборочного или кузнечного.

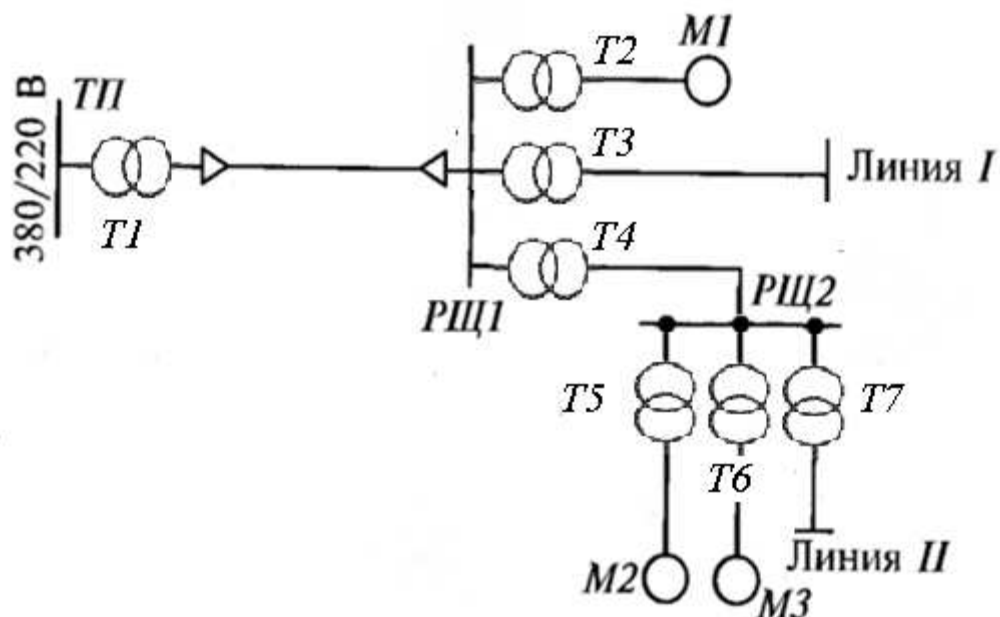


Рисунок 2.1 – Схема электрической сети

От трансформаторной подстанции ТП с номинальным низшим напряжением 380/220 В прокладывают электрическую сеть. Электродвигатели М1, М2, М3 – короткозамкнутые, асинхронные (таблица 2.1), осветительная нагрузка – симметричная. Нагрузка  $P_p$  осветительной линии I – 20кВт, линии II – 30кВт.

Таблица 2.1 - Технические характеристики асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, рассматриваемых в примере

Показатель	Электродвигатель		
	М1	М2	М3
Мощность $P_H$ кВт	7	14	10
Коэффициент полезного действия $\eta$	0,82	0,85	0,87
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,9	0,88	0,92
Коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi$	0,48	0,53	0,43

Требуется подобрать электрооборудование (трансформаторы и двигатели) для оптимизации электроснабжения в сети за счет минимизации затрат на электроснабжение методом дифференциальной эволюции.

Прежде чем адаптировать метод дифференциальной эволюции, необходимо выявить взаимосвязи между элементами сети.

### 2.3.2 Критерии эффективности

Критерием экономичности данного варианта схемы электроснабжения служат приведенные затраты.

Если изобразить зависимости параметров в виде графа, то получим граф, представленный в приложении А.

В графе есть переменные трех видов:

а) входные параметры – все переменные, у которых нет разветвлений. Входные переменные включают в себя внешние и внутренние;

б) внешние параметры – те данные, что можно поменять, либо выбрать (на графе выделены полужирным шрифтом и подчеркнуты). Это те параметры, что нужно оптимизировать. Они являются входными параметрами для целевой функции;

в) внутренние параметры – те, что не изменяются (на графе подчеркнуты). Их значения берутся из существующих таблиц в справочниках на основании выбранных трансформатора, двигателя или других промежуточных расчетных показателей (const).

Линии показывают взаимосвязь между переменными, а стрелки – в какой последовательности высчитываются параметры.

Для управления используется метод дифференциальной эволюции. Экономическая эффективность сети определяется приведенными затратами, которые рассчитывают по формуле:

$$Z = E_n * K + C \text{ руб. ,} \quad (2.11)$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности – const (значение от 0,1 -0,33 в зависимости от отрасли);

$K$  – единовременные капитальные вложения - const;

$C$  – ежегодные текущие затраты.

В свою очередь ежегодные текущие затраты есть сумма амортизационных отчислений  $C_a$  и стоимости потерь электроэнергии  $C_n$ .

$$C = C_a + C_n \text{ руб.}, \quad (2.12)$$

Амортизационные отчисления рассчитывается по формуле

$$C_a = P_T * \frac{K_T}{100} + P_o * \frac{K_o}{100} \text{ руб.}, \quad (2.13)$$

где  $P_T, P_o$  – амортизационные отчисления в % - const ;

$K_T, K_o$  – стоимости трансформатора и двигателя – const (значения зависят от выбранного трансформатора и двигателя).

В качестве целевой функции выступают стоимости потерь электроэнергии  $C_n$ :

$$C_n = C_o * (\Delta\mathcal{E}_{a.t.} + \Delta\mathcal{E}_{a.d.}) \text{ руб.}, \quad (2.14)$$

где  $C_o$  – стоимость 1кВт\*ч электроэнергии – const (равно 2,5);

$\Delta\mathcal{E}_{a.d.}$  – потери активной энергии в двигателях – переменная промежуточных вычислений;

$\Delta\mathcal{E}_{a.t.}$  – потери активной энергии в трансформаторах – переменная промежуточных вычислений.

Потери активной энергии в двигателях  $\Delta\mathcal{E}_{a.d.}$ :

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{а.д.}} = \sum_{k=1}^{n_{\text{д}}} \left( \frac{1-\eta_{\text{д}}}{100} * P_{\text{нд}} \right) \text{кВ}\cdot\text{ч},$$

(2.15)

где  $\eta_{\text{д}}$  – КПД – коэффициент полезного действия двигателя - const;

$P_{\text{нд}}$  – номинальная мощность двигателей - внешняя оптимизируемая переменная;

$n_{\text{д}}$ - число двигателей– const.

Потери активной энергии в трансформаторах  $\Delta \mathcal{E}_{\text{а.т.}}$ :

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{а.т.}} = 8760 * n_{\text{т}} * \Delta P_{\text{хх}} + \frac{1}{\text{пт}} * \Delta P_{\text{кз}} * \beta^2 * T_{\text{м}} \quad \text{кВ}\cdot\text{ч},$$

(2.16)

где  $\Delta P_{\text{хх}}$  – сумма потерь холостого хода в трансформаторах– const;

$\Delta P_{\text{кз}}$  – сумма потерь короткого замыкания – const;

$n_{\text{т}}$  – количество трансформаторов– const;

8760 – количество часов в год – const;

$T_{\text{м}}$  – число часов использования максимума нагрузки – const (10 % от рабочего времени в год);

$\beta$ - коэффициент – переменная промежуточных вычислений.

Коэффициент  $\beta$  рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{S_{\text{р}}}{S_{\text{нт}}}, \quad (2.17)$$

где  $S_{\text{р}}$ - полная расчетная мощность трансформатора – переменная промежуточных вычислений;

$S_{\text{нт}}$  – номинальная мощность трансформатора – внешняя оптимизируемая переменная.

Сумма потерь холостого хода в трансформаторах  $\Delta P_{\text{хх}}$  и сумма потерь короткого замыкания  $\Delta P_{\text{кз}}$  – паспортные характеристики, которые зависят вы-

бора трансформатора. Выбор трансформатора осуществляется на основе условия:

$$S_{HT} \geq \frac{\sum P_{нд}}{n_T * K_3}, \quad (2.18)$$

где  $S_{HT}$  – расчетная мощность трансформатора - внешняя оптимизируемая переменная;

$\sum P_{нд}$  – средние активные мощности – const;

$K_3$  – коэффициент загрузки трансформатора – const (значение от [0,7; 1,4] в зависимости от сферы промышленности).

Полная расчетная мощность трансформатора  $S_p$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \text{ кВт}, \quad (2.19)$$

где  $P_p$  – полная расчетная активная мощность– переменная промежуточных вычислений;

$Q_p$  – полная расчетная реактивная мощность– переменная промежуточных вычислений.

Расчетная активная мощность  $P_p$  всей группы электроприемников определяется по формуле:

$$P_p = K_p * P_{нд} \text{ кВт}, \quad (2.20)$$

где  $K_p$ - коэффициент расчетной мощности– переменная промежуточных вычислений ( табличное значение, получаемое на пересечении  $K_i = 1$  и  $n_э$  эффективного числа электроприемников);

$P_{нд}$  –средняя активная мощность (выше формула).

Определяем эффективное число электроприемников  $n_э$ , шт, по формуле:

$$n_э = \frac{(\sum P_{нд})^2}{\sum n \cdot P_H} \text{ шт.}, \quad (2.21)$$



где  $P_{нд}$  – номинальные мощности элементов;

$n$  – общее количество элементов в сети – переменная промежуточных вычислений.

Расчетная реактивная мощность  $Q_p$ , по формуле:

$$Q_p = 1,1Q_c \text{ квар} , \quad (2.22)$$

где если  $n_3 > 10$ , то  $Q_p = \sum Q_c$ ; в противном случае  $Q_p = 1,1Q_c$ ;

$Q_c$  – средняя реактивная мощность – переменная промежуточных вычислений.

При вычислении значения средней реактивной мощности  $Q_c$ , положим величину  $K_{и}$  равной единице, так как в настоящее время используют значение КПД, а для определения коэффициента расчетной мощности коэффициент использования необходим, то не использовать его неоправданно:

$$Q_c = K_{и} \cdot Q_n = K_{и} \cdot \sum P_{нд} \text{tg}\varphi \text{ квар} , \quad (2.23)$$

где  $K_{и}$  – коэффициент использования;

$P_{нд}$  – сумма номинальных мощностей;

$\text{tg}\varphi$  – коэффициент реактивной мощности – внешняя оптимизируемая переменная.

Коэффициент использования равен 1, сумма номинальных мощностей есть средняя активная мощность, а коэффициент реактивной мощности выражается через коэффициент мощности.

### 2.3.3 Модель принятия решения

В большинстве случаев поддержка принятия решений заключается в генерации возможных альтернатив решений, их оценке и выборе лучшей альтер-

нативы. При выборе альтернатив приходится учитывать большое число противоречивых требований и, следовательно, оценивать варианты решений по многим критериям. Характерной особенностью решаемых сегодня задач является их многокритериальность, поэтому лицам, принимающим решения (ЛПР), приходится оценивать множество сил, влияний, интересов и последствий, характеризующих варианты решений.

Модель принятия решения включает в себя задачу оптимизации потерь электроэнергии и задачу выбора электрооборудования. Задача оптимизации потерь электроэнергии формулируется следующим образом: найти набор значений основных параметров двигателей и трансформаторов, обеспечивающих минимум потерь электроэнергии

$$C_n = C_n(\vec{\eta}_d, \vec{P}_{нд}, \vec{S}_{нт}, \overline{\cos\varphi}_d, C_o, n_d, n_t) \quad (2.24)$$

на допустимом множестве  $Z$ , заданном ограничениями

$$Z = \left\{ S_{нт5} \geq \frac{P_{нд2}}{\cos\varphi_2}; S_{нт6} \geq \frac{P_{нд3}}{\cos\varphi_3}; S_{нт7} \geq \frac{P_{нар2}}{\eta_{нар2} * \cos\varphi_2}; S_{нт4} \geq (S_{нт5} + S_{нт6} + S_{нт7}); S_{нт3} \geq \frac{P_{нар1}}{\eta_{нар1} * \cos\varphi_1}; S_{нт2} \geq \frac{P_{нд1}}{\cos\varphi_1}; S_{нт1} \geq (S_{нт2} + S_{нт3} + S_{нт4}); \cos\varphi_j = 0,8; P_{ндj} \geq \frac{P_{yj}}{\eta_{dj}}; \eta_{dj} \in [0,8, 1] \right\},$$

где  $\vec{\eta}_d, \vec{P}_{нд}, \vec{S}_{нт}, \overline{\cos\varphi}_d$  – вектора внешних параметров (переменные);

$C_o, n_d, n_t$  – внутренние параметры (постоянные);

$S_{нт5}$  – номинальная мощность трансформатора Т5;

$S_{нт6}$  – номинальная мощность трансформатора Т6;

$S_{нт7}$  – номинальная мощность трансформатора Т7;

$S_{нт4}$  – номинальная мощность трансформатора Т4;

$S_{нт3}$  – номинальная мощность трансформатора Т3;

$S_{нт2}$  – номинальная мощность трансформатора Т2;

$S_{нт1}$  – номинальная мощность трансформатора Т1;

$P_{нд2}$  – номинальная мощность двигателя М2;

$P_{нд3}$  – номинальная мощность двигателя М3;  
 $P_{нд1}$  – номинальная мощность двигателя М1;  
 $P_{наг2}$  – мощность нагрузки на Линии 2;  
 $P_{наг1}$  – мощность нагрузки на Линии 1;  
 $\eta_{дj}$ ,  $j=1,2,3$  – коэффициенты полезного действия двигателей М1, М2, М3;  
 $\eta_{наг1}$  – коэффициент полезного действия нагрузки на Линии 1;  
 $\eta_{наг2}$  – коэффициент полезного действия нагрузки на Линии 2;  
 $\cos\varphi_1, \cos\varphi_2, \cos\varphi_3$  – коэффициенты мощности двигателей М1, М2, М3 соответственно.

Задача выбора электрооборудования – это задача выбора двигателей и трансформаторов из множества альтернатив, представленных в виде набора значений паспортных характеристик, на основе соответствующих критериев оптимальности. Критерии определяются решением задачи оптимизации энергопотерь

$$(\vec{\eta}_д^*, \vec{P}_{нд}^*, \vec{S}_{нт}^*, \overline{\cos\varphi}_д^*, C_o, n_д, n_т). \quad (2.25)$$

#### *Задача выбора двигателей*

Множество альтернатив  $D$  для задачи выбора двигателя состоит из наборов  $D_k$  паспортных значений двигателей, включающих номинальную мощность двигателя, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

$$D_k = (P_{нд}^k, \eta^k, \cos\varphi^k), \quad (2.26)$$

где  $k = 1, 2, \dots, l$ ;

$P_{нд}^k$  – номинальная мощность двигателя (паспортная);

$\eta^k$  – коэффициент полезного действия двигателя (паспортный);

$\cos\varphi^k$  – коэффициент мощности двигателя (паспортный);

$l$  – число вариантов в допустимом множестве альтернатив двигателей.

Критерием оптимальности для выбора двигателя ОП<sub>д</sub><sup>j</sup> является оптимальная номинальная мощность двигателя P<sub>нд</sub><sup>опт</sup> и коэффициент полезного действия. Оптимальные значения номинальной мощности выбирается из условия

$$P_{ндj}^{опт} = \min_{P_{нд}^k \geq P_{ндj}^*} P_{нд}^k, \quad j = 1, 2, \dots, n_d. \quad (2.27)$$

Затем на полученном множестве недоминируемых альтернатив решается задача выбора оптимального коэффициента полезного действия η<sub>дj</sub><sup>опт</sup> исходя из условия

$$\eta_{дj}^{опт} = \max_{\substack{\eta_{д}^k \geq \eta_{дj}^* \\ P_{нд}^k = P_{ндj}^{опт}}} \eta_{д}^k, \quad j = 1, 2, \dots, n_d. \quad (2.28)$$

Он выбирается из паспортных данных двигателей с оптимальными значениями номинальной мощности двигателя и коэффициента полезного действия.

#### *Задача выбора трансформаторов*

Для задачи выбора трансформатора множество альтернатив S<sub>нт</sub> представлено паспортными значениями номинальной мощности S<sub>нтj</sub><sup>опт</sup>. Критерием оптимальности ОП<sub>т</sub><sup>j</sup> выбора трансформатора является оптимальность его номинальной мощности.

$$S_{нтj}^{опт} = \min_{S_{нт}^k \geq S_{нтj}^*} S_{нт}^k, \quad j = 1, 2, \dots, n_t, \quad (2.29)$$

где S<sub>нт</sub><sup>к</sup> - номинальная мощность трансформатора (паспортная).

Таким образом, задачи выбора двигателей и трансформаторов можно записать в следующем виде:

$$\langle D, ОП_{д}^j \rangle, \quad j = 1, 2, \dots, n_d, \quad (2.30)$$

$$\langle S_{HT}, ОП_T^j \rangle, \quad j = 1, 2, \dots, n_T. \quad (2.31)$$

### 2.3.4 Модели данных и знаний

Модель данных системы представляет собой базу данных, содержащую номинальные значения двигателей и трансформаторов, которые не взаимосвязаны между собой.

Справочник электродвигателей должен содержать информацию о марке, номинальной мощности, КПД, коэффициенте мощности и стоимости. В таблице 2.2 представлены атрибуты справочника электродвигатель.

Таблица 2.2 – Описание атрибутов справочника электродвигатель

Атрибут	Тип	Описание
ID	Числовой	Уникальный идентификатор записи (ключ)
Name	Текстовый	Марка двигателя
P <sub>nom</sub> , кВт	Числовой	Номинальная мощность
KPD	Числовой	Коэффициент полезного действия
cosφ	Числовой	Коэффициент мощности
Price, руб	Числовой	Стоимость трансформатора

Атрибутами сущности трансформатор являются марка, номинальная мощность, коэффициент загрузки, потери мощности при холостом ходе и коротком замыкании, а также стоимость, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Описание атрибутов справочника трансформатор

Атрибут	Тип	Описание
ID	Числовой	Уникальный идентификатор записи (ключ)
Name	Текстовый	Марка трансформатора

Sнт, кВА	Числовой	Номинальная мощность
Кз	Числовой	Коэффициент загрузки
Pхх, кВт	Числовой	Потери мощности холостого хода
Pкз, кВт	Числовой	Потери мощности короткого замыкания
Цена, руб	Числовой	Стоимость трансформатора

Проблема сохранения результатов решается с помощью создания специальной таблицы базы данных. Она включает в себя сведения о промежуточных расчетах. Список атрибутов архива результатов представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Описание атрибутов результата

Атрибут	Тип	Описание
ID	Числовой	Уникальный идентификатор записи (ключ)
Name	Текстовый	Название сохраненной записи
Sнт, кВА	Числовой	Номинальная мощность трансформатора
KPD	Числовой	Коэффициент полезного действия двигателя
Cosφ	Числовой	Коэффициент мощности двигателя
Кз	Числовой	Коэффициент загрузки двигателя
Pхх, кВт	Числовой	Потери мощности холостого хода трансформатора
Pкз, кВт	Числовой	Потери мощности короткого замыкания трансформатора
C, руб	Числовой	Ежегодные текущие затраты при нормальной эксплуатации
Ca	Числовой	Амортизационные отчисления
Cп	Числовой	Стоимость потерь электроэнергии

База знаний в проектируемой экспертной системе представлена в виде базы паспортных данных трансформаторов и двигателей, таблицы расчетов результатов, а также критериев выбора. К критериям относятся ограничения на номинальную мощность электрооборудования, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

### 2.3.5 Алгоритмы принятия решения

Алгоритм принятия решения состоит из двух этапов: решение задачи оптимизации целевой функции (2.24), выбор электрооборудования. Для задачи оптимизации использован метод дифференциальной эволюции. Выбор электрооборудования осуществляется согласно методу принятия решения, описанного в пункте 2.3.3.

Будем искать оптимальные значения номинальных мощностей трансформаторов такими, чтобы ограничения – неравенства, описывающие допустимое множество задачи минимизации энергозатрат, выполнялись как равенство. В таком случае, номинальные мощности трансформаторов можно выразить через номинальные характеристики двигателей, что позволяет исключить переменные из задачи оптимизации и сократить ее размерность.

Полученная задача оптимизации решается методом дифференциальной эволюции, блок – схема которого представлена в приложении Б. Коэффициенты мощности двигателей принимаем равными 0,8, т.к. нецелесообразно использовать меньшее значение для электрооборудования, используемого в цехах, т. е.  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3 = \cos\varphi_j = 0,8$ . Значение взято из справочника [2].

На втором этапе решаем задачу выбора двигателя (2.30) и трансформатора (2.31). После выбора электрооборудования для их паспортных (реальных) значений пересчитываем потери электроэнергии, а далее приведенные затраты.

Используя модель принятия решений, описанную в пункте 2.3.3 этого раздела, можно составить алгоритм расчета приведенных затрат (рисунок 2.2) на основе формул и последовательности расчетов промежуточных значений из пункта 2.3.2 этого раздела.

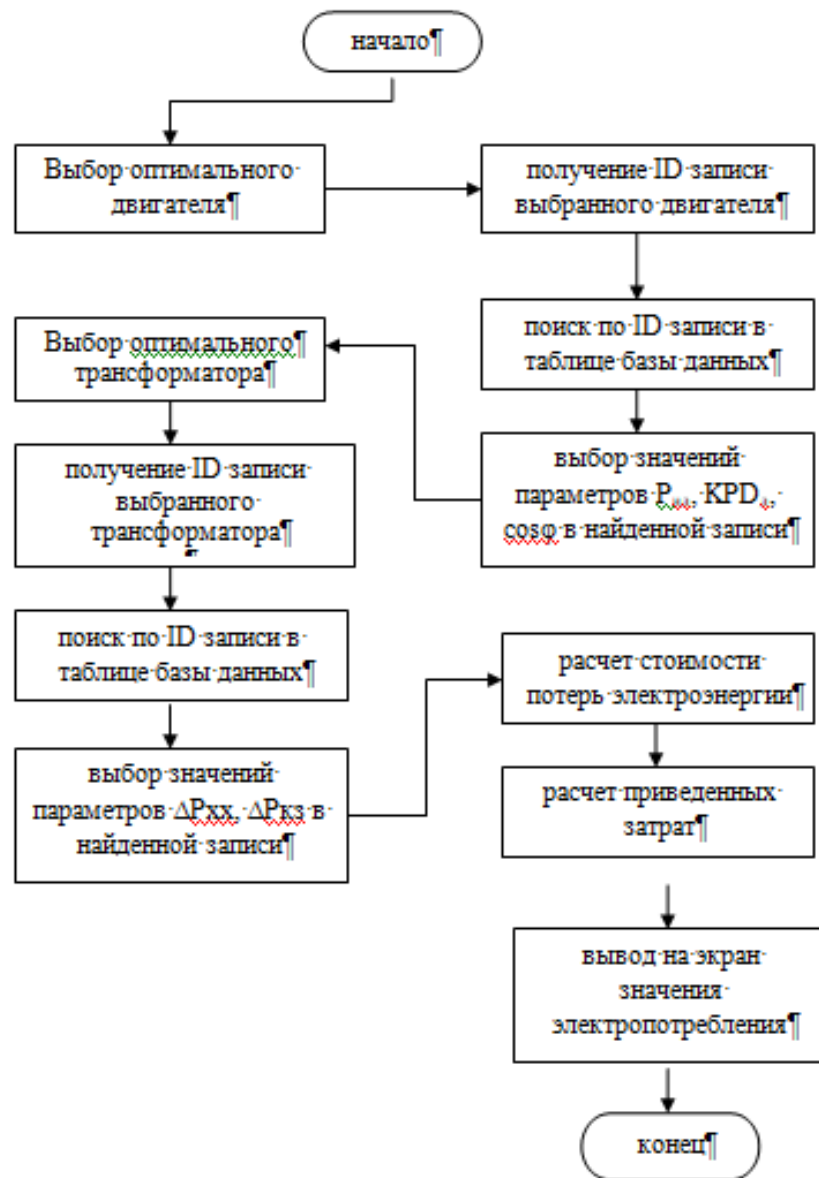


Рисунок 2.2 – Алгоритм расчета приведенных затрат

Расчет приведенных затрат возможен после выбора марок двигателей и трансформаторов, расчета стоимости потерь электроэнергии на основе их паспортных характеристик.

## 2.4 Выводы по разделу

В данном разделе описаны предметная область и используемые методы: принятия решения, дифференциальной эволюции, расчета нагрузок, расчета приведенных затрат.



В разделе описан алгоритм метода дифференциальной эволюции, произведен сравнительный анализ эффективности данного метода с другими. В работах [1, 5, 15,17,19, 26,27] отмечается, что количество популяций, максимальное число поколений, вероятность мутации, вероятность скрещивания не могут задаваться произвольно. Они должны выбираться путем численных экспериментов с учетом специфики решаемой задачи.

Была выбрана сеть электроснабжения – часть цеха, на примере которой были произведены расчеты: нагрузок и результаты сведены в таблицу, изображенную на рисунках В.1 и В.2, потерь трансформаторов (таблица В.1), потерь в двигателях (таблица В.2) и затрат. Следует отметить, что в расчетах не принимают участие потери, возникающие в линиях электропередач, потери освещения и внутренние потери в проводниках.

Представлена модель базы данных системы, состоящая из справочных характеристик трансформаторов, двигателей, а также таблицы промежуточных результатов.

Описаны модель принятия решения выбора электрооборудования из существующих альтернатив паспортных характеристик на основе критериев, удовлетворяющих условиям (2.27-2.29) и алгоритм принятия решения, состоящий из задачи оптимизации и задачи принятия решения.

### 3 Разработка программного обеспечения экспертной системы

#### 3.1 Проектирование справочной базы данных

Модель данных системы представляет собой базу данных, содержащую номинальные значения двигателей и трансформаторов, которые не взаимосвязаны между собой.

На рисунке 3.1 показаны атрибуты справочника асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: 4А, 4АН, 4АД, 4АС, АИР, АОЗ, А, АЗ, ДАЗО2, ДАЗО4, АД2, 2АЗМ, АД4, 4АЗМ, 4АРМ, АВ, АВК, АОВ2, АО2, В (взрывозащищенные) и ВАО (взрывобезопасные).

				id	name	pnom	kpd	cosf	price
<input type="checkbox"/>				1	2АЗМ1-1000/6000УХЛ4	1000	0.958	0.89	10900
<input type="checkbox"/>				2	2АЗМ1-1250/6000УХЛ4	1250	0.963	0.89	11500
<input type="checkbox"/>				3	2АЗМ1-1600/6000УХЛ4	1600	0.965	0.9	12500
<input type="checkbox"/>				4	2АЗМ1-2000/6000УХЛ4	2000	0.965	0.91	15800
<input type="checkbox"/>				5	2АЗМ1-2500/6000УХЛ4	2500	0.969	0.92	17600
<input type="checkbox"/>				6	2АЗМ1-315/6000УХЛ4	315	0.947	0.9	NULL
<input type="checkbox"/>				7	2АЗМ1-3200/6000УХЛ4	3200	0.968	0.91	23600
<input type="checkbox"/>				8	2АЗМ1-400/6000УХЛ4	400	0.953	0.91	7200
<input type="checkbox"/>				9	2АЗМ1-4000/6000УХЛ4	4000	0.969	0.92	24700
<input type="checkbox"/>				10	2АЗМ1-500/6000УХЛ4	500	0.956	0.92	7600
<input type="checkbox"/>				11	2АЗМ1-5000/6000УХЛ4	5000	0.974	0.92	26600
<input type="checkbox"/>				12	2АЗМ1-630/6000УХЛ4	630	0.955	0.9	8200
<input type="checkbox"/>				13	2АЗМ1-800/6000УХЛ4	800	0.958	0.9	8900

Рисунок 3.1 – Справочника электродвигателей

Атрибутами таблицы силовых трансформаторов 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ являются: марка, номинальная мощность, КПД, коэффициент мощности, потери мощности холостого хода и короткого замыкания, стоимость (Рисунок 3.2).

			id	name	snt	kz	pxx	pkz	price
<input type="checkbox"/>			1	ОМ-4/6	4	NULL	0.055	0.14	NULL
<input type="checkbox"/>			2	ТЛС-10/6/0,4	10	NULL	0.09	0.27	NULL
<input type="checkbox"/>			3	ОМ-10/6	10	NULL	0.09	0.3	NULL
<input type="checkbox"/>			4	ТМ-25/10-У1(ХЛ1)	25	NULL	0.115	0.6	NULL

Рисунок 3.2 – Справочник трансформаторов

Таблица сохранения результатов представлена на рисунке 3.3. Она включает в себя сведения о промежуточных расчетах.

id	name	snt	kpd	cosf	kz	pxx	pkz	c	ca	cn

Рисунок 3.3 – Сохраненные результаты

База знаний в проектируемой экспертной системе представлена в виде базы данных из справочника трансформаторов, справочника двигателей, таблицы расчетов результатов, а также критериев выбора.

К критериям относятся ограничения на номинальную мощность электрооборудования, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

### 3.2 Выбор и обоснование среды программирования

Для реализации программного обеспечения используются языки программирования PHP, MySQL, Open Server.

Главным фактором языка PHP является практичность. PHP предоставляет средства для быстрого и эффективного решения поставленных задач. Практический характер PHP обусловлен пятью важными характеристиками: традиционностью; простотой; эффективностью; безопасностью; гибкостью.

Так же PHP распространяется бесплатно, что не вызывает проблем с регистрацией продукта. Очень важное преимущество PHP заключается в его «движке». «Движок» PHP не является ни компилятором, ни интерпретатором.

ром. Он является транслирующим интерпретатором. Такое устройство «движка» PHP позволяет обрабатывать сценарии с достаточно высокой скоростью. В PHP реализованы механизмы безопасности, находящиеся под управлением администраторов; при правильной настройке PHP это обеспечивает максимальную свободу действий и безопасность. PHP может работать в так называемом безопасном режиме, который ограничивает возможности применения PHP пользователями по ряду важных показателей. Например, можно ограничить максимальное время выполнения и использование памяти (неконтролируемый расход памяти отрицательно влияет на быстродействие сервера). В стандартный набор функций PHP входит ряд надежных механизмов шифрования. PHP также совместим с многими приложениями независимых фирм, что позволяет легко интегрировать его с защищенными технологиями электронной коммерции. Другое преимущество заключается в том, что исходный текст сценариев PHP нельзя просмотреть в браузере, поскольку сценарий компилируется до его отправки по запросу пользователя. Реализация PHP на стороне сервера предотвращает похищение нетривиальных сценариев пользователями.

Поскольку PHP является встраиваемым языком, он отличается исключительной гибкостью по отношению к потребностям разработчика. Хотя PHP обычно рекомендуется использовать в сочетании с HTML, он с таким же успехом интегрируется и в JavaScript, WML, XML и другие языки. Кроме того, хорошо структурированные приложения PHP легко расширяются по мере необходимости. Так же нет проблем и с зависимостью от браузеров, поскольку перед отправкой клиенту сценарии PHP полностью компилируются на стороне сервера. В сущности, сценарии PHP могут передаваться любым устройствам с браузерами. Поскольку PHP не содержит кода, ориентированного на конкретный web-сервер, пользователи не ограничиваются определенными серверами. PHP работает на таких серверах как: Apache, Microsoft IIS, Netscape Enterprise Server, Stronghold и Zeus.

SQL - формальный непроцедурный язык программирования, применяемый для создания, модификации и управления данными в произвольной БД,

управляемой соответствующей системой управления базами данных. Преимущества: несмотря на наличие диалектов и различий в синтаксисе, в большинстве своём тексты SQL-запросов могут быть достаточно легко перенесены из одной СУБД в другую. Наличие стандартов и набора тестов для выявления совместимости и соответствия конкретной реализации SQL общепринятому стандарту только способствует «стабилизации» языка. С помощью SQL программист описывает только то, какие данные нужно извлечь или модифицировать. То, каким образом это сделать, решает СУБД непосредственно при обработке SQL-запроса.

Для реализации БД было использовано приложение PHPMyAdmin. PHPMyAdmin — это веб-приложение, которое распространяется с открытым кодом, написанное на языке веб-программирования PHP и представляющее собой веб-интерфейс для администрирования СУБД MySQL. PHPMyAdmin для работы с базой данных нужен браузер, который и будет передавать на сервер все команды. В качестве языка работы с БД используется широко известный SQL.

OpenServer – современный локальный сервер. Open Server представляет из себя так называемый WAMP комплекс, суть которого можно понять из расшифровки этой аббревиатуры:

- Windows — операционная система, для работы в которой предназначен данный локальный сервер;
- Apache — web-сервер, который «поднимается» при запуске программы Open Server;
- MySQL — очень популярная система управления базами данных, которая является обязательным условием для работы многих движков сайтов;
- PHP — интерпретатор серверного языка программирования .

Этот локальный сервер позволяет в настройках выбрать один из нескольких вариантов Apache, PHP, MySQL и других компонентов.

### 3.3 Структура информационных потоков

При проектировании экспертной системы, анализ схемы информационных потоков позволяет указать связи модулей программы и характер передаваемой информации. На основе схемы происходит разработка программного продукта, разрабатываются модули программы, их взаимодействие, создаются меры защиты информационных потоков, передающих наиболее важную информацию, организуются требования к структурам модулей. В разрабатываемой экспертной системе связь информационных потоков представлена на рисунке 3.4.

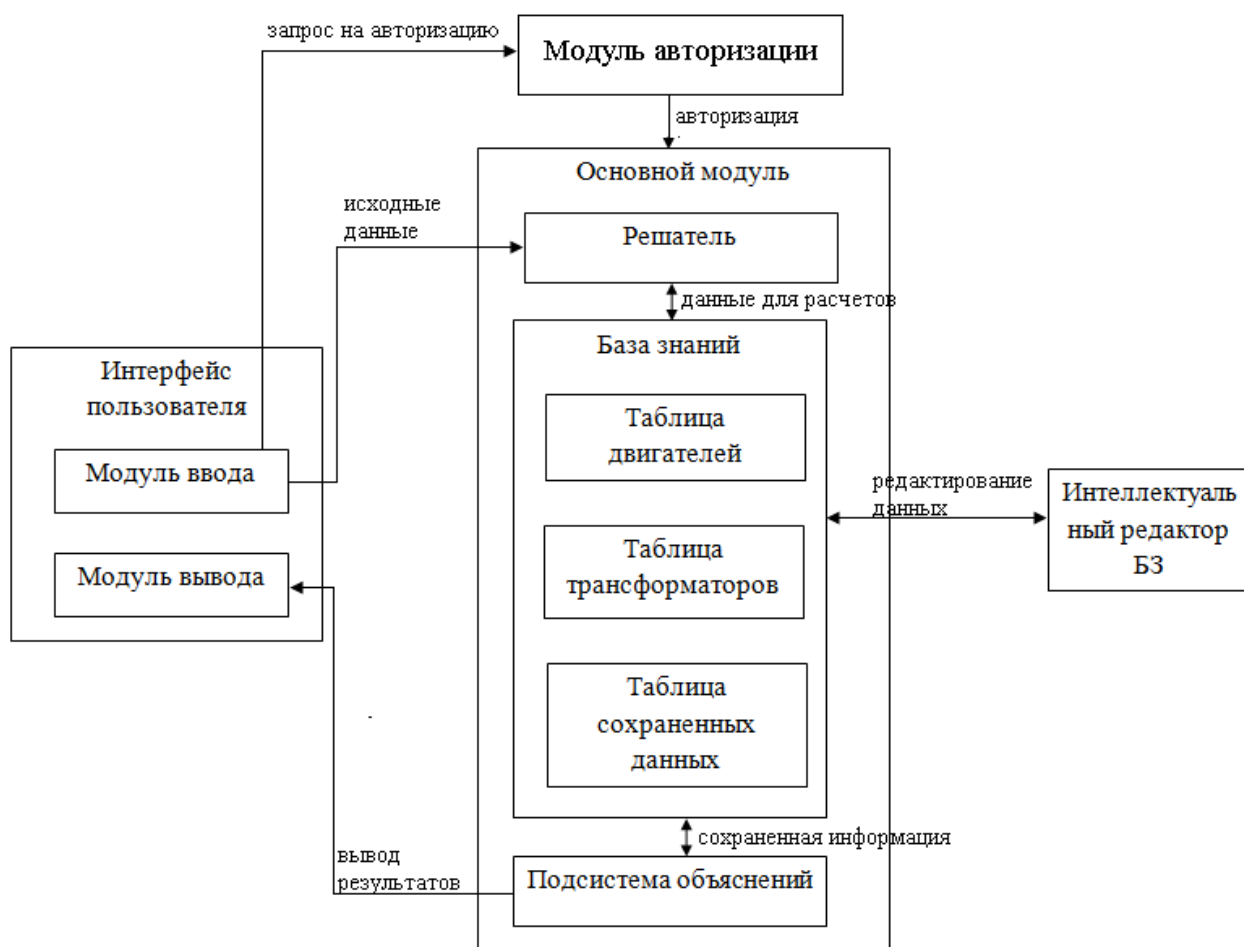


Рисунок 3.4 – Схема информационных потоков

### 3.4 Проектирование экспертной системы

#### 3.4.1 Описание основных модулей и взаимодействие между ними

Разработанная экспертная система включает в себя базу данных паспортных характеристик электродвигателей и трансформаторов, семь основных модулей: модуль авторизации, модуль ввода данных, модуль расчета, модуль сохранения данных, модуль администрирования, модуль вывода данных, справочный модуль. Схема взаимодействия всех модулей представлена на рисунке 3.5.

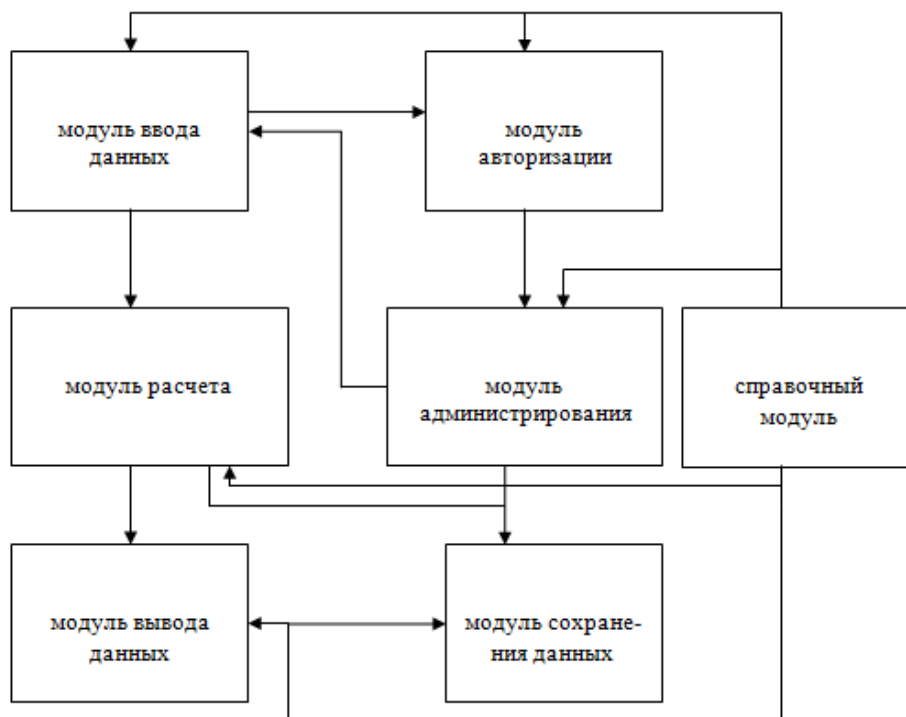


Рисунок 3.5 – Схема взаимодействия программный модулей

#### 3.4.2 Модуль авторизации

Модуль авторизации позволяет работать с программой в режиме администратора. Схема работы модуля представлена на рисунке 3.6. Режим админи-

стратора позволяет просматривать, добавлять, удалять и редактировать записи, удалять сохраненные записи результатов работы, а также изменять пароль для входа. Режим пользователя переводит на основной модуль ввода данных.



Рисунок 3.6 – Схема работы модуля авторизации

### 3.4.3 Модуль ввода данных

Модуль ввода данных предназначен для ввода необходимых параметров расчета условий поиска оптимального электрооборудования. К ним относят следующие параметры: нагрузки на двигатель 1,2,3 и параметры метода дифференциальной эволюции. К параметрам метода дифференциальной эволюции относятся  $NP$  – количество популяции,  $G_{max}$  – количество поколений, которое необходимо сгенерировать,  $F$  – коэффициент мутации,  $Cr$  – коэффициент скрещивания. Коэффициент мутации задается в пределах  $[0, 1]$ , рекомендуется использовать значения  $[0,4, 1]$ . Диапазон коэффициента скрещивания  $[0, 1]$ , рекомендуется использовать среднее значение 0,5. Схема модуля ввода представлена на рисунке 3.7.



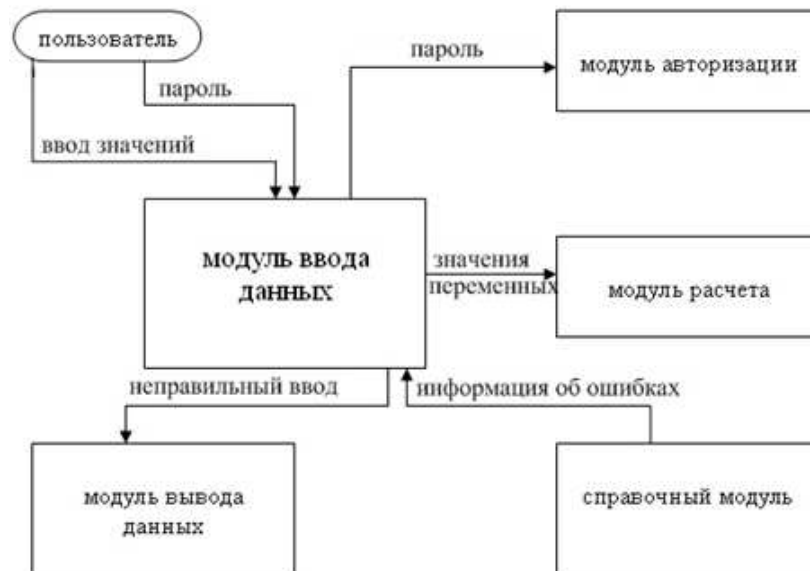


Рисунок 3.7 – Схема работы модуля ввода данных

### 3.4.4 Модуль расчета

Модуль расчета является основным и производит все необходимые расчеты промежуточных и основных параметров, поиск оптимального электрооборудования. Схема функционирования модуля представлена на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Схема работы модуля расчета

### 3.4.5 Модуль сохранения данных

Модуль сохранения данных производит сохранение результатов работы в специально созданную таблицу базы данных, которая хранит промежуточные результаты расчетов. Процесс работы изображен на рисунке 3.9.

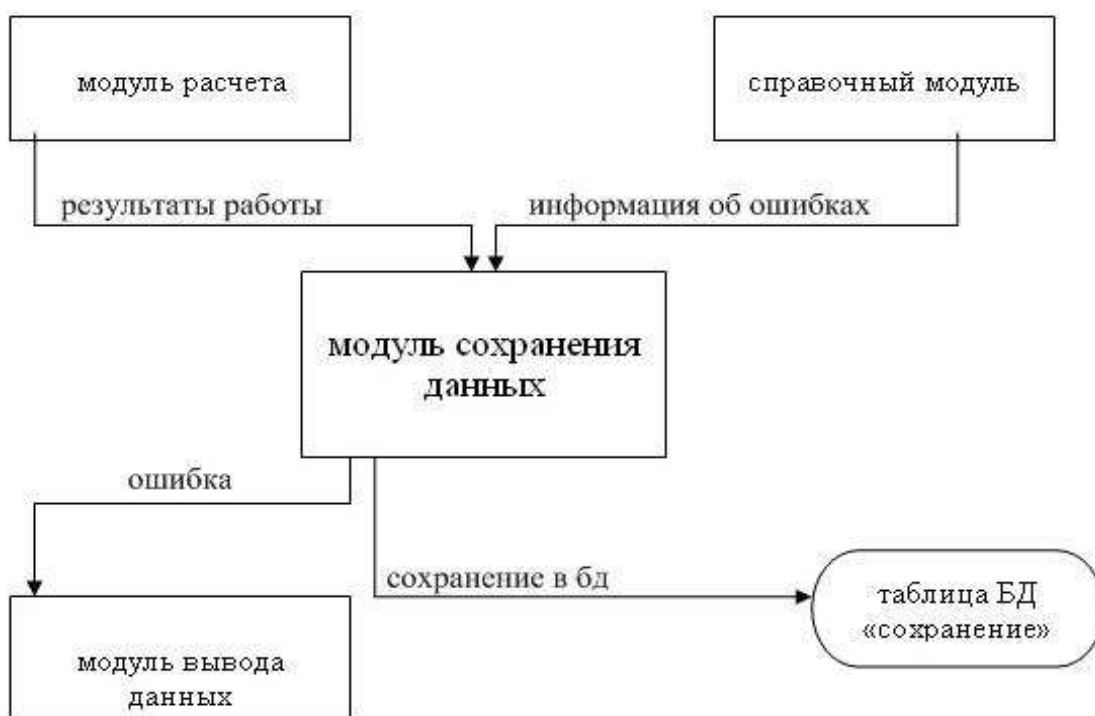


Рисунок 3.9 – Схема работы модуля сохранения данных

### 3.4.6 Модуль администрирования

Модуль администрирования доступен только в режиме администратора. Он позволяет добавлять, удалять, просматривать и редактировать записи в таблице базы данных, содержащей справочник по двигателям, удалять сохраненные записи. Также данный модуль реализует смену пароля администратора. Схема работы модуля представлена на рисунке 3.10.

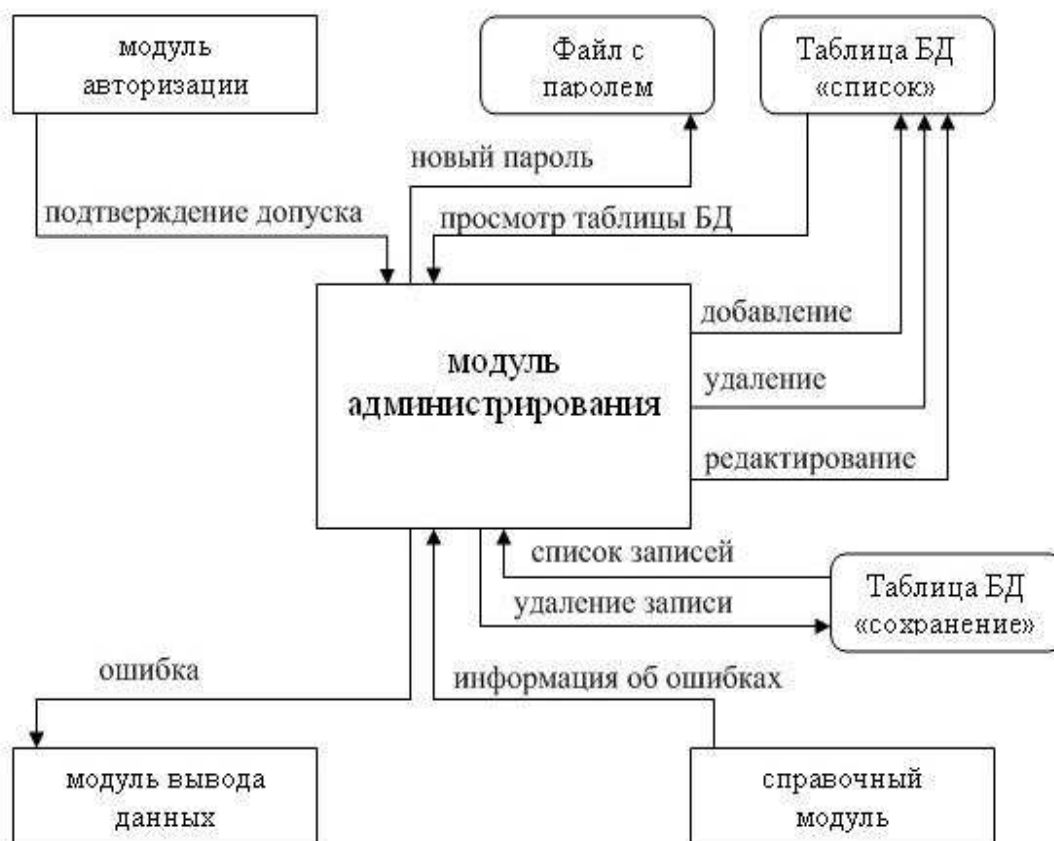


Рисунок 3.10 – Схема работы модуля администрирования

### 3.4.7 Модуль вывода данных

Модуль вывода данных организует вывод результатов работы на экран монитора в виде списка выбранного электрооборудования, где выводятся список марки двигателей и трансформаторов с их характеристиками. Для расчета приведенных затрат вводятся нормативный коэффициент эффективности, единовременные капитальные вложения, амортизационные отчисления и стоимости электрооборудования. Также в этот модуль входят результаты предыдущих шагов в виде детализации по индивидам и детализации по поколениям для того, чтобы просматривать промежуточные значения, выбираемых системой.

Процесс работы модуля изображен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Схема работы модуля вывода данных

### 3.4.8 Справочный модуль

Справочный модуль осуществляет сопровождение предупреждениями и подсказками при работе с программой, т.е. он контролирует соответствие введенных значений. Его работа показана на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Схема работы справочного модуля

### 3.5 Порядок работы программы

#### 3.5.1 Численный эксперимент

В программу были введены исходные параметров нагрузок на каждый из двигателей, число популяции, максимальное число поколений, коэффициенты мутации и скрещивания, нагрузки на осветительные линии, стоимость электроэнергии, как показано на рисунке 3.13. После нажатия кнопки «Ок» выводится форма вывода.

---

**Полная мощность  $P_u$  устройства(нагрузки на привод), кВт**

Двигатель №1	Двигатель №2	Двигатель №3
<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="24"/>

**Нагрузка  $P_p$  осветительных линий, кВт**

I линия	II линия
<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="30"/>

**Начальные параметры**

cos $\phi$ п	cos $\phi$ нач	кпд нач	I кпд	II кпд	С <sub>о</sub> – стоимость 1кВт <sup>ч</sup> электроэнергии, руб
<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="2.5"/>

**Параметры метода дифференциальной эволюции**

NP	Gmax	F	Cr
<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>

Рисунок 3.13 – Ввод исходных данных

Результат в виде выбранного электрооборудования показан на рисунке 3.14, где выводятся списком марки двигателей и трансформаторов с их паспортными характеристиками. Если заполнить поля ввода нормативного коэффициента эффективности, единовременных капитальных вложений, амортизационных отчислений, выраженных в процентах, которые установлены для устройств электропередачи, электродвигателей и силового оборудования из [16], то программа рассчитает приведенные затраты. Стоимости электрооборудования и единовременные капитальные вложения измеряются в ден. ед. Номинальная мощность

двигателя и потери мощностей измеряются в кВт, а номинальная мощность трансформатора – кВА.

[Результат](#)
[Детализация по индивидам](#)
[Детализация по поколениям](#)
[Скачать детализацию](#)

Стоимость потерь электроэнергии  $C_p = 320401.31$  руб.  
 Потери активной энергии в двигателях  $\Delta Z_{a.d.} = 0.12$  кВт\*ч  
 Потери активной энергии в трансформаторах  $\Delta Z_{a.t.} = 128160.41$  кВт\*ч

**Параметры для подсчета затрат**

Ен 
 К, руб 
 Рт, % 
 Ра, %

### Двигатели

№	Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	Кэффициент полезного действия	Кэффициент мощности	Стоимость двигателя, руб
1	4AC225M6Y3	34	0.81	0.91	91000
2	BAO-62-2	17	0.87	0.9	50000
3	4AC180M4Y3	27	0.885	0.91	70000

### Трансформаторы

№	Марка трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Потери мощности холостого хода, кВт	Потери мощности короткого замыкания, кВт	Стоимость трансформатора, руб
2	TM-63	63	0.22	1.28	89000
5	TM-25	25	0.11	0.6	61000
6	TM-40	40	0.15	0.88	85000
7	TM-63	63	0.22	1.28	89000
4	TM-160	160	0.41	2.65	90000
3	TM-40	40	0.15	0.88	85000
1	TM-400	400	0.83	5.5	130000

Рисунок 3.14 – Список выбранного электрооборудования

Для расчета приведенных затрат вводятся нормативный коэффициент эффективности 0.12, единовременные капитальные вложения 100тыс.руб., амортизационные отчисления для трансформаторов 6.4% и для оборудования 4.3% и стоимости электрооборудования. Заполненные данные показаны на рисунке 3.14. Нажать на кнопку «Подсчитать». Результат расчета изображен на рисунке 3.15 в поле «Итого».

## Итого

Затраты: 398084.31 руб.

Рисунок 3.15 – Расчет приведенных затрат

Результатом расчетного эксперимента является расчет программой выбора электрооборудования и расчет приведенных затрат.

### 3.5.2 Руководство пользователя

Экспертная система разработана на тестовом сайте, поэтому его работа осуществляется в локальном режиме для чего используется Open Server.

Чтобы начать работать с кодом, нужно:

- создать домен в папке «OpenServer/domains», sapr.loc;
- загрузить исходный код экспертной системы в созданную папку и перезапустить Open Server;
- найти и открыть свой сайт в подменю «Мои сайты» (Рисунок 3.16). Сайт будет запущен в браузере, который установлен по умолчанию.

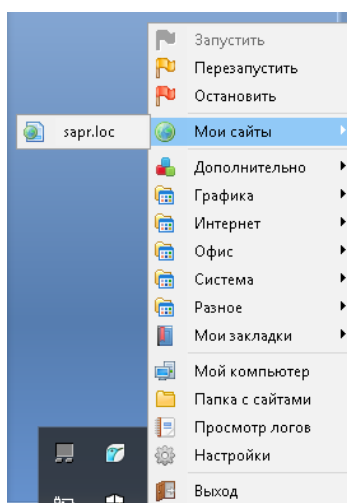


Рисунок 3.16 – Сайт sapr.loc в подменю «Мои сайты»

После загрузки страницы в браузере появится окно входа в систему.

### *Вход в основную часть в режиме пользователя*

После запуска установленной программы, вы увидите окно входа, показанное на рисунке 3.17. Для входа в программу в режиме пользователя введите в поле «Имя пользователя» user, «Пароль» - user, нажмите кнопку «Вход», вход в режиме администратора осуществляется с именем – admin, паролем – ad123.

Рисунок 3.17 – Окно входа

После успешного входа открывается основное окно (рисунок 3.18). Оно является центральным звеном программного интерфейса и содержит переходы на выполнение большинства действий.

Рисунок 3.18 – Основное окно

Необходимо заполнить следующие поля ввода: нагрузки на двигатель 1,2,3 и параметры метода дифференциальной эволюции. К параметрам метода



дифференциальной эволюции относятся  $NP$  – количество популяции,  $G_{max}$  – количество поколений, которое необходимо сгенерировать,  $F$  – коэффициент мутации,  $Cr$  – коэффициент скрещивания. Коэффициент мутации задается в пределах  $[0, 1]$ , рекомендуется использовать значения  $[0,4, 1]$ . Диапазон коэффициента скрещивания  $[0, 1]$ , рекомендуется использовать среднее значение  $0,5$ . Нажать на кнопку «Ок». При вводе допустимых значений поля ввода подсвечиваются синей рамкой, в противном случае – красной, как показано на рисунке 3.19, где параметр  $F$  – коэффициента мутации больше 1 и содержит недопустимое буквенное значение.

**Полная мощность  $P_u$  устройства(нагрузки на привод), кВт**

Двигатель №1	Двигатель №2	Двигатель №3
<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="24"/>

**Нагрузка  $P_p$  осветительных линий, кВт**

I линия	II линия
<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="30"/>

**Начальные параметры**

cosφi	cosφ нач	кпд нач	I кпдi	η кпдi	Co – стоимость 1кВт*ч электроэнергии, руб
<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="2.5"/>

**Параметры метода дифференциальной эволюции**

NP	$G_{max}$	F	Cr
<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0.5"/>

Рисунок 3.19 – Ввод недопустимого значения

### *Выбор электрооборудования*

Сначала необходимо заполнить все поля модуля ввода, после чего будут рассчитаны потери, оптимизированы методом дифференциальной эволюции, согласно алгоритму принятия решения выведен список трансформаторов и двигателей с их паспортными характеристиками, далее нажмите кнопку «Ок» (рисунок 3.18). Детализация по индивидам осуществляет просмотр значений предыдущих этапов выбора индивида, позволяющих обосновать выбор – это

есть модуль объяснений. На рисунке 3.20 пример детализации по индивидам на примере 1 индивида с размером популяции равной 10 и количеством поколений – 4.

[Результат](#)
[Детализация по индивидам](#)
[Детализация по поколениям](#)
[Скачать детализацию](#)

**1 индивид**

Gi	пд 1	пд 2	пд 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.89000	0.80000	0.85000	33.70787	18.75000	28.23529	42.13483	23.43750	35.29412
u1	0.85000	0.86500	0.85000	34.65789	17.83645	28.23529	45.43132	23.43750	35.29412
2	0.85000	0.86500	0.85000	34.65789	17.83645	28.23529	45.43132	23.43750	35.29412
u2	0.85000	0.86500	0.86500	34.65789	16.72113	26.43867	43.88808	23.43750	33.39897
3	0.85000	0.86500	0.86500	34.65789	17.83645	28.23529	43.88808	23.43750	33.39897
u3	0.85500	0.85000	0.90000	36.25659	17.83645	28.23529	43.88808	23.43750	35.04403
4	0.85500	0.85000	0.90000	34.65789	17.83645	28.23529	43.88808	23.43750	35.04403

Рисунок 3.20 – Детализация по индивидам

Детализация по поколениям осуществляет просмотр значений предыдущих этапов выбора индивида в поколении, что предоставляет в удобной форме расчетные значения параметров электрооборудования. На рисунке 3.21 пример детализации по поколениям для 1 индивида с размером популяции равной 10 и количеством поколений – 4.

[Результат](#)
[Детализация по индивидам](#)
[Детализация по поколениям](#)
[Скачать детализацию](#)

**1 поколение**

NPi	пд 1	пд 2	пд 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.89000	0.80000	0.85000	33.70787	18.75000	28.23529	42.13483	23.43750	35.29412
2	0.83000	0.88000	0.87000	36.14458	17.04545	27.58621	45.18072	21.30682	34.48276
3	0.90000	0.83000	0.86000	33.33333	18.07229	27.90698	41.66667	22.59036	34.88372
4	0.87000	0.85000	0.90000	34.48276	17.64706	26.66667	43.10345	22.05882	33.33333
5	0.86000	0.81000	0.84000	34.88372	18.51852	28.57143	43.60465	23.14815	35.71429
6	0.82000	0.90000	0.86000	36.58537	16.66667	27.90698	45.73171	20.83333	34.88372
7	0.83000	0.83000	0.90000	36.14458	18.07229	26.66667	45.18072	22.59036	33.33333
8	0.82000	0.86000	0.82000	36.58537	17.44186	29.26829	45.73171	21.80233	36.58537
9	0.86000	0.85000	0.88000	34.88372	17.64706	27.27273	43.60465	22.05882	34.09091
10	0.81000	0.85000	0.87000	37.03704	17.64706	27.58621	46.29630	22.05882	34.48276

Рисунок 3.21 – Детализация по поколениям

Вкладка «Скачать детализацию» позволяет сохранить результаты вычислений и детализации в виде файла формата CSV. После перехода по вкладке, необходимо нажать на ссылку «Скачать в CSV», после чего просмотр файла result.csv будет доступен в MicrosoftExcel (Рисунок 3.22).

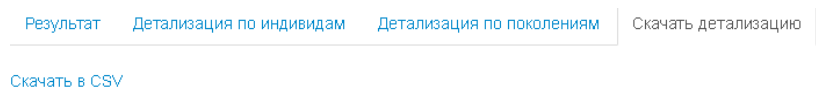


Рисунок 3.22 – Скачать детализацию

Во вкладке «Результат», появившемся после вывода списков электрооборудования необходимо заполнить форму (Рисунок 3.23), где указывают нормативный коэффициент эффективности, единовременные капитальные вложения, амортизационные отчисления и стоимости электрооборудования.

#### Параметры для подсчета затрат

Ен    
 К, руб    
 Рт, %    
 Ро, %    
 ...

#### Двигатели

№	Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	Коэффициент полезного действия	Коэффициент мощности	Стоимость двигателя, руб
1	4AC225M6Y3	34	0.81	0.91	91000
2	BAO-62-2	17	0.87	0.9	50000
3	4AC180M4Y3	27	0.885	0.91	70000

#### Трансформаторы

№	Марка трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Потери мощности холостого хода, кВт	Потери мощности короткого замыкания, кВт	Стоимость трансформатора, руб
2	TM-63	63	0.22	1.28	89000
5	TM-25	25	0.11	0.6	61000
6	TM-40	40	0.15	0.88	85000
7	TM-63	63	0.22	1.28	89000
4	TM-160	160	0.41	2.65	90000
3	TM-40	40	0.15	0.88	85000
1	TM-400	400	0.83	5.5	130000

Рисунок 3.23 – Форма ввода приведенных затрат

Значения единовременных капитальных вложения выбираются из ПУЭ согласно отрасли промышленного предприятия. Амортизационные отчисления выражаются в процентах, значения которых установлены для устройств электропередачи, электродвигателей и силового оборудования из [16]. Стоимости электрооборудования и единовременные капитальные вложения измеряются в ден.ед. Номинальная мощность двигателя, потери мощности холостого хода трансформатора, потери мощности при коротком замыкании трансформатора измеряются в кВт, а номинальная мощность трансформатора – кВА. Для получения значения приведенных затрат нажать на кнопку «Подсчитать». После чего программа выдаст приведенные затраты во вкладке «Результат» и поле «Итого», как показано на рисунке 3.15.

#### *Сохранение результатов*

Сохраненный результат – result.csv показан на рисунке 3.24, где указаны потери активной мощности в двигателях и трансформаторах, список рекомендуемого электрооборудования, а также отчеты детализации по индивидам. Чтобы открыть файл в удобной форме в MicrosoftExcel, необходимо следовать указателю: вкладка «Данные» – Вставка из текста – Указать путь к файлу result.csv и выбрать его – нажать на кнопку «Импорт». Откроется окно мастера текстов (импорт), где на первом шаге формат данных выбирается с разделителями, начать его с первой строки, нажимаем «Далее». Вторым шагом – выбор символов разделителей: знак табуляции, точка с запятой, нажимаем «Далее». Шаг третий пропускается, нажимаем «Готово». Остается лишь выбрать куда поместить данные.

Полная мощность Ру устройства(нагрузки на привод), кВт					
Двигатель №1	Двигатель №2	Двигатель №3			
30	15	24			
Нагрузка Рр осветительных линий, кВт					
I линия	II линия				
20	30				
Начальные параметры					
cosφi	cosφ нач	кпд нач	l кпдi	h кпдi	Co – стоимость 1кВт*ч электроэнергии, руб
0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	02.май
Параметры метода дифференциальной эволюции					
NP	Gmax	F	Cr		
10	4	0.5	0.5		
Стоимость потерь электроэнергии					
320401.31 руб.	Потери активной энергии в двиг	Потери активной энергии в трансформаторах ΔЭ.т.			
	0.12 кВт*ч	128160.41 кВт*ч			
Параметры для подсчета затрат					
En	K, руб	Pг, %	Рo, %		...
0.12	100000	9		04.мар	
Итого					
398084.31					

Двигатели					
№	Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	Коэффициент полезного действия	Коэффициент мощности	Стоимость двигателя, руб
1	4AC225M6У3	34	0.81	0.91	91000
2	BAO-62-2	17	0.87	0.9	50000
3	4AC180M4У3	27	0.885	0.91	70000
Трансформаторы					
№	Марка трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Потери мощности холостого хода	Потери мощности короткого замыкания	Стоимость трансформатора, руб
2	TM-63	63	0.22	я нв.28	89000
5	TM-25	25	0.11	0.6	61000
6	TM-40	40	0.15	0.88	85000
7	TM-63	63	0.22	я нв.28	89000
4	TM-160	160	0.41	фев.65	90000
3	TM-40	40	0.15	0.88	85000
1	TM-400	400	0.83	05.май	130000

Детализация по индивидам									
1 индивид									
Gi	па 1	па 2	па 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.89	0.8	0.85	33.70787	18.75	28.23529	42.13483	23.4375	35.29412
u1	0.85	0.865	0.85	34.65789	17.83645	28.23529	45.43132	23.4375	35.29412
2	0.85	0.865	0.85	34.65789	17.83645	28.23529	45.43132	23.4375	35.29412
u2	0.85	0.865	0.865	34.65789	16.72113	26.43867	43.88808	23.4375	33.39897
3	0.85	0.865	0.865	34.65789	17.83645	28.23529	43.88808	23.4375	33.39897
u3	0.855	0.85	0.9	36.25659	17.83645	28.23529	43.88808	23.4375	35.04403
4	0.855	0.85	0.9	34.65789	17.83645	28.23529	43.88808	23.4375	35.04403
2 индивид									
Gi	па 1	па 2	па 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.83	0.88	0.87	36.14458	17.04545	27.58621	45.18072	21.90682	34.48276
u1	0.865	0.88	0.87	33.03187	17.04545	28.53832	44.16698	21.90682	34.48276
2	0.865	0.88	0.87	33.03187	17.04545	28.53832	44.16698	21.90682	34.48276
u2	0.825	0.8175	0.845	33.03187	17.04545	28.23152	43.32349	23.83615	35.05511
3	0.825	0.8175	0.845	33.03187	17.04545	28.23152	43.32349	23.83615	35.05511
u3	0.87	0.8175	0.845	34.64948	17.68838	27.50601	47.16552	23.83615	35.05511
4	0.87	0.8175	0.845	34.64948	17.68838	27.50601	47.16552	23.83615	35.05511
3 индивид									
Gi	па 1	па 2	па 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.9	0.83	0.86	33.33333	18.07229	27.90698	41.66667	22.59036	34.88372
u1	0.9	0.875	0.845	33.33333	17.94786	27.90698	45.40309	21.44608	34.88372
2	0.9	0.875	0.845	33.33333	17.94786	27.90698	45.40309	21.44608	34.88372
u2	0.875	0.875	0.87	34.23701	17.63825	27.28318	45.40309	22.57818	36.90214
3	0.875	0.875	0.87	34.23701	17.63825	27.28318	45.40309	22.57818	36.90214
u3	0.8425	0.8	0.84375	33.89394	17.63825	27.28318	44.6525	25.08195	35.98447
4	0.8425	0.8	0.84375	33.89394	17.63825	27.28318	44.6525	25.08195	35.98447

Детализация по индивидам									
1 индивид									
Gi	па 1	па 2	па 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.8	0.9	0.86	37.5	16.66667	27.90698	46.875	20.83333	34.88372
u1	0.8	0.9	0.85	35.28906	19.27283	28.23556	44.14209	20.83333	34.88372
2	0.8	0.9	0.86	37.5	16.66667	27.90698	46.875	20.83333	34.88372
u2	0.8	0.9	0.8575	32.17122	17.24138	27.90698	43.26804	23.05293	34.88372
3	0.8	0.9	0.86	37.5	16.66667	27.90698	46.875	20.83333	34.88372
u3	0.8	0.9	0.86	33.8342	17.74345	27.90698	46.65343	22.31187	34.07203
4	0.8	0.9	0.86	37.5	16.66667	27.90698	46.875	20.83333	34.88372
2 индивид									
Gi	па 1	па 2	па 3	Рнд 1	Рнд 2	Рнд 3	Снт 2	Снт 5	Снт 6
1	0.8	0.87	0.86	37.5	17.24138	27.90698	46.875	21.55172	34.88372
u1	0.895	0.845	0.86	33.4893	16.95182	27.90698	46.875	21.55172	36.78129
2	0.8	0.87	0.86	37.5	17.24138	27.90698	46.875	21.55172	34.88372
u2	0.8	0.87	0.83	36.1873	18.22863	27.90698	43.76901	23.08692	33.72762
3	0.8	0.87	0.86	37.5	17.24138	27.90698	46.875	21.55172	34.88372
u3	0.8	0.83625	0.83375	36.84584	17.24138	29.02765	47.95958	21.92543	34.18765
4	0.8	0.87	0.86	37.5	17.24138	27.90698	46.875	21.55172	34.88372

Рисунок 3.24 – Сохраненный результат

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом работы представленной магистерской диссертации является методика выбора оптимального электрооборудования для сети, на основе которой разработано программное приложение «Сети электроснабжения» – экспертная система для оценки эффективности сетей электроснабжения на основе метода дифференциальной эволюции. Данная работа нацелена на подбор электрооборудования, что позволяет оптимизировать приведенные затраты путем сокращения потерь электроэнергии согласно алгоритму принятия решения выбора электрооборудования. Разработанная методика способствует снижению не только энергозатрат, но и амортизационных расходов предприятия.

Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1) проведен анализ существующих экспертных систем и современных методов управления техническими системами;
- 2) построена математическая модель экспертизы сети, включающая в себя задачу оптимизации энергозатрат и модель принятия решения;
- 3) создано программное приложение «Сети электроснабжения» для решения поставленной задачи.

Результаты работы планируется использовать в учебном процессе для выполнения курсового и дипломного проектирования, а также при проектировании электрических сетей для сокращения потребления энергозатрат. Сфера применений представленной системы не ограничивается участком цеха предприятия. Возможно расширение масштабов проектирования для всего промышленного предприятия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Алгоритм дифференциальной эволюции в задачах оптимизации маршрутов прокладки инженерных сетей [Электронный ресурс] / О.Г. Монахов, Э.А. Монахова, Г.Ы. Токтошов // Наука и Образование. – Электрон. журн. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – № 09. – С. 135–144.
- 2 Алиев, И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию / И.И. Алиев. – 2 изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2000. – 255 с.
- 3 Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 384 с.
- 4 Джексон, П. Введение в экспертные системы. / П. Джексон. – Москва: Вильямс, 2001. – 624 с.
- 5 Дифференциальная эволюция [Электронный ресурс] // Поисковая система «Wikipedia». – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Дифференциальная\\_эволюция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Дифференциальная_эволюция)
- 6 Долотина, Е.А. Особенности применения экспертных систем в интеллектуальных компьютерных обучающих системах / Е.А. Долотина // НиКа. – 2013. – № 1. – С.276-278.
- 7 Дошина, А.Д. Экспертная система. Классификация. Обзор существующих экспертных систем / А.Д. Дошина // Молодой ученый. – 2016. – №21. – С. 756-758.
- 8 Држевецкий, Ю.А. Экспертные системы как Прикладная область искусственного интеллекта /Ю.А. Држевецкий // НиКа. – 2011. – №1. – С.152-154.
- 9 Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования : учебное пособие / Г.Б. Евгеньев. – Москва : МГТУ им.Баумана, 2012. – 410 с.
- 10 Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – Москва: НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.

- 11 Затылкин, А.В. Синтез системы управления интеллектуальной компьютерной обучающей системой / А.В. Затылкин, Б.К. Кемалов, Н.К. Юрков // Новые промышленные технологии. – 2011. – № 2. – С. 58-62.
- 12 Макаров И.М. Теория выбора и принятия решений: учебное пособие / И.М.Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.В. Соколов. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 328 с.
- 13 Мартемьянов Ю.Ф. Экспертные методы принятия решений: учебное пособие / Ю.Ф. Мартемьянов, Т.Я. Лазарева. – Тамбов: ТГТУ, 2010. – 78 с.
- 14 Онлайн база по электрическим сетям и электрооборудованию [Электронный ресурс] / А.Н. Алюнов // Онлайн Электрик: Интерактивные расчкты систем электроснабжения. – Режим доступа: <https://online-electric.ru>
- 15 Пантелеев, А. В. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем / А.В. Пантелеев, Дмитраков И. Ф. // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2010. – № 37. – Режим доступа: <https://mai.ru/upload/iblock/f49/primenenie-metoda-differentsialnoy-evolyutsii-dlya-optimizatsii-parametrov-aerokosmicheskikh-sistem.pdf>
- 16 Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
- 17 Применение оптимизационных методов для решения обратной задачи сейсморазведки: отчет о НИР / Бабичев, Д.С. – Москва: МФТИ, 2014. – 114 с.
- 18 Прокопенко, Н. Ю. Системы поддержки принятия решений на базе Deductor Studio Academic 5.3: учебное пособие / Н.Ю. Прокопенко. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2017. – 188 с.
- 19 Пупкова, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления/ К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. - 784 с.



20 Размахнина, А.Н. О применении экспертных систем в различных областях/ А.Н. Размахнина, Р.И. Баженов // Постулат. – 2017. – №1 - С. 38-45.

21 Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий: учебное пособие / Ю.Д.Сибикин. – Москва: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.

22 Системы автоматизированного проектирования технологических процессов. [Электронный ресурс]: Оптимизация технологических процессов // Учебные материалы онлайн «Studwood.ru». – Режим доступа: [https://studwood.ru/1641196/tovarovedenie/optimizatsiya\\_tehnologicheskikh\\_protssessov](https://studwood.ru/1641196/tovarovedenie/optimizatsiya_tehnologicheskikh_protssessov)

23 Трофименкова, Е.В. Экспертные системы. Достоинства, недостатки и применение ЭС / Е.В. Трофименкова, Н.Ю. Якушенкова // Новая наука: проблемы и перспективы. – 2016. – №4-2. – С.145-148.

24 Федоров, А.А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию.Т. 1. Электроснабжение. / А.А. Федоров. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

25 Харрис Э. PHP/mysql для начинающих: учебное пособие / Э. Харрис. Москва: Кудиц – образ, 2005. – 384 с.

26 Ходашинский, И.А Идентификация нечетких систем на основе метода дифференциальной эволюции / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // Управление, вычислительная техника и информатика Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 1 (23). – С.178-183.

27 Хомченко, А.А. Использование алгоритма дифференциальной эволюции для решения одного класса задач оптимального портфельного инвестирования / А. А. Хомченко, Н. П. Гришина, К. Лукас, С. П. Сидоров // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2013. – Т. 13. № 2(2). – С.88-91.

28 Differential Evolution (DE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www1.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>

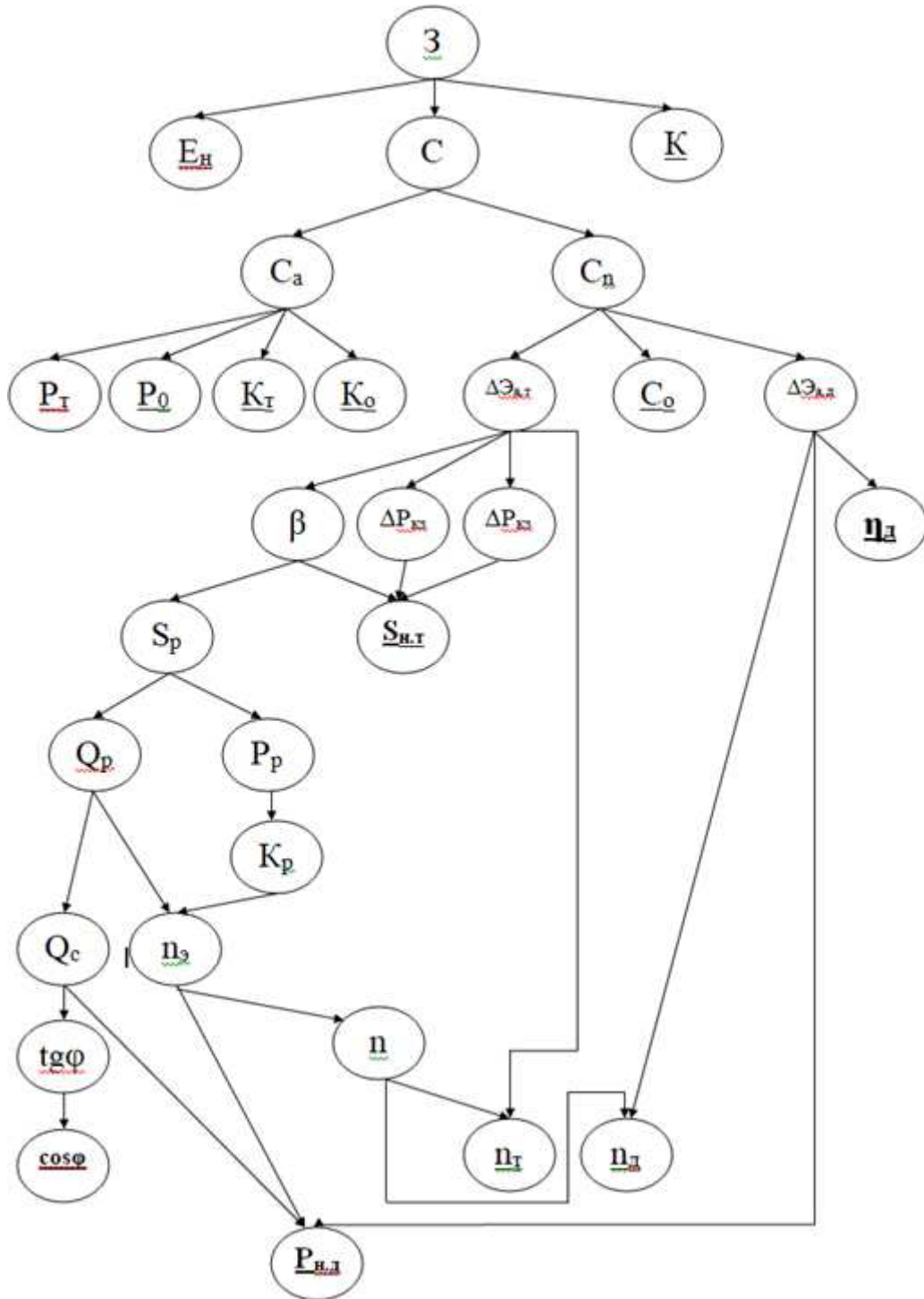
29 Kuznetsov, R.A. The technology of «computer vision» in the question of visual identification of a person/ R.A. Kuznetsov , M.A. Ushakova , M.V. Maschenko , E.A. Volkova // Scientific Visualization. – 2017. – №1. – P.124-136.

30 Shterenberg, S.I. Method of use of self-modification files for secure communication in the expert system / S.I. Shterenberg, R.I. Kaflanov , A.S. Druzhin , S.S. Marchenko // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – №1. – С.71-75 .

31 Storn R. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces / R. Storn, K. Price // Journal of Global Optimization. – 1997. – Vol. 11. – P. 341–359.

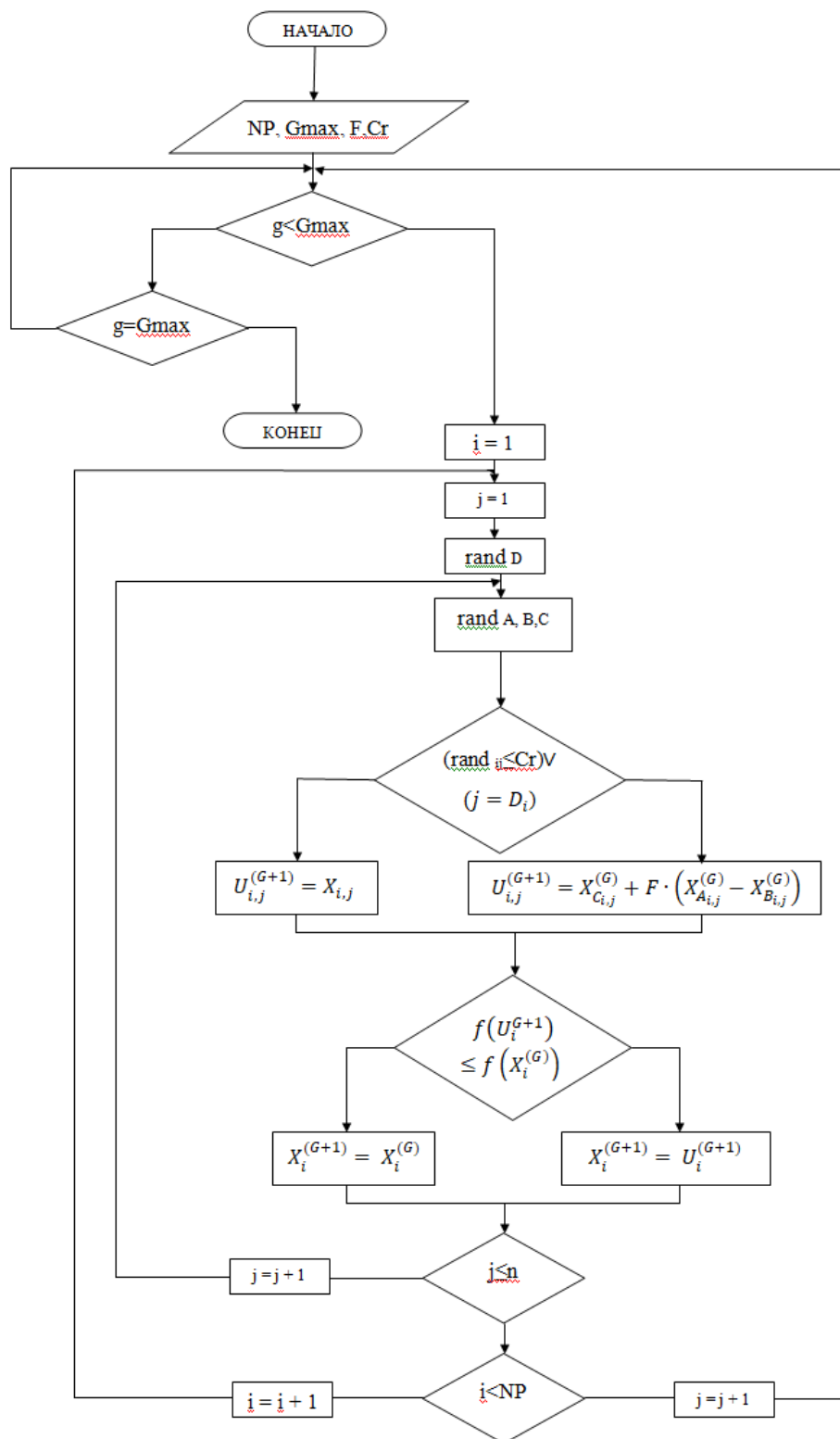
# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Граф зависимостей переменных



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Блок – схема алгоритма метода дифференциальной эволюции



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты расчета

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Исходные данные							Расчетные величины			Эффективное число электроприемников $n$	Коэффициент расчетной нагрузки $K_p$	Расчетная мощность			Расчетный ток в проводнике
2	По заданию технологов				По справочным данным			$P_c = P_n \cdot K_n$ , кВт	$Q_c = P_c \cdot \text{tg } \varphi$ , кВт	$n \cdot P_n^2$			$P_p = P_c \cdot K_p$ , кВт	$Q_p = 1,1 \cdot Q$ , кВт	$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$	
3	Наименование	Количество ЭП, шт	Номинальная		Коэффициент использования $K_n$	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	Коэффициент реактивной мощности $\text{tg } \varphi$									
4			Одного ЭП, кВт	Общая $P_n$ , кВт												
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
6	FU7 (Линия 2)	1											30			45,6
7	FU5 (M2)	1	14	14	1	0,88	0,53	14	7,42	196		0,8				
8	FU6 (M3)	1	10	10	1	0,92	0,43	10	4,3	100		0,9				

Рисунок В.1 – Пример результатов расчета нагрузок электрической схемы (документ Excel)

9	FU4 (РЦ1 – РЦ2)	3	24	24	1	0,9	0,48	24	11,72	296	1,9459	0,9	51,6	12,892	53,186	80,808
10	FU3 (Линия 1)	1											20			30,4
11	FU2 (М1)	1	7	7	1	0,9	0,48	7	3,36	49		1				
12	FU1 (ТП –РЦ1 –	5	31	31	1	0,9	0,48	31	15,08	345	2,7855	0,9	99,5	16,588	100,87	153,26

Рисунок В.2 – Пример результатов расчета нагрузок электрической схемы (документ Excel, окончание)

Таблица В.1 – Паспортные характеристики трансформаторных подстанций

Тип	Sном,кВА	Напряжение обмотки		Потери,кВт		Uкз,%	Iхх,%
		ВН	НН	Рхх	Ркз		
ТМ-25/6 - 10	25	6; 10	0,4	0,17	0,6	4,5	3,2

Таблица В.2 – Рассчитанные значения для выбора трансформатора

Нопт	n	Кз	Sc	Sn.т
7	7	0,7	34,47327	3,1

Таблица В.3 – Потери трансформатора

Потери	Активные	Реактивные
Холостого хода	Рхх	Qхх
	0,17	0,265141
Короткого замыкания при Iном	Ркз	Qкз
	0,6	0,1395
Короткого замыкания при нагрузке Кз	$Kз^2 * Pкз$	$Kз^2 * Qкз$
	0,294	0,068355
Полные потери	Рт	Qt
	0,464	0,333496

Таблица В.4 – Потери в двигателе

Мощность	7	14	10
Кпд	0,82	0,85	0,87
потери	1,26	2,1	1,3

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

**Код расчетного модуля, использующего метод дифференциальной  
эволюции**


Код программы изъят.



Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
Кафедра «Системы автоматики, автоматизированное управление и  
проектирование»




УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

 С.В. Ченцов

« 20 » июня 2018 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ**  
**ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ**  
**МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ**

Направление 09.04.02 «Информационные системы и технологии»  
Магистерская программа 09.04.02.02 Информационные системы и технологии в  
управлении технологическими процессами

Научный руководитель	 16.06.2018	доц., канд. физ.-мат. наук А. Ш. Любанова
Выпускник	<u>Тюлюш</u> 15.06.2018	Л. А. Тюлюш
Рецензент	 .06.2018	канд. физ.-мат. наук А. В. Шмидт
Нормоконтролер	 .06.2018	Т. А. Грудинова

Красноярск 2018