

На правах рукописи

Попова Валерия Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОЛОЛЁДНЫХ
ОБРАЗОВАНИЙ ЛЭП НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ
МОДЕЛЕЙ**

Специальность 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Соловьев Вячеслав Алексеевич, профессор кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок" ФГБОУ ВО "Комсомольский-на-Амуре государственный университет", г. Комсомольск-на-Амуре.

Официальные оппоненты:

УГАРОВ Геннадий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» , г. Саратов;

ЩУРОВ Артем Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» , г. Новочеркасск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» , Уфа.

Защита состоится «25» декабря_ 2023_года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.316.03 и по адресу diss@knastu.ru

Автореферат разослан «__» _ноября_ 2023_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.316.3
кандидат физико-математических наук
доцент



Григорьева
Анна Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. В настоящее время значительную проблему при эксплуатации ЛЭП систем тягового электроснабжения представляют аварийные ситуации, связанные с обледенением проводов и прочих конструкций ЛЭП. Наличие гололеда на проводах обуславливает возникновение дополнительных механических нагрузок на все конструктивные элементы линии.

При значительных гололедных отложениях, превышающих нормативные значения, происходят обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор воздушных линий. Неравномерность отложения льда на фазных проводах, приводящая к различным значениям стрел провеса, а также неодновременный сброс гололеда при его таянии, вызывающий «подскок» отдельных проводов, приводят к перекрытию воздушной изоляции.

Гололед также является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию. При возникновении таких аварийных ситуаций энергокомпании несут крупные убытки, связанные с восстановлением поврежденных участков ЛЭП и с недоотпуском энергии потребителям, нарушается непрерывность энергоснабжения как простых жителей, так и социально-значимых объектов и промышленных предприятий. Среднее время ликвидации гололедных аварий превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз.

Кроме того, применяемые на сегодня способы и устройства для борьбы с гололедом на проводах ЛЭП отличаются относительно невысокой энергоэффективностью, необходимостью длительного отключения линии, а также не позволяют заблаговременно прогнозировать процесс гололедообразования.

Несмотря на существующее разнообразие применяемых и разрабатываемых способов борьбы с гололедом и устройств их реализующих, автономное применение таких устройств малоэффективно. Для получения максимального эффекта необходимо применение не единичных экземпляров устройств, а построение целых систем, включающих в себя подсистемы для мониторинга текущего состояния линии, прогнозирования времени образования гололеда, принятия решений по проведению очистки и устройств, производящих непосредственную очистку ото льда. Вопросом систем прогнозирования аварийной или предаварийной ситуации занимаются лишь частично, фрагментарно, на сегодняшний день существуют только отрывки таких систем.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день существуют только единичные попытки создания таких систем мониторинга и прогнозирования образования гололеда на проводах ЛЭП. Например, А. Самарин В. Масалов «Современные технологии мониторинга воздушных электросетей.»; Н. Ю. Шевченко, Ю.В Лебедева, Н.П.Хромов «Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в камышинских электрических сетях». Все эти системы построены на сходных принципах и имеют близкую архитектуру.

Например, Исмагилов Ф. Р., Максимов В. А., Волкова Т. Ю., Елизарьев А. Ю., Валеев А. Р. «Региональная карта расчетных районов территории Республики Башкортостан по толщине стенки гололеда», Титов, Д. Е. «Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередач и в контактных сетях», Сухоруков, С.И. «Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач». Таким образом, разработка модели прогнозирования гололёдообразования на проводах ЛЭП в настоящее время является актуальной.

Цель диссертационного исследования заключается в повышении эффективности систем удаления гололёда за счёт разработки подсистемы прогнозирования

гололёдообразования, позволяющей в упреждающем режиме предсказать момент времени, в который масса гололёда достигнет критического значения.

Для реализации цели работы потребовалось решить следующие задачи:

1. Исследовать и провести критический анализ существующих систем мониторинга и прогнозирования гололёдообразования на ЛЭП.
2. Оценить возможность разработки математического описания процесса гололёдообразования на базе использования статистических данных.
3. Разработать подход к определению областей функций принадлежности нечеткого идентификатора.
4. Разработать подход к эффективной обработке статистических данных для определения рабочей области для нечеткой идентификации с помощью математических методов.
5. Провести нечёткую идентификацию параметров системы прогнозирования
6. Провести синтез структуры и разработку элементов системы прогнозирования гололёдообразования. Реализовать компьютерную модель системы прогнозирования
7. Провести вычислительный эксперимент для проверки адекватности работы системы прогнозирования.

Объект исследования: Процесс гололедообразования на проводах Линий электропередач.

Предмет исследования: Система прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Предложен подход, опирающийся на математические методы для обработки статистических данных, снижающий временные ресурсы для выявления рабочих областей нечеткого идентификатора.

Разработан нечёткий принцип формирования системы прогнозирования гололедообразования, позволяющий при отсутствии ряда формальных зависимостей получить результат, хорошо коррелирующий со статистическими данными.

Создана система прогнозирования гололедообразования на базе нечетких модулей, обеспечивающая заблаговременное информирование о критической массе гололёда.

Теоретическая значимость: Разработаны алгоритмы нечеткой идентификации, опирающиеся на математическую обработку статистических данных.

Практическая значимость: Разработана система прогнозирования гололедообразования на базе нечетких модулей, которая может быть использована в составе имеющихся систем удаления гололеда, внедрение которой предполагается в СП «Северные электрические сети» филиала АО «ДРСК».

Методы исследования, Математический аппарат систем искусственного интеллекта, теория нечётких множеств, методы математического моделирования, математическая статистика, методы обработки статистических данных, основы метеорологии.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Подход, опирающийся на математические методы для обработки статистических данных, снижающий временные ресурсы для выявления рабочих областей нечеткого идентификатора.
2. Нечёткий принцип формирования системы прогнозирования гололедообразования, позволяющий при отсутствии ряда формальных зависимостей получить результат, близкий к реальному
3. Предложен структурный и параметрический синтез системы прогнозирования гололедообразования на базе нечетких модулей, обеспечивающий работоспособность системы в сравнительно широком диапазоне изменения ледообразующих параметров.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается обоснованностью принятых расчётных коэффициентов влияния на гололедообразование рассматриваемых параметров; адекватностью используемых при исследовании моделей; непротиворечивостью экспериментальных результатов.

Соответствие паспорту специальности.

1. Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых.

2. Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях.

Реализация результатов работы Работа выполнена при поддержке РФФИ по результатам конкурсного отбора научных проектов в Конкурсе на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»), научный проект № 19-38-90129 «Повышение эффективности систем удаления гололёда с проводов ЛЭП».

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объёма исследований, приведённых в диссертационной работе, в разработке основных методик, алгоритмов, математических моделей; в анализе и обобщении основных результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2020, FarEastCon-2021.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 10 работах, 4 из которых опубликованы в ведущих журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в трудах научных конференций, индексируемых в международной базе SCOPUS, 2 – в трудах всероссийской научно-технической конференциях студентов и аспирантов, 1 - Победа в I туре III всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов и научных академических институтов России.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены научные проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, реализации и апробации работы.

В первой главе проведен анализ существующих систем мониторинга и удаления льда с проводов ЛЭП. Несмотря на существующее разнообразие применяемых и разрабатываемых способов борьбы с гололедом и устройств их реализующих, автономное применение таких устройств малоэффективно. Для получения максимального эффекта необходимо применение не единичных экземпляров устройств, а построение целых систем, включающих в себя подсистемы для мониторинга текущего состояния линии, прогнозирования времени образования гололеда, принятия решений по проведению очистки и устройств, производящих непосредственную очистку ото льда.

На сегодня существуют только единичные попытки создания таких систем [1, 2, 3]. Все эти системы построены на сходных принципах и имеют близкую архитектуру:

- на ЛЭП (непосредственно на проводах и/или в подвеске провода) устанавливаются специальные датчики [2], измеряющие текущие параметры линии (механические нагрузки в проводах, температуру и влажность окружающего воздуха, скорость ветра, температуру провода и т.д.);

- на опорах ЛЭП устанавливаются пункты измерения, собирающие информацию с ближайших датчиков, производящие ее оцифровку, если это требуется, и организующие передачу информации на пульт оператора;

- пульт или автоматизированное рабочее место оператора (возможно – несколько таких) позволяет оператору оценивать, как текущее состояние линии, так и динамику изменения ситуации во времени;

- сервера, входящие в структуру системы, обеспечивают сохранение всей полученной информации и ее резервирование;

- предусматривается возможность организации связи по стандартным протоколам с наиболее распространенными устройствами для плавки гололеда. Существующие на сегодня системы решают целый ряд задач по мониторингу и контролю состояния линии, однако проблему борьбы именно с гололедными отложениями решают только частично. Все эти системы производят оценку только текущей ситуации, то есть фиксируют уже свершившийся факт отложения гололеда. В условиях протяженных и разветвленных сетей, а также при существенном ограничении времени с момента начала гололедообразования до проведения очистки, важную роль в реализации мероприятий по удалению гололеда играет возможность заблаговременного прогнозирования начала и интенсивности процесса. Рассмотрены конкретные системы удаления гололеда с проводов линий электропередач, приведены их достоинства и недостатки.

Проведен анализ существующих систем прогнозирования гололедообразования. Отмечено, что в настоящее время существующие системы прогнозирования гололедообразования разработаны в основном в области обледенения воздушных и морских судов. Также существуют работы, рассматривающие зимнее обледенение автомобильных дорог. Сделан вывод, что подобные системы не подходят для прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП.

Отмечено, что из российских работ можно выделить подход к прогнозированию гололедообразования на ВЛ с помощью тепло-балансного метода, который, однако, учитывает малое количество факторов, влияющих на гололедообразование.

На основании сделанного анализа, выявлено, что

1. Не существует однозначного решения по разработке системного подхода к созданию предупредительной и исполнительной составляющей системы управления борьбы с гололедом. Показано, что существующие элементы имеют различные недостатки.

2. Имеющиеся сведения в литературе говорят о том, что единого математического описания, учитывающего наибольшее количество факторов, влияющих на процесс гололедообразования (температура воздуха, скорость и направление ветра, диаметр отложения, толщина отложения, температура поверхности почвы, температура точки росы, относительная влажность, атмосферное давление на уровне станции, атмосферное давление на уровне моря, облачность (в том числе формы облаков), погода (в том числе наличие и вид осадков)) не существует.

3. Все имеющиеся решения по системам мониторинга гололедообразования относятся к автономным объектам, не могут быть распространены на распределенный объект, которым является линия электропередач

4. В силу того, что ряд факторов, влияющих на процесс гололедообразование, описывается не количественными, а качественными показателями, то для учета этих факторов должна быть разработана система, позволяющая обрабатывать их. К примеру система, использующая нечеткую логику. Поскольку разрабатываемая система мониторинга должна работать в режиме упреждения, то данная система должна быть наделена элементами искусственного интеллекта.

Во второй главе приведена выборка измерений гололедообразования на гололедном станке, установленном на метеостанции Братолюбовка, при этом выбраны случаи отложений на проводах диаметром свыше 5 мм. за последние 10 лет.

В качестве измеряемых параметров, в той или иной степени, влияющих на процесс гололедообразования использовались: Вид отложения, время начала нарастания отложения, продолжительность стадии нарастания, продолжительность случая нарастания отложения, температура воздуха в начале нарастания отложения, температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, скорость и направление ветра в начале нарастания отложения, скорость и направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, диаметр отложения, толщина отложения, день начала случая отложения, температура поверхности почвы, температура точки росы, относительная влажность, атмосферное давление на уровне станции, атмосферное давление на уровне моря, облачность (в том числе формы облаков), погода (в том числе наличие и вид осадков).

S	Tnach	Pr1	Pr2	tnach	Nnach	vnach	tmax	Nmax	vmax	D	L	Day	tpg
13	21	5	8	-27.5	275	1	-28.7	240	1	5	4	04.01.2017	-36
13	22	5	7	-22.8	352	1	-13.8	351	2	5	4	05.02.2017	-33
13	17	7	9	-17.7	273	1	-15.7	327	1	7	6	06.03.2017	-25
13	21	5	7	-22.7	104	2	-22.4	119	2	6	5	22.12.2017	-28
13	16	8	12	-22.0	0	0	-17.5	138	2	6	5	23.12.2017	-21
13	21	5	7	-24.9	307	1	-28.0	269	1	6	5	24.12.2017	-30
13	22	6	8	-27.2	258	2	-22.5	266	2	5	4	02.01.2016	-33
13	19	5	8	-18.2	102	1	-20.0	0	0	6	5	02.03.2016	-22
13	17	6	10	-18.0	0	0	-17.0	98	1	14	13	04.03.2016	-27
13	16	9	11	-13.0	109	1	-14.1	0	0	24	23	17.03.2016	-22
13	18	6	10	-24.7	326	1	-26.2	303	1	5	4	23.12.2016	-33
13	22	3	6	-26.7	107	1	-25.8	116	2	5	4	22.01.2015	-27
13	18	8	10	-28.7	123	2	-24.3	134	2	6	4	23.01.2015	-31
13	15	9	13	-14.8	247	2	-20.5	0	0	8	5	13.02.2015	-21
13	15	9	11	-13.5	271	2	-18.8	317	1	7	4	14.02.2015	-24
13	15	8	12	-17.8	234	1	-20.7	118	1	10	8	26.02.2015	-20
13	16	8	10	-20.9	0	0	-21.7	0	0	9	8	27.02.2015	-30
13	17	3	10	-13.7	262	2	-15.6	253	1	10	7	02.03.2015	-21
13	16	8	10	-16.8	265	1	-16.8	0	0	21	19	03.03.2015	-25
13	16	5	9	-17.8	258	1	-23.6	0	0	6	5	04.03.2015	-26
14	17	5	10	-8.0	286	2	-9.7	255	2	9	8	17.03.2015	-17
13	21	3	6	-19.6	0	0	-15.4	0	0	5	4	12.03.2014	-30
13	22	3	5	-22.0	108	1	-19.2	126	1	5	4	14.03.2014	-28
13	12	14	15	-14.0	0	0	-17.9	113	1	5	3	20.11.2014	-11
13	18	6	11	-30.6	246	1	-31.0	253	1	5	4	11.12.2014	-37
13	18	6	12	-20.3	173	1	-21.6	0	0	8	6	28.12.2014	-27
13	19	6	11	-19.9	0	0	-18.8	291	1	9	7	29.12.2014	-19
13	14	9	12	-14.7	0	0	-14.9	0	0	9	6	01.03.2013	-24
13	18	5	8	-18.2	169	1	-19.2	218	1	5	4	18.03.2013	-24
13	19	5	6	-12.4	322	1	-11.6	288	1	5	3	29.03.2013	-20
13	21	2	3	-12.3	226	2	-12.3	226	2	5	4	31.03.2013	-24
13	15	6	13	-13.5	0	0	-15.0	0	0	23	23	17.11.2013	-5
13	21	6	8	-27.6	298	1	-23.1	320	2	5	3	05.01.2012	-32
13	19	5	8	-19.8	0	0	-22.5	0	0	9	8	05.03.2012	-32
16	9	2	16	0.2	315	6	-0.2	144	1	28	25	13.04.2012	1
13	17	8	11	-15.5	0	0	-16.6	0	0	10	9	10.12.2012	-24
13	17	6	12	-24.4	248	1	-31.1	230	1	10	9	07.01.2011	-35*
13	21	3	8	-24.9	0	0	-25.9	0	0	6	5	25.01.2011	-34*
13	16	8	9	-13.4	99	4	-12.4	126	4	5	4	22.02.2011	-22
13	19	5	6	-12.5	0	0	-12.3	108	2	12	11	26.03.2011	-18
14	19	5	5	-5.0	0	0	1.04	115	1	11	9	22.04.2011	-4
13	21	5	8	-34.4	276	1	-35.0	268	1	5	4	24.12.2011	-36*
13	17	9	11	-22.3	125	2	-18.6	247	1	8	3	08.01.2010	-30
13	22	5	10	-31.8	0	0	-26.4	135	2	6	5	30.01.2010	-42*
13	16	8	14	-22.4	45	2	-24.9	0	0	8	4	09.02.2010	-27
14	21	3	7	-8.8	0	0	-3.8	0	0	6	5	31.03.2010	-16
13	16	5	14	-14.2	0	0	-18.2	357	1	13	11	30.12.2010	-22
13	21	3	7	-28.8	0	0	-29.0	0	0	6	4	06.01.2009	-36*
13	18	6	12	-31.8	0	0	-29.2	0	0	5	3	08.01.2009	-36
13	18	6	13	-23.0	0	0	-20.3	0	0	13	12	14.01.2009	-37*
13	22	3	4	-15.3	0	0	-13.6	67	1	7	6	16.03.2009	-24
13	18	6	8	-21.7	0	0	-23.3	0	0	8	7	21.03.2009	-32
13	17	6	9	-15.2	0	0	-18.5	0	0	13	12	26.03.2009	-27
13	18	5	8	-9.0	0	0	-13.0	0	0	14	14	29.03.2009	-20
13	18	6	10	-20.8	0	0	-21.3	180	1	6	4	21.11.2009	-26
13	22	5	8	-28.0	225	1	-24.9	270	1	5	4	13.12.2009	-38*

Рис. 1. – Фрагмент метеорологических данных

Указано, что анализ приведенных данных показывает, что в самом общем виде толщина гололедного образования является функцией как минимум шестнадцати

параметров $D=F(T_{nach}, Pr1, t_{nach}, V_{nach}, t_{max}, t_{pp}, t_{tr}, H, Ps, OO, W, Dn, Pr2, S, P_{ym}, V_{max})$.

Проведена обработка полученных статистических данных измерения гололедных отложений для получения экспертной оценки влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования. Обработка результатов базировалась на следующих условиях:

- за фиксированную величину принимался вид гололедообразования, например, - изморозь;
- фиксировался диаметр гололедного образования;
- для конкретных фиксированных значений строились однопараметрические зависимости базовых параметров для всего имеющегося набора измерений.

Выдвинуто утверждение, исходя из анализа статистических данных, что описать аналитически временную зависимость ни одного из параметров ледообразования не представляется возможным. Следует отметить, что оценка влияния может быть описана только качественными характеристиками. Это, в свою очередь, наталкивает на то, что математическое описание процесса ледообразования целесообразно вынести в область нечетких отношений.

Сделан вывод, что поиск адекватного математического описания процесса гололедообразования как некой динамической системы необходимо вести на базе принципов нечёткой идентификации, так как он позволяет на качественном уровне оценить влияние того или иного параметра на процесс ледообразования.

Показано, что, на данный момент отсутствует математическое описание процесса гололедообразования, которое одновременно учитывало бы хотя бы несколько базовых факторов, таких как температура, влажность, скорость и направление ветра, атмосферное давление, дефицит насыщения.

Показано, что в каждом регионе имеются большие базы данных метеостанций, контролирующих процесс ледообразования, поэтому на основе этих данных можно получить аналитическую или эмпирическую зависимость выходного параметра процесса от того или иного фактора обледенения. В качестве таких данных предложено использовать набор измерений диаметра отложения гололеда на гололедном станке на метеорологических станциях Братолюбовка, Большой Шантар, Елабуга, Николаевск, Зея.

Проведен сравнительный анализ методов обработки статистических данных, сделан вывод, что данные подходы требуют больших временных затрат, результаты применения достоверны с определенной долей вероятности, не всегда возможно обеспечить требуемую точность вычислений из-за недостатков измерительной техники.

Выбран подход, который связан с непосредственной оценкой влияния того или иного фактора на диаметр отложения. В качестве первого допущения, можно пренебречь географическим положением станций и рассмотреть параметры независимо от того, на какой станции они были получены, поскольку количество рассматриваемых параметров и без географических данных превышает 10. На каждой станции выбран случай гололёдного отложения с приблизительно одинаковой температурой и диаметром, за эталонную точку принимаем точку со станции Братолюбовка.

На основании полученных результатов сделан вывод, что аналитической связи между выходным параметром – диаметром отложения и факторами, оказывающими влияние на процесс гололедообразования установить не удастся. Поэтому, задача идентификации процесса гололедообразования как объекта управления может быть реализована с использованием интеллектуальных вычислительных методов. Например, с применением методов нечеткой идентификации.

Отмечено, что при реализации нечеткого идентификатора возникает трудность в определении зон расположения функций принадлежности входных и выходных переменных [7-10]. Необходимая экспертная оценка влияния конкретного параметра на выходную величину гололедообразования может быть получена на основании обработки большой базы данных с метеостанций, в течение длительного времени проводящих

мониторинг процесса ледообразования. Обработку огромного количества статистических данных целесообразно проводить, используя различные вычислительные алгоритмы. Например, генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, алгоритм «Кукушкин поиск», муравьиный алгоритм.

Далее приведен обзор вышеуказанных алгоритмов, и сделан вывод о том, что для наших целей целесообразно использовать муравьиный алгоритм. Ориентация на муравьиный алгоритм вызвана тем, что с его помощью выявляются кратчайшие расстояния между точками, а объединение полученных точек дает возможность преобразовать разрозненные точки статистических данных в замкнутую область графика, то есть выделить область расположения нечеткого множества анализируемого параметра.

Приводятся результаты построения областей расположения нечеткого множества конкретного параметра, участвующего в процессе ледообразования для пяти метеостанций Хабаровского края: Братолюбовка, Большой Шантар, Елабуга, Николаевск, Зея.

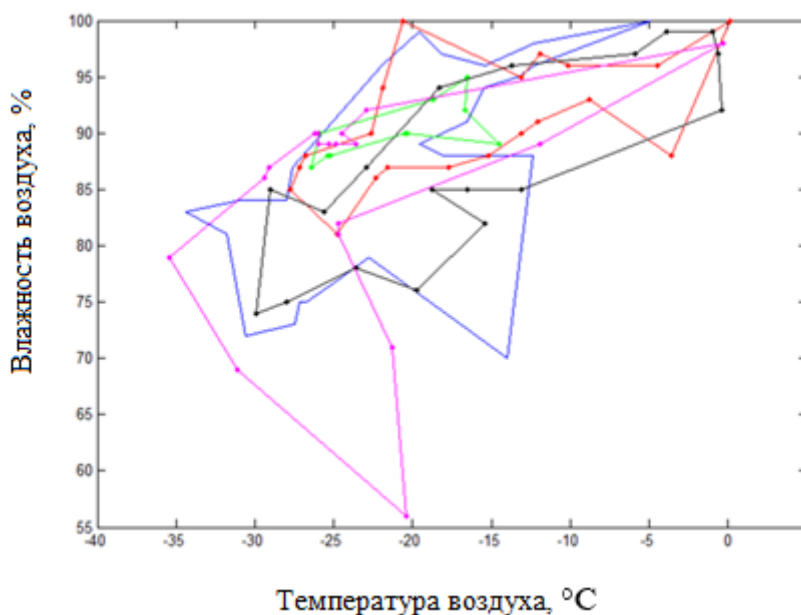


Рис.2 Зависимость относительной влажности от температуры воздуха при диаметре отложения в 5 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зея – фиолетовым.

Отмечено, что анализ полученных результатов расчета (рис.1) показывает, что область, в которой пересекаются все графики – очень мала: Влажность от 89 до 94%, температура от -21 до -16 °C. Однако область графика станции Елабуга небольшая, поэтому рассмотрим пересечение четырех оставшихся станций - Влажность: от 81 до 94%, температура от -26 до -16 °C. Область пересечения графиков Братолюбовки и Большого Шантара – Влажность: от 81 до 98 %, температура от -28 до -14 °C. Сравним области графиков Николаевска и Зеи - Влажность: от 81 до 98%, температура от -26 до -1 °C.

Разница между значениями может быть обусловлена разным территориальным расположением станций. К примеру, гололедообразование на станциях Братолюбовка и Большой Шантар происходит при достаточно низких температурах. Метеостанция Братолюбовка расположена между долинами рек Горбыль и Чергали на ровной возвышенности, в восточной части села. Возвышенность имеет превышение над долинами 10-15 м, вытянута с юга на север, заросла негустым смешанным лесом. Метеорологическая станция Большой Шантар расположена в южной части острова Большой Шантар. На северном берегу Губы Якшино, в месте впадения в Губу Якшино двух рек – реки Якшино и реки Амуки. Устья и долины рек Амуки и Якшино, протекающие с северо-востока на юго-запад имеют ширину до 3,5 км. Преимущественно заболочены и покрыты тундровой

растительностью. Реки в зимние времена промерзают и образуют большие наледи. Преобладающий рельеф острова горный. Таким образом, сходство между расположением станций: В непосредственной близости от станций находятся реки, имеется растительность, станции находятся на возвышенности.

Однако, на станциях Зея и Николаевск при той же влажности гололед образовывается и при более высоких температурах – до -1°C . Метеостанция Зея расположена на преобладающих формах рельефа (равнина) и удалена от водохранилища и реки на расстоянии более 100 м от уреза воды при максимальных уровнях в этих водоемах. В охранной зоне МП находятся одно и двухэтажные дома и постройки, а также березовые рощи с В и З. Метеостанция расположена на северной окраине г.Николаевска-на-Амуре, в 2 км от берега р.Амур. Метеостанция расположена на достаточно ровном, открытом месте. К З станция открыта в сторону аэропорта, где на пологом склоне сопки расположена взлетно-посадочная полоса на расстоянии около 4 км. Таким образом сходство между расположением станций: Рельеф равнинный, станции удалены от рек более, чем на 100 м.

На станции Елабуга разброс значений температуры и влажности значительно меньше, чем на других станциях. Река Амур расположена от метеорологической площадки на северо-западе в 700м, ширина реки в месте расположения поселка от 1-2км.

Растительность окружающей местности – кустарник и смешенный лес высотой 5-12м. Ближайшие дома от метеорологической площадки расположены в 300м. Метеорологическая площадка находится среди полей и огородов. Ближайший лес, смешенных пород с преобладанием клена, осины, располагается в 40м со всех сторон, кроме западной стороны, которая открыта. Зрелый хвойный лес начинается от метеорологической площадки в 10 км, на востоке с болотами и марями.

В диссертационной работе приведен так же анализ зависимости направления ветра от температуры воздуха при диаметре отложения в 5 и 6 мм, зависимости относительной влажности от направления ветра при диаметре отложения в 5 и 6 мм, зависимости относительной влажности от температуры воздуха при диаметре отложения в 5 и 6 мм. По результатам этого анализа сделан вывод:

- нечеткий идентификатор должен представлять собой многовходовое устройство, количество входов которого определяется количеством параметров, участвующих в процессе ледообразования;
- участие в процессе идентификации каждого конкретного параметра должно происходить со своим весовым коэффициентом;
- за наиболее вероятный диапазон изменения каждого конкретного параметра процесса ледообразования следует принять диапазон изменения общей области пересечения нечеткого множества данного параметра для всех метеостанций.

В третьей главе приведен один из возможных вариантов построения системы прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП с использованием нечёткого идентификатора, использующего четыре основных параметра ледообразования (температура воздуха, влажность воздуха, направление ветра, скорость нарастания гололеда).

Этот идентификатор состоит из суммы трех нечетких контроллеров со своими весовыми коэффициентами для каждого контроллера. Каждый из контроллеров имеет 3 входа, соответственно: - Fuzzy logic controller: Влажность воздуха, температура воздуха и скорость нарастания льда. Fuzzy logic controller1: направление ветра, температура воздуха, скорость нарастания льда, Fuzzy logic controller2: направление ветра, влажность воздуха, скорость нарастания льда.

В качестве выходного параметра принят диаметр гололедообразования. Выходы всех трёх нечетких идентификаторов используют алгоритм Сугено, выходные переменные каждого нечёткого идентификатора состоят из пяти термов и равны $mf1=5$ мм, $mf2=6$ мм, $mf3=7$ мм, $mf4=8$ мм, $mf5=9$ мм. Базы правил нечетких контроллеров, а также

распределение нечётких термов входных переменных строятся на основе анализа статистических данных, выполненного с помощью муравьиного алгоритма.

Распределение нечетких термов контроллеров выполнено на базе областей пересечения графиков зависимостей исследуемых параметров, представленных выше при диаметрах отложения, равных 5-9 мм для вышеуказанных пяти метеостанций. Параметр «скорость нарастания гололёда» введен в нечеткие идентификаторы для увеличения точности отработки контроллера.

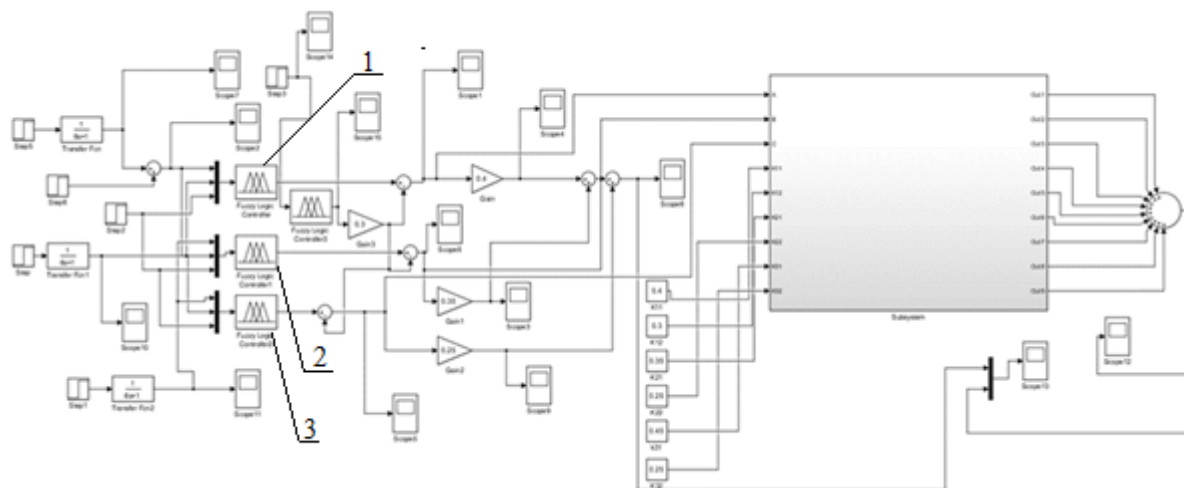


Рис. 3 – Модель прогнозирования гололедообразования, в котором цифрой 1 обозначен Fuzzy logic controller, цифрой 2 обозначен Fuzzy logic controller1 и цифрой 3 обозначен Fuzzy logic controller2

Каждый из контроллеров имеет 3 входа. В диссертационной работе описана настройка каждого из нечетких идентификаторов, показано распределение функций принадлежности входных и выходных переменных каждого нечёткого идентификатора. Приведена база правил каждого нечёткого идентификатора.

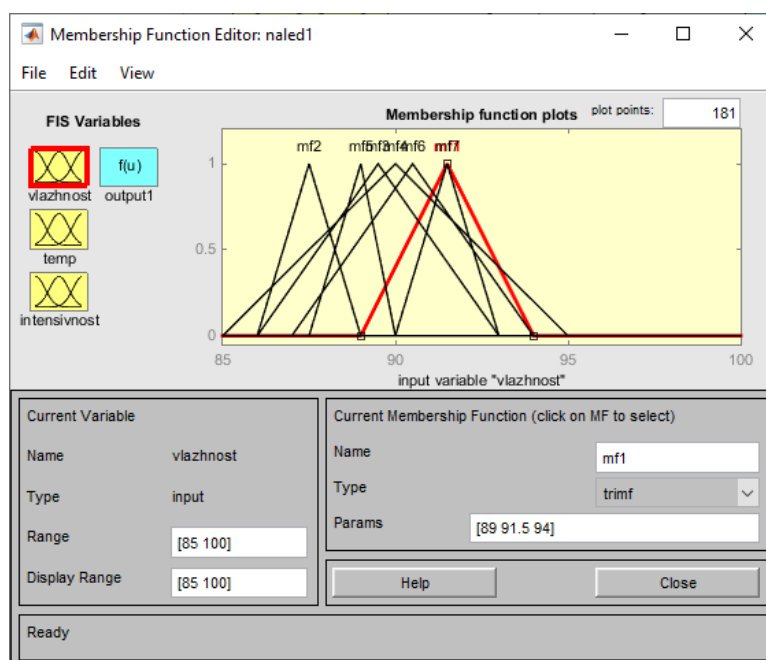


Рис.4 – Распределение нечётких термов входной переменной «Влажность» контроллера «Fuzzy logic controller».

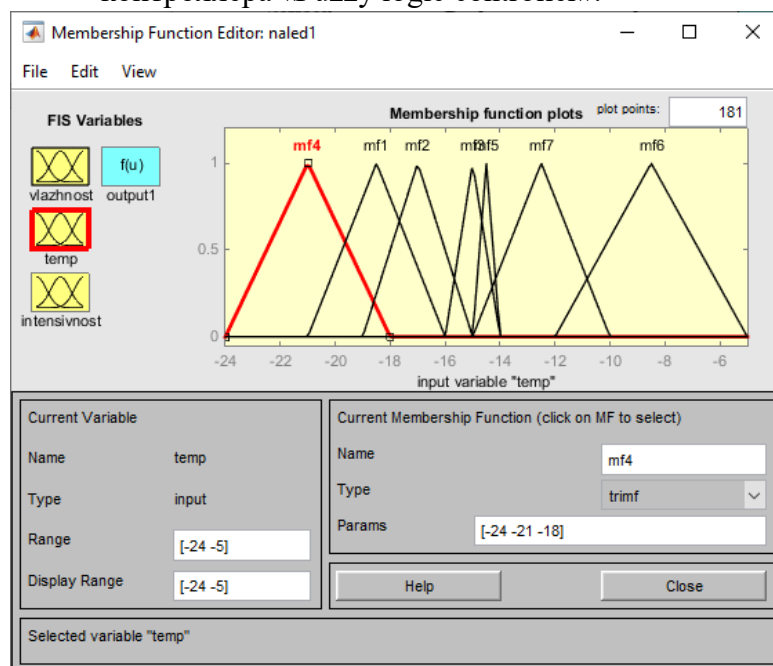


Рис. 5 – Распределение нечётких термов входной переменной «Температура» контроллера «Fuzzy logic controller».

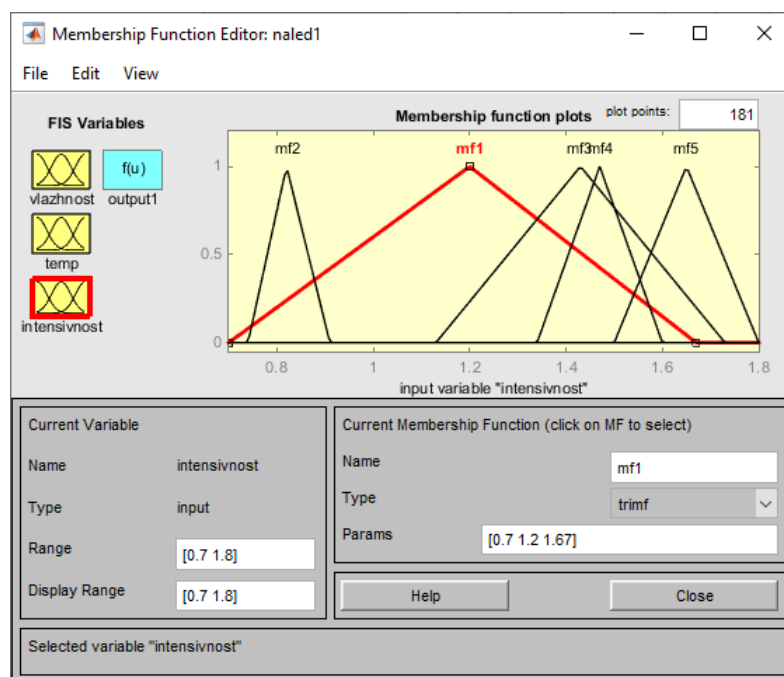


Рис. 6 – Распределение нечётких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» контроллера «Fuzzy logic controller».

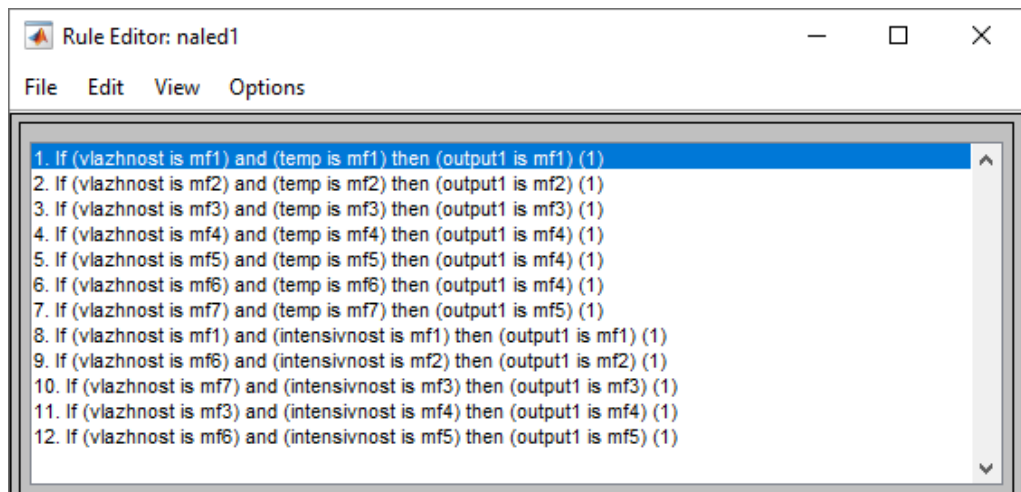


Рис. 7 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller».

Приведен блок, который производит расчёт весовых коэффициентов для каждого из нечетких идентификаторов. Описан метод расчета этих коэффициентов. Сделан вывод о том, что переменные весовые коэффициенты дают более адекватный результат, чем постоянные.

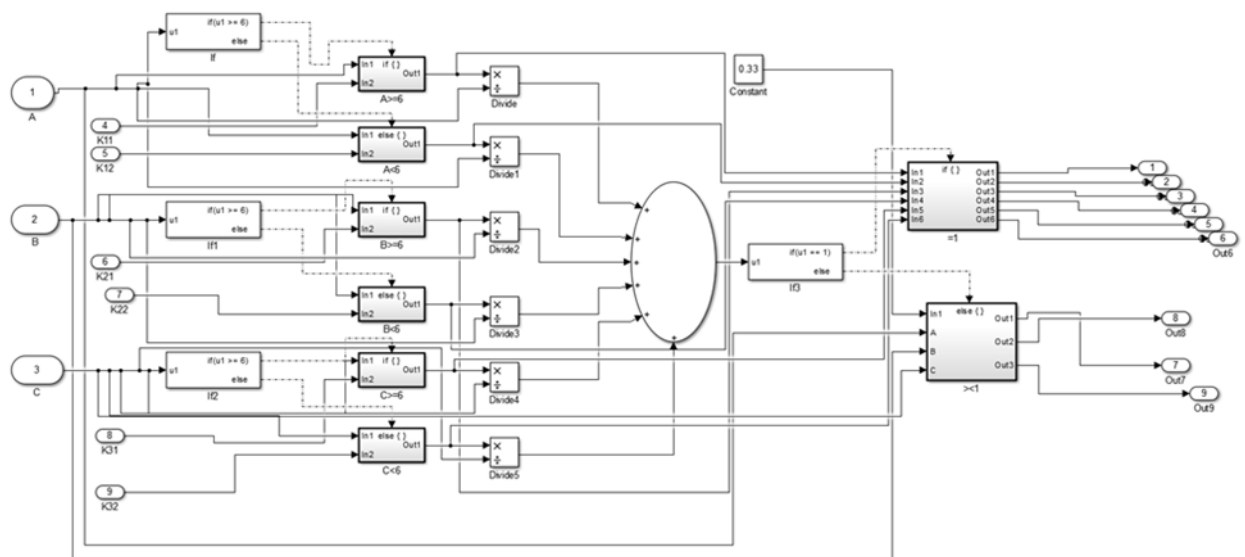


Рис. 8 – Блок Subsystem.

Была проведена оценка адекватности функционирования, структуры прогнозирования, произведено сравнение переменных весовых коэффициентов с постоянными весовыми коэффициентами. Для оценки реакции системы на дополнительные (возмущающие) факторы было проведено моделирование системы с введением возмущающего воздействия в виде нечетких идентификаторов. Также приведено распределение функций принадлежности входных и выходных переменных данных контроллеров, их базы правил.

Отмечено, что результаты апробации данной системы показали её работоспособность и удовлетворительную сходимость с набором статистических данных даже при условии учёта ограниченного количества параметров, участвующих в процессе гололедообразования.

Введены в систему второстепенные факторы, влияющие на скорость ветра и относительную влажность, такие как атмосферное давление на уровне станции, дефицит

насыщения, облачность (все виды), погода в срок наблюдения (наличие или отсутствие осадков), геофизические параметры местности. Описана настройка каждого из блоков нечетких идентификаторов, введенных как корректирующие блоки для параметров скорость ветра и относительная влажность, показано распределение функций принадлежности входных и выходных переменных каждого нечёткого идентификатора, а также приведена база правил каждого из них. Выбраны весовые коэффициенты, применяемые к каждому контроллеру.

Приведена результирующая система прогнозирования гололёдообразования.

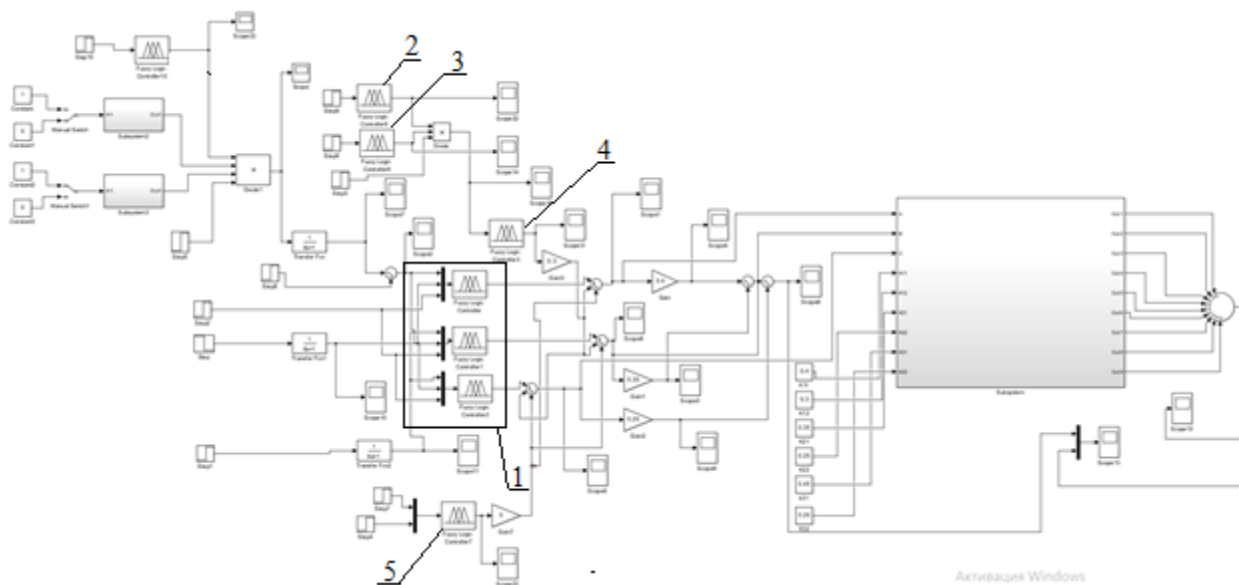


Рис. 9 – Модель прогнозирования гололёдообразования, в котором цифрой 1 обозначена Fuzzy logic controller, Fuzzy logic controller1, Fuzzy logic controller2, цифрой 2 обозначен Fuzzy logic controller8 (отвечает за влияние на скорость ветра облачности и удаленности от лесополосы), цифрой 3 обозначен Fuzzy logic controller7 (отвечает за влияние на скорость ветра атмосферного давления), цифрой 4 обозначен Fuzzy logic controller4 (возмущающее воздействие в виде скорости ветра), цифрой 5 обозначен Fuzzy logic controller5 (отвечает за влияние на систему дефицита насыщения)

В четвертой главе проведено подробное исследование созданной системы гололёдообразования при изменении входных переменных.

Для апробирования системы прогнозирования гололёдообразования были поданы на входы основных идентификаторов модели произвольные линейные функции. Изменение температуры в рамках линейной функции происходит от -20 до -27 °C с темпом 1 градус за 10 часов, изменение скорости нарастания гололёда: от 0,4 до 2,8 мм/час с темпом 0,35 за 10 часов, изменение влажности от 60 до 95 % с темпом 5 % за 14 часов, изменение направления ветра от 0 до 350 град с темпом 50 град. За 10 часов.

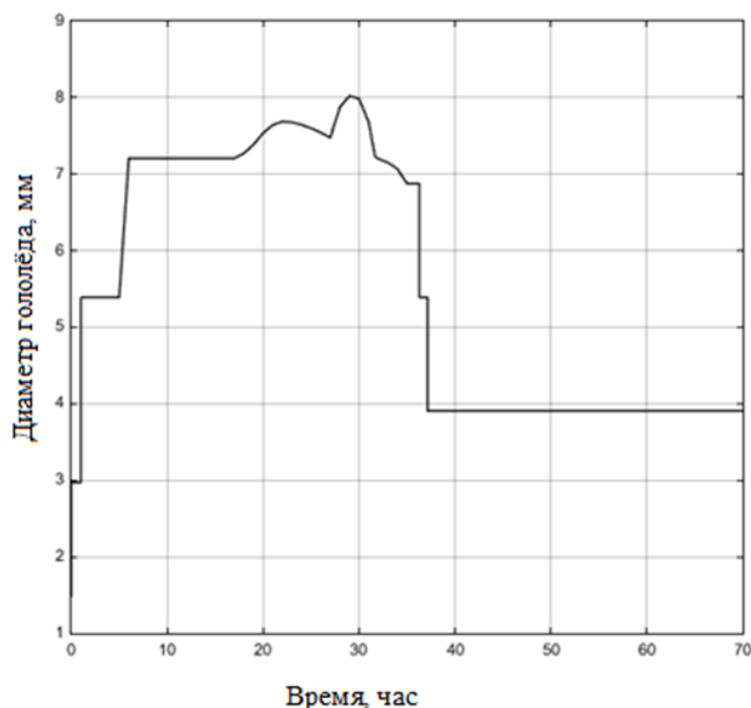


Рис. 10 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при температуре от -20 до -27 °С

Результат моделирования, изображенный на рисунке 10, показывает, что выходная величина «диаметр гололеда» в ходе изменения входных параметров претерпевает изменения, достигая максимального значения примерно через 30 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -23 °С, скорость нарастания гололёда = 1,45 мм/час, влажность = 78%, направление ветра = 150 град. Эта точка ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Братолубовка, параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с рисунка

10

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$	Осадк и
- 20,3	1	173	8 4	8	6	1,3 3	0,2	989, 1	8,1	1,3	нет

Как видно из таблицы 1, диаметр отложения согласно статистическим данным – 8 мм, согласно моделированию – 8,1 мм. Результат моделирования, изображенный на рисунке 58, показывает результат модели в 8 мм, что является отклонением от статистических данных примерно в 0%.

Аналогично вышеописанному, был произведен анализ отработки системы при подаче на вход различных входных переменных произвольного вида.

Также для проверки корректности работы системы были взяты реальные метеоданные за период с 16 по 19 ноября 2018 г. в городе Ставрополь, в котором в этот период из-за обледенения массово падали деревья и ветки, а также опоры линий электропередачи.

Время (UTC), дата		Ветер (напр.,м/с)		Видим.	Явления	Облачность	T (C)	Td (C)	f (%)	Te (C)	Tes (C)	Комфортность	P (гПа)
00	16.11	В	3	200 м	туман	?/?	-1.1	-1.5	97	-6	-6	прохладно	1024.5
03	16.11	В	3	200 м	туман	?/?	-1.2	-1.7	96	-6	-6	прохладно	1024.9
06	16.11	В	4	300 м	туман	?/?	-1.3	-1.7	97	-7	-7	холодно	1025.6
09	16.11	В	4	900 м	слаб. снег {туман}	?/?	-1.1	-1.5	97	-7	-7	холодно	1025.
12	16.11	В	4	300 м	туман {снег, дождь}	?/?	-1.2	-1.6	97	-7	-7	очень холодно	1026.4
15	16.11	В	2	900 м	туман	?/?	-1.3	-1.8	96	-5	-5	прохладно	1027.4
18	16.11	В	2	900 м	туман	?/?	-1.5	-2.0	96	-6	-6	прохладно	1027.4
21	16.11	В	2	400 м	туман	?/?	-1.3	-1.8	96	-5	-5	прохладно	1026.8
00	17.11	В	2	300 м	туман	?/?	-1.4	-1.8	97	-5	-5	по сезону	1026.2
03	17.11	В	1	200 м	туман	?/?	-1.4	-1.9	96	-4	-4	по сезону	1027.9
06	17.11	В	5	300 м	туман	?/?	-1.6	-2.0	97	-8	-8	холодно	1028.2
09	17.11	В	3	800 м	снег {туман}	?/?	-1.1	-1.6	96	-6	-6	холодно	1028.6
12	17.11	В	5	200 м	туман {снег}	?/?	-1.3	-1.7	97	-8	-8	очень холодно	1028.7
15	17.11	Ю	2	200 м	туман	?/?	-0.8	-1.2	97	-5	-5	прохладно	1029.0
18	17.11	В	2	200 м	туман {морось}	?/?	-0.4	-0.8	97	-4	-4	по сезону	1028.2
21	17.11	СВ	2	200 м	туман	?/?	-0.8	-1.2	97	-5	-5	по сезону	1027.6
00	18.11	З	2	1000 м	слаб. переохл. морось (гололед) {дождь}	10/10 100 м [St]	-0.4	-0.8	97	-4	-4	по сезону	1027.1
03	18.11	З	4	2000 м	слаб. морось	10/10 100 м [St]	+0.3	-0.2	96	-5	-5	по сезону	1026.3
06	18.11	СЗ	4	10 км	{морось}	10/6 600 м [Sc Ac und]	-0.1	-0.5	97	-6	-6	прохладно	1026.6
09	18.11	З	2	10 км		10/5 600 м [Sc Ac und]	+0.1	-0.3	97	-4	-3	прохладно	1026.1
12	18.11	СЗ	2	200 м	туман	?/?	-0.8	-1.2	97	-5	-5	холодно	1026.3
15	18.11	Ю	2	<100 м	туман	?/?	-0.5	-0.8	98	-4	-4	прохладно	1026.6
18	18.11	В	2	200 м	туман	?/?	-0.1	-0.5	97	-4	-4	по сезону	1026.4
21	18.11	В	2	200 м	туман	?/?	-0.4	-0.8	97	-4	-4	по сезону	1026.8

Рис. 11 - Метеоданные за период с 16 по 19 ноября 2018 г. в городе Ставрополь

Были внесены в модель данные с рисунка 11 и выведен график выходной переменной. Приведем результат моделирования на рисунке 12.

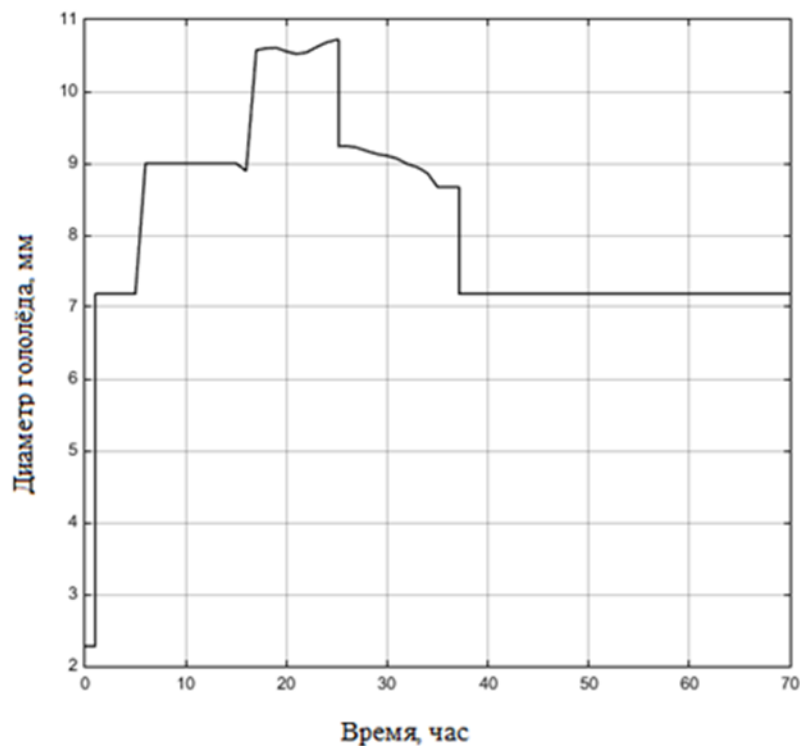


Рис. 12 – Результат моделирования при исходных данных, приведённых на рисунке 11.

Как видно из рисунка 12, результат моделирования системы при использовании реальных данных адекватен. Максимальное значение достигает 10,5 мм, что соответствует предельным нагрузкам, приводящим к обрушениям ЛЭП, что и наблюдалось период с 16 по 19 ноября 2018 г. в городе Ставрополь

Можно сделать общий вывод по работе о том, что система работает адекватно.

Анализ исследования системы показал, что система прогнозирования позволяет оценить скорость изменения процесса гололёдообразования при вариации входных параметров. Разработанная система позволяет оценить влияние каждого из входных параметров на скорость изменения гололёдообразования и на размер выходной величины.

В пятой главе рассмотрена техническая реализация системы ледоудаления с использованием системы прогнозирования.

Составлена функциональная схема одного из возможных вариантов технической реализации системы ледоудаления с использованием внутренней системы прогнозирования ледообразования.

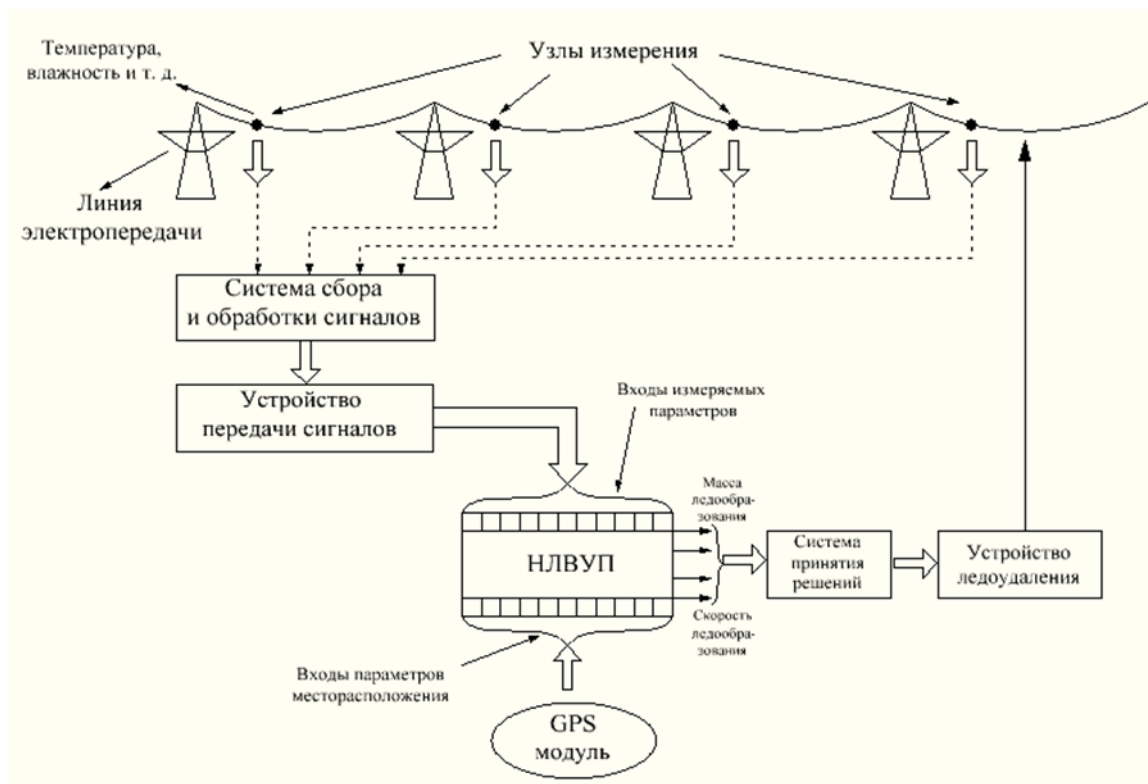


Рисунок 13 - Функциональная схема технической реализации системы ледоудаления.

Также в 5 главе описан один из вариантов построения данной системы: система, строящаяся на базе готового программно-аппаратного решения - Метеостанции «Сокол-М», разработанной группой компаний «Эскаорт», являющаяся Аналогом Automatic Weather Station AWS810 и имеющая сходные с ней характеристики.

Приведён обобщенный алгоритм управления автоматизированной системой удаления льда с проводов ЛЭП.

На основании предоставленного материала сделаны следующие выводы:

1. Вариант системы ледоудаления на основе нечеткого прогнозирующего модуля обеспечит заблаговременную очистку линии электропередач, что даст возможность предотвратить аварийные ситуации на ЛЭП.
2. Представленные алгоритмы не вызывают проблемы с их реализацией, используемые в системе датчики предоставляют достаточно точные данные для корректного расчёта.

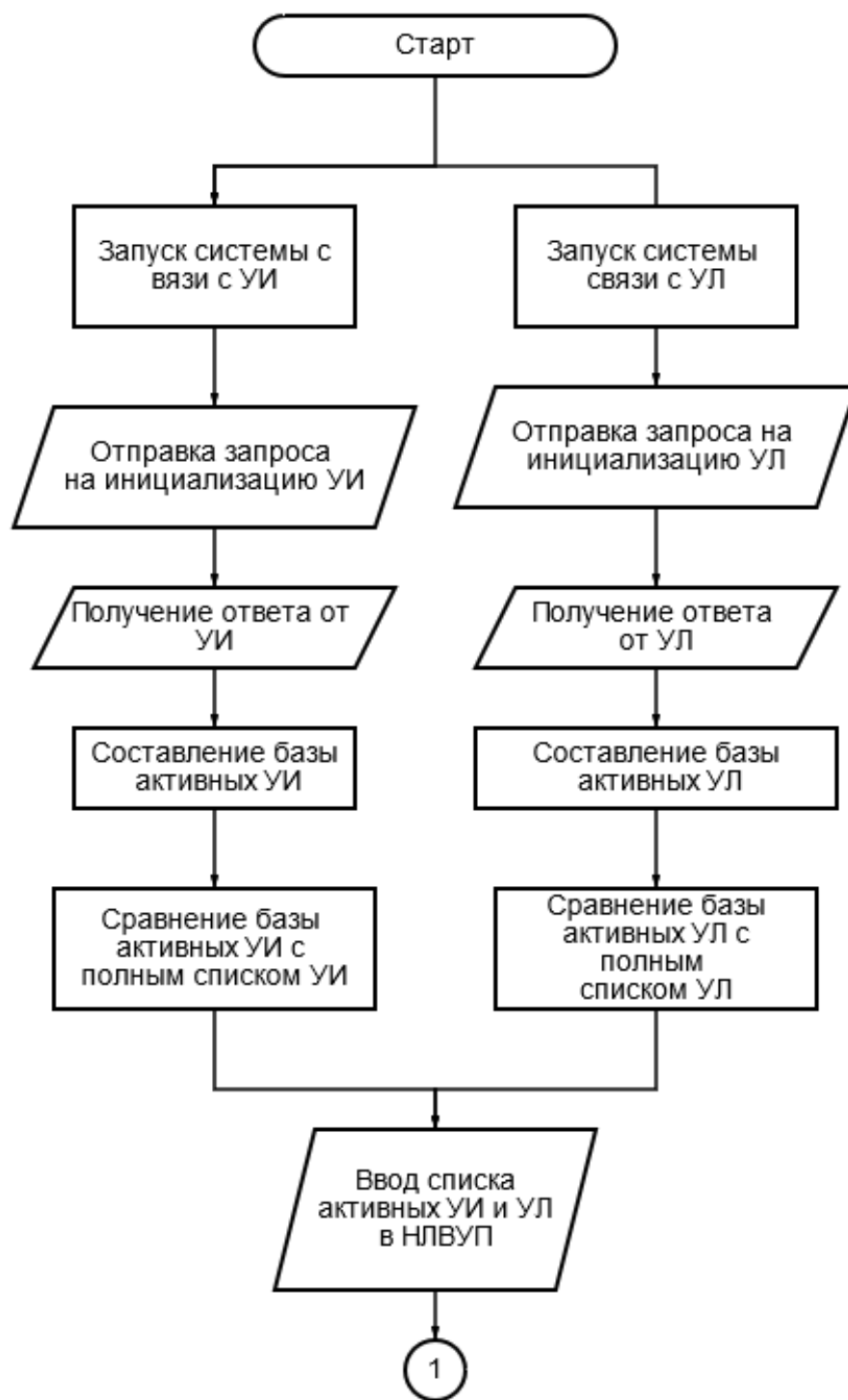


Рисунок 14 – Блок-схема системы ледоудаления на основе НЛВУП. (Обозначения: УИ 0 Устройство управления, УЛ – Устройство ледоудаления)

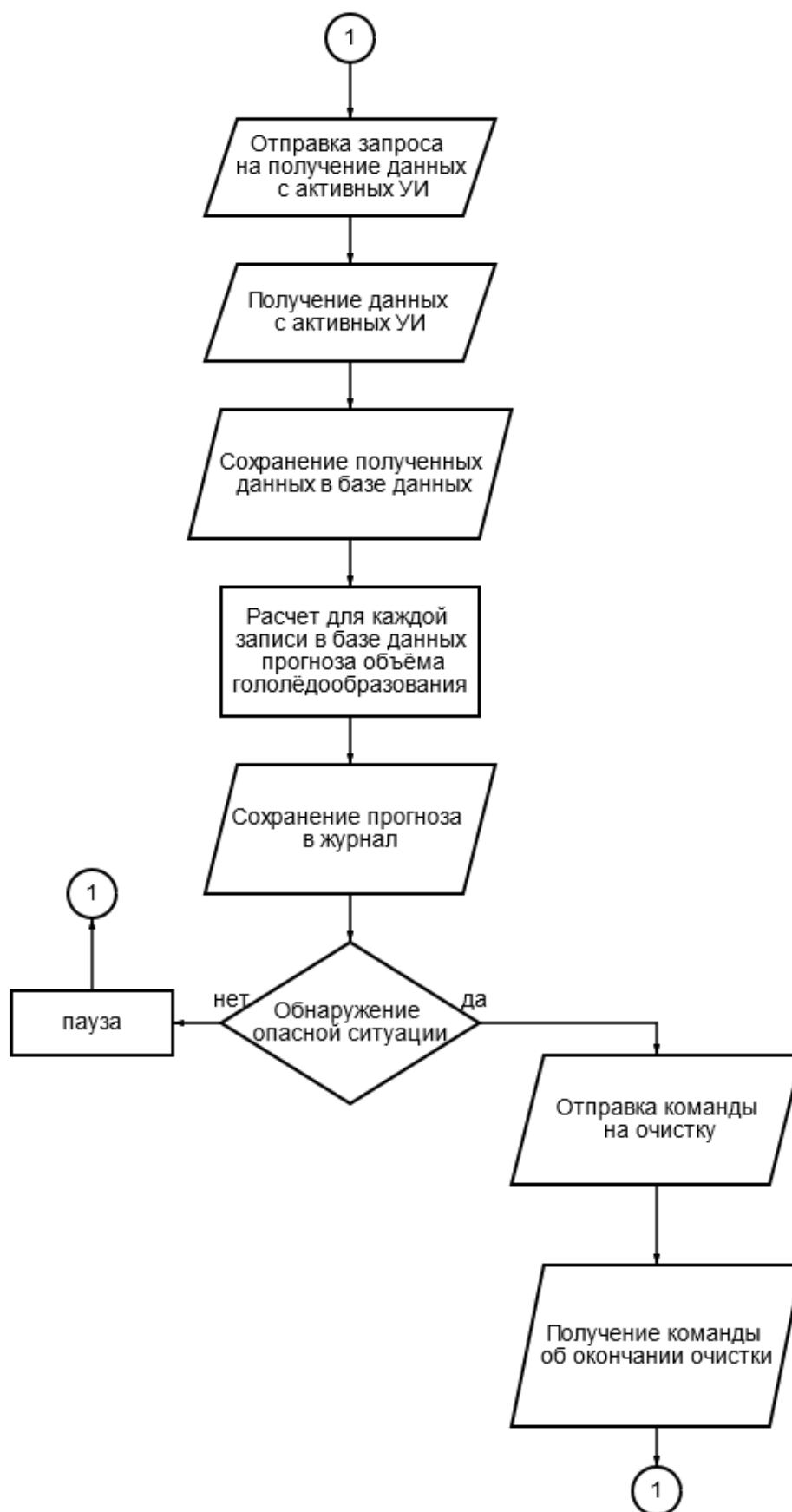


Рисунок 15 – Блок-схема системы ледоудаления на основе НЛВУП. (Обозначения: УИ 0 Устройство управления, УЛ – Устройство ледоудаления)

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В приложении представлен текст программы, реализующей муравьиный алгоритм в программном комплексе MatLab.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Произведен анализ существующих публикаций по тематике прогнозирования гололедообразования, приводятся основные параметры, влияющие на процесс гололедообразования, рассматриваемые авторами. Проведен анализ процесса ледообразования на основе статистических данных, полученных с метеорологических станций Братолюбовка, Елабуга, Зeya, Большой Шантар, Николаевск за десятилетний период. В качестве основных параметров использовались: температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажность, парциальное давление, дефицит насыщения, атмосферное давление. Дана оценка существующим методам обработки статистических данных, указаны их недостатки. Проведена обработка статистических данных, полученных с метеостанций, при разных значениях диаметра отложения. Произведена попытка создания математического описания гололедообразования на основании этих данных. Сделан вывод о том, что аналитической связи между выходным параметром – диаметром отложения и факторами, оказывающими влияние на процесс гололедообразования установить не удастся. Поэтому, задача идентификации процесса гололедообразования как объекта управления может быть реализована с использованием интеллектуальных вычислительных методов.

С целью более точного определения областей, в которых должны располагаться функции принадлежности интеллектуального модуля был использован муравьиный алгоритм. Произведен анализ влияния географического положения метеостанции на гололедообразование.

Разработан подход, опирающийся на математические методы для обработки статистических данных, снижающий временные ресурсы для выявления рабочих областей нечеткого идентификатора. Разработан метод нечеткой идентификации по набору статистических данных для различных режимов ледообразования с использованием нечеткой логики.

Разработан нечёткий принцип формирования системы прогнозирования гололедообразования, позволяющий при отсутствии ряда формальных зависимостей получить результат, хорошо коррелирующий со статистическими данными.

Предложен структурный и параметрический синтез системы прогнозирования гололедообразования на базе нечетких модулей, а также разработана модель прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП в программном комплексе «Matlab».

Проведена сверка выходных данных, полученных с модели гололедообразования с имеющимися статистическими данными для определения и, в дальнейшем, увеличения, степени точности работы прогнозирующего модуля.

Произведено увеличение точности работы системы путём введения в неё дополнительных переменных.

Результаты апробации данной системы показали её работоспособность и удовлетворительную сходимость с набором статистических данных даже при условии учёта ограниченного количества параметров, участвующих в процессе гололедообразования.

Полученные результаты говорят о том, что подход правомерен, обеспечивает точность отработки системы нечеткой идентификации не менее чем в 10 %.

Проведённое исследование системы нечеткой идентификации в различных условиях показало, что созданная система прогнозирования позволяет оценить скорость изменения процесса гололедообразования при вариации входных параметров, а также позволяет

оценить влияние каждого из входных параметров на скорость изменения гололёдообразования и на размер выходной величины.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Экспертная оценка параметров ледообразования на проводах ЛЭП / В. С. Попова, В. А. Соловьев // Ученые записки КнАГУ. – 2019. № I - 1(37) – С. 16-25.
2. Попова, В. С. Разработка и исследование методики синтеза нечёткого идентификатора по прямым показателям качества/ В. С. Попова, В. А. Соловьев // Ученые записки КнАГУ. – 2018. № I - 1(33) – С. 20-27.
3. Попова, В. С. Оценка параметров разрушения ледяного покрова на проводах линий электропередач по результатам численного эксперимента/ В. С. Попова, В. А. Соловьев, С.И.Сухоруков, С.П.Черный // Ученые записки КнАГУ. – 2016. № I - 1(25) – С. 12-21.
4. Попова, В.С. Разработка модели системы гололёдообразования/ В.С. Попова, В.А. Соловьёв // Электротехнические системы и комплексы. - 2023. № I – С. 4-9.

Публикации в издании, индексируемом в наукометрической базе SCOPUS:

5. Opportunity Analysis of Mathematic Description for Ice-Accretion; 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); V.S. Popova; V.A. Solovyev; 08.12.2020, Scopus
6. The use of computational algorithms to determine the probability range membership functions of the fuzzy identifier of the predictive icing module; 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); V.S. Popova; V.A. Solovyev; 08.12.2020, Scopus. Попова, В. С.
7. Synthesis of an ETL Icing Forecasting System; Smart Innovation, Systems and Technologies 272, с. 723-735; V.S. Popova; V.A. Solovyev; 01.01.2022, Scopus

Публикации в других изданиях:

8. Попова В.С. Алгоритмические и управленческие задачи модуля прогнозирования процесса гололёдообразования // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов (Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов 09-20 апреля 2018 г.)
9. Попова В.С. Разработка прогнозирующего модуля образования льда // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов (Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов 06-17 апреля 2016 г.)
10. Победа в I туре III всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов и научных академических институтов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Шаг в науку» с НИР «Система нечеткой идентификации процесса ледообразования»