

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Соловьев В.А.

Комсомольск-на-Амуре – 2023

Оглавление

Введение	2
1 Анализ существующих систем мониторинга и прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП.	10
1.1 Анализ существующих систем мониторинга и удаления льда проводов ЛЭП	10
2.1 Анализ существующих систем прогнозирования гололедообразования.....	17
2.1.1 Анализ систем прогнозирования обледенения воздушных судов.....	17
2.1.2 Анализ систем прогнозирования обледенения морских судов.....	20
2.1.3 Анализ систем прогнозирования обледенения автомобильных дорог.	21
2.1.4. Анализ систем прогнозирования гололедных нагрузок на воздушных линиях.....	24
2. Разработка подходов к созданию нечеткой системы прогнозирования.....	28
2.1 Выявление основных параметров, влияющих на процесс гололедообразования.	28
2.2 Анализ возможности математического описание процесса гололедообразования	39
2.3 Обоснование и реализация математического подхода к оценке определения области распределения функций принадлежности нечеткого идентификатора	47
3. Синтез системы прогнозирования гололедообразования ЛЭП и разработка модели системы прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП	58
3.1 Синтез системы прогнозирования гололедообразования ЛЭП.....	58
3.2 Разработка модели системы прогнозирования гололёдообразования	74
4 Исследование модели системы прогнозирования гололёдообразования.....	92
Заключение.....	120
Список сокращений и условных обозначений	122
Список литературы	124
Приложение 1	134

Введение

Прогноз в жизни общества и человека всегда имел, имеет и будет иметь огромное значение. В различные времена человек старался предугадать действия, которые могли бы случиться с ним в будущем. Население Земли всякий раз стремилось подготовиться к вероятным результатам этих действий, понять, какие меры необходимо предпринимать для того, чтобы свести к минимуму проявления неблагоприятных последствий и максимально использовать положительные результаты для собственных целей. Люди всегда стремились изменить свою жизнь в лучшую сторону.

Человечество всегда осознавало необходимость предугадывать будущее. Но особенно сильно роль прогнозирования увеличилась в наши дни, при достаточно быстрых темпах развития общества, науки и техники, производства и производственных отношений. В настоящее время прогнозы, основанные на интуиции, уже не удовлетворяют всех необходимых потребностей. Сейчас уже необходимо прогнозирование, основанное на беспристрастных закономерностях, на применении математического аппарата, проводимое на базе научных способов и моделей, на обработке начальных данных при помощи информационных технологий. Вследствие чего в настоящее время прогнозирование — это уже независимая ветвь науки.

Развиваясь, наука о прогнозировании прошла несколько основных временных этапов. Стремительное развитие теории и практики прогнозирования началось на 50-е гг. XX в. В это время стали замечать простые прогнозные модели, начали проводиться различные исследования в области прогнозирования. В некотором роде «бум прогнозирования» пришелся на 60—70-е гг. XX в. Как раз в это время создана основная масса теоретических положений, способов, трудных прогнозных моделей, ЭВМ начали обширно использоваться в прогнозировании. С начала 80-х гг. XX в. и по настоящее время проходит новый период, характеризующийся развитием прогнозирования на чисто научной базе, интенсивным использованием прогностики в повседнев-

ной практической работе компаний и организаций всевозможных секторов экономики народного хозяйства.

Прогнозирование стало одной из ведущих функций управления, совместно с анализом, организацией, планированием, мотивацией, контролем и т.д. Потребителями

прогнозов выступают тысячи людей, органы муниципально-го и городского управления, всевозможные фирмы и организации.

В целом значимость прогнозирования, собственно, заключается в том, что оно, открывая будущие связи явлений беспристрастной действительности, увеличивает многообразие, расширяет выбор разновидностей становления исследуемой системы и, как следствие, содействует принятию действенных управленческих решений.

Прогнозирование — это метод научного предвидения, в котором применяется как накопленный в прошлом опыт, так и нынешние допущения в отношении будущего в целях его определения.

Суть процесса прогнозирования заключается в том, что исследователь с помощью конкретного способа и специальных инструментов обрабатывает имеющуюся информацию о состоянии изучаемого объекта в этот момент, о наблюдавшихся ранее закономерностях изменения объекта, об условиях его функционирования в настоящий момент, а так же стремится с достаточной степенью достоверности превратить данную информацию в полноценную систему знаний о будущем состоянии или поведении объекта. Прогнозирование позволяет раскрыть устойчивые тенденции или обнаружить существенные изменения в социально-экономических процессах, оценить их вероятность для будущего планового периода, выявить возможные альтернативные варианты, накопить научный и эмпирический материал для обоснованного выбора той или иной концепции развития или планового решения.

Отличительной особенностью прогнозирования является то, что оно описывает возникновение конкретных процессов и объектов, которые в настоящий момент недоступны непосредственному восприятию и практической проверке.

Но, с другой стороны, адекватный прогноз обязан строиться на базе аргументированных научных представлений о текущем состоянии и направленности становления объекта. Вследствие этого всякий прогноз в конкретной степени носит также и достоверный характер. И чем больше надёжных сведений об объекте у исследователя, тем более достоверным выходит прогноз.

Различают три основных вида прогноза: технологический, экономический и прогноз объема продаж (спроса).

Технологические прогнозы охватывают уровень развития НТП или технологическое развитие в сферах, непосредственно влияющих на производство, в котором осуществляется прогноз. Например, предприятие, выпускающее компьютеры, интересуется возможностями расширения размера памяти на дискетах, т.к. они считаются дополнительной продукцией для использования компьютеров, а предприятие, применяющее вредные, ядовитые препараты в собственном производстве, интересуется разработкой технологий по очистке и утилизации отходов.

Становление НТП приводит к выходу в свет новых продуктов и предложений, а те, в свою очередь, составляют нешуточную конкуренцию имеющимся фирмам. Компетентно сделанный прогноз позволит сберечь денежные средства, предскажет развитие новых технологий, в том числе и в случае если научно-технические изменения не воздействовали на изготовление продукции.

Формирование прогнозов выполняется с помощью следующих способов прогнозирования: Экстраполяционные методы основаны на предположении, что будущие действия определяются прошлым. К примеру, анализ изменения размера продаж во времени предлагает выделение трех составляющих: тренда; сезонных колебаний; случайных изменений. Тренд описывает общую тенденцию развития; сезонные колебания показывают колебание спроса от времени года; случайные изменения - изменения трудно опреде-

ляемых случайных факторов. В условиях нестабильности и неопределенности внешних факторов методы экстраполяции редко применяются.

Методы экспертных оценок основаны на статической обработке оценок, полученных путем опроса высококвалифицированных специалистов в соответствующих узких областях. К ним относят такие методы как метод Дельфи, методы коллективной генерации идей, последовательного выбора, парных сравнений, балльной оценки, оценки вероятностей, ранжирования ряда. Все эти методы базируются на разнообразных спроектированных алгоритмах оценки субъективных мнений экспертов (специалистов).

Метод Дельфи предполагает проведение опроса членов группы экспертов и дальнейшее циркуляционное ознакомление членов группы с мнением коллег и лиц, заинтересованных в итогах экспертизы с целью достижения группового консенсуса.

Метод коллективной генерации идей (мозговая атака) предполагает проведение дискуссии, в которой допускаются высказывания любых, самых парадоксальных мнений, оригинальных идей и предложений. После проведения опроса производится оценка его качества и обработка суждений экспертов.

Причинно-следственные методы основаны на применении регрессионных математических методах и нейросетевых моделей (НСМ). Регрессионные модели базируются на составлении статистических уравнений, позволяющих определить значения некоторых переменных и оценить их влияние на искомую величину.

Для того, чтобы эффективно бороться с образованием гололёда на проводах ЛЭП, необходимо использовать системы прогнозирования гололёдообразования.

В последние годы новые методы метеомоделирования и прогнозирования атмосферных процессов позволяют с более высокой точностью и достоверностью оценивать как количественные параметры уже сформировавшихся гололедных отложений, так и ожидаемые свойства отложений льда на поверхностях различных объектов. Важным аспектом этих разработок (см. ТБ) является возможность интеграции моделей локального масштаба с глобальными системами метеорологического прогнозирования. Эффекта удалось достичь путем создания ряда переходных элементов моделирования, что позволило преодолеть технические сложности резкого перехода от глобальных моделей к локальному моделированию с масштабами в несколько сотен метров. Эти достижения имеют большое практическое значение, поскольку более раннее предупреждение о гололедной опасности позволяет подготовить и реализовать ряд превентивных мер, направленных на уменьшение отрицательных последствий гололедообразования на ВЛ.

В настоящее время значительную проблему при эксплуатации ЛЭП 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 энергокомпания несет 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. На сегодняшний день системы прогнозирования ледообразования разработаны в основном только для авиационной техники. Прямое использование таких систем применительно к проводам ЛЭП невозможно в связи с резко отличающимися атмосферными условиями и параметрами объекта.

Поэтому, задача разработки модуля прогнозирования процесса гололедообразования на проводах ЛЭП является востребованной. На сегодняшний день существует достаточное большое количество систем удаления гололёда с проводов ЛЭП. Но ни одна из них не имеет прогнозирующего модуля для получения информации о начале гололедообразования заблаговременно. Заблаговременное прогнозирования может обеспечить возможность проведения профилактических мероприятий, а также дать запас времени на предотвращение аварии, что позволяет проводить планирование противогололёдных мероприятий в масштабах всей сети энергоснабжения.

В результате выполнения работ планируется разработка нового математического описания процесса гололёдообразования, которое позволит прогнозировать процесс гололёдообразования в условиях неполноты информации и с учётом характеристик, которые не могут быть выражены количественно, а могут быть только качественно оценены. С применением полученного математического описания планируется разработка и проведение исследований математической модели процессов

гололедообразования и разработка и тестирование программно-аппаратного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме осуществлять прогнозирование процессов гололедообразования на элементах ЛЭП.

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. Исследование и критический анализ существующих систем мониторинга и прогнозирования гололёдообразования на ЛЭП.
2. Разработка подхода к определению областей функций принадлежности нечеткого идентификатора.
3. Разработка подхода к эффективной обработке статистических данных для определения рабочей области для нечеткой идентификации с помощью математических методов.
4. Нечёткая идентификация параметров системы прогнозирования
5. Синтез структуры и разработка элементов системы прогнозирования гололёдообразования. Реализация компьютерной модели системы прогнозирования
6. Проверка адекватности работы системы прогнозирования

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Впервые 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.

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.

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

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 разработке и изготовлении экспериментальной установки, 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.

1 Анализ существующих систем мониторинга и прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП.

1.1 Анализ существующих систем мониторинга и удаления льда 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. В настоящее время отсутствует точное математическое описание процесса гололедообразования на проводах ЛЭП, многие известные на сегодня работы связаны с обледенением в авиационной техники и морского транспорта [4, 5, 6].

Однако, в настоящий момент существует и множество научных публикаций, в которых освещено исследование процесса гололедообразования на проводах ЛЭП, но слабым местом этих публикаций является то, что при описании процесса не учитываются разнообразные факторы, влияющие на процесс гололедообразования.

Например, в [7] приведена разработка алгоритмов работы системы мониторинга гололедообразования для воздушных линий электропередачи и контактной подвеске электротяговых сетей в соответствии с их специфическими особенностями. Предложен термодинамический способ мониторинга интенсивности гололёдообразования, а также варианты технической реализации и алгоритмы функционирования системы мониторинга интенсивности гололёдообразования для использования ее на воздушных линиях.

Однако в данной работе учитываются не все влияющие на гололёдообразование параметры, а только температура провода, относительная влажность и температура воздуха.

В [8] при анализе причин обледенения воздухозаборного очистительного устройства газотурбинной установки рассматриваются только температура атмосферного воздуха, влажность атмосферного воздуха, водность атмосферного воздуха, в [9] при разработке системы прогнозирования и контроля экстремальных гололедно-ветровых ситуаций на высоковольтных линиях электропередач, рассматривается тип отложения, погодные условия, температура воздуха, направление ветра, рельеф местности.

В [10] для повышения надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ путем демпфирования низкочастотных колебаний и ограничения сближений

проводов, вызванных воздействием ветровых и гололед-ных нагрузок, из атмосферных явлений рассматривалась только скорость ветра.

В [11] для повышения надежности электроснабжения потребителей и совершенствование автоматизированного и автоматического противоаварийного управления работой электроэнергетических систем в экстремальных погодных условиях рассматривается только температура поверхности объекта и температура провода.

В [12] при разработке комплексного инклинометрическо-метеорологического метода и системы мониторинга гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи среднего и высокого напряжения для предупреждения возможных гололедных аварий с высокой достоверностью обнаружения и пониженной чувствительностью к внешним возмущениям рассматривались температура воздуха, скорость ветра и погодные условия.

В [13] при разработке Метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов рассматривались географические координаты, высота по GPS, температура и влажность воздуха, давление, ветер, обледенение и турбулентность.

В [14] при разработке методики испытаний системы определения обледенения летательных аппаратов рассматривается относительная влажность и температура воздуха.

В [15-17] предпринята попытка создания прогнозирующего модуля, но принято к вниманию недостаточное количество факторов: температура воздуха, влажность, скорость ветра.

В последние годы все чаще на практике прибегают к использованию автоматических информационно-измерительных систем, позволяющих в реальном времени контролировать вес уже образованных отложений на проводах промежуточных пролетов ВЛ.

Наибольшую эффективность имеют системы, основанные на гравитационном способе [18, 19, 20, 21, 22]. Главные достоинства: возможность определения веса отложений в полете (в более совершенных моделях – учет динамического воздействия ветра), что снижает затраты на эксплуатацию ВЛ.

Гравитационный способ реализуется посредством измерения гололедной и гололедно-ветровой нагрузок на провод с последующим сравнением измеренных величин с наперед заданными величинами пороговых нагрузок (значимых гололедных и гололедно-ветровых, опасных, допустимых нагрузок и т. д.) [1].

Известно устройство для измерения отдельно гололедной и ветровой нагрузок, основанное на вычислении этих нагрузок по измеренным величинам гололедно-ветровой нагрузки и угла отклонения гирлянды изоляторов с проводом под действием ветра с помощью трансформаторных датчиков [20].

Недостатком такого устройства является то, что оно автоматически не обнаруживает появление отложений на проводе, т. к. в нем нет порогового (сравнивающего) элемента и нет формирователя порога (задающего элемента).

Кроме того, это устройство принципиально не работает в случае отсутствия тока нагрузки в фазном проводе, а также в случае плавки отложений на проводах постоянным током.

Известно устройство для измерения отдельно гололедной, ветровой и гололедно-ветровой нагрузок с контролем направления ветра на ВЛ [21]. Оно содержит три силоизмерительных датчика, каждый из которых подвешен между траверсой П-образной опоры и верхним концом соответствующей гирлянды изоляторов с фазным проводом.

Нижний конец средней гирлянды изоляторов закреплен с двух сторон горизонтальными шарнирными изоляционными распорками врастяжку к обеим стойкам опоры, а концы правой и левой гирлянд изоляторов прикреплены соответственно слева и справа к стойкам опоры такими же изоляционными распорками. При ветре слева или справа отклоняется соответственно по ветру левая или правая гирлянда изоляторов с фазным проводом и тогда её силоизмерительный датчик измеряет гололедно-ветровую нагрузку, в то время как средняя гирлянда не отклоняется и ее датчик всегда измеряет только гололедную нагрузку.

По величинам гололедно-ветровой и гололедной нагрузок нелинейные преобразователи вычисляют фактическую ветровую нагрузку, которая вместе с фактической гололедной нагрузкой отображается измерительными приборами.

Определяющим недостатком этого устройства является то, что в нем, несмотря на реализованное измерение отдельно фактических гололедной, ветровой и гололедно-ветровой нагрузок, автоматически не производится обнаружение отложений на проводе промежуточного пролета по величинам этих нагрузок из-за отсутствия в нем порогового устройства и формирователя порогов. Кроме того, это устройство имеет ограниченную область применения – только на фазных проводах промежуточных пролетов одноцепных линий с двухстоечными П-образными опорами.

Известно более совершенное по принципу действия и по конструкции устройство телеизмерения гололедной нагрузки на проводах промежуточного пролета ВЛ [19], которое может применяться на многоцепных ВЛ с любыми типами опор.

Устройство содержит канал телепередачи, коммутатор и два пружинных весовых датчика с контактными группами весовой уставки на подвижной оси датчика, на которой подвешен провод. Каждый датчик подвешен подвижно между траверсой опоры и верхним концом соответствующей гирлянды изоляторов, нижние концы обеих гирлянд изоляторов соединены между собой шарнирно, образуя V-образную подвеску провода. Этот обнаружитель выдает сигнал наличия отложений при достижении определенного веса отложений на проводе посредством замыкания группы контактов в момент прохождения проводом нижней точки при колебании провода под действием ветра в плоскости, перпендикулярной линии визирования пролета.

Определяющим недостатком такого устройства является то, что оно при сильном равномерном ветре может вообще никогда не выдать сигнал обнаружения отложений, т. к. будет постоянно находиться в отклоненном (невертикальном) положении и группы контактов не будут замкнуты. Кроме того, и при малом удельном весе отложений группа контактов не будет замыкаться и, следовательно, не будет выдаваться сигнал обнаружения отложений, т. е. будет происходить пропуск наличия отложений на проводе.

При малой весовой уставке в датчиках рост вероятности ложной тревоги будет опережать рост вероятности правильного обнаружения, т. к. любое случайное превышение сигналом порога, не связанное с появлением отложений (из-за переменного ветра), будет вызывать появление сигнала обнаружения. Следовательно,

рассматриваемое устройство имеет низкую вероятность правильного обнаружения отложений всех возможных видов.

Еще одной разновидностью гравитационного способа является аэродинамический способ обнаружения отложений на проводе промежуточного пролета воздушной линии электропередачи [22].

Способ заключается в том, что на промежуточном пролете линии одновременно измеряют относительное направление ветра, скорость ветра и величину фактической ветровой нагрузки на провод с отложениями или без них, создаваемой этим ветром, по измеренным скорости и относительному направлению ветра рассчитывают величину ожидаемой ветровой нагрузки на провод без отложений и сравнивают ее с величиной фактической ветровой нагрузки.

Если фактическая ветровая нагрузка больше ожидаемой, то принимают решение о наличии отложений на проводе, а если фактическая и ожидаемая ветровые нагрузки равны, то принимают решение об отсутствии отложений на проводе.

К недостаткам устройства обнаружения отложений на проводе промежуточного пролета воздушной линии электропередачи, осуществляющего аэродинамический способ, можно отнести наличие двух силоизмерительных датчиков, каждый из которых подвешен подвижно между траверсой опоры и соответствующей гирляндой изоляторов. Шарнирное соединение нижних концов обеих гирлянд изоляторов может заклинить из-за образования на них гололеда.

Главным недостатком гравитационного способа (при любом варианте реализации) является то, что он не позволяет выявить начало образования отложений и, как следствие, эффективно использовать профилактический подогрев, ускорить процесс принятия решения о проведении плавки.

Еще одним недостатком способа является то, что при его реализации необходимо дополнительное определение величины ожидаемой ветровой нагрузки на провод без отложений для использования ее в качестве эталона, что приводит к усложнению применения способа.

Также надо отметить, что для достижения требуемых вероятностей правильного обнаружения (минимизации риска гололедно-ветровых аварий) для каждого вида

отложений длины промежуточного пролета, предварительного тяжения и профиля местности нужно устанавливать свой порог обнаружения.

Измерение тяжения провода ведется без учета линейного расширения провода под влиянием изменения температуры, что приводит к дополнительным погрешностям.

Гравитационный способ предполагает определение интенсивности процесса гололедообразования по скорости приращения веса гололеда, другими словами – чтобы определить интенсивность надо подождать пару часов. Такой подход не позволяет оперативно составить карту плавки в больших по площади электросетевых районах.

Также из способов, нашедших применение в эксплуатации, можно выделить способы, основанные на явлениях затухания сквозного зондирующего ВЧ сигнала, импульсного ВЧ зондирования проводов ВЛ [23–24].

При реализации способа обнаружения по приращению затухания ВЧ непрерывных зондирующих сигналов, при прохождении их в проводе ВЛ за счет поглощения поверхностного электромагнитного ВЧ поля в неидеальной диэлектрике отложений [21] практически невозможно установить требуемую величину порога приращения, т. к. на приращение затухания, кроме самих отложений на провод, в равной мере действует изменение параметров работы ВЛ и изменение метеоусловий, да и для разных видов отложений при прочих равных условиях, затухание может отличаться в несколько раз.

Способ, основанный на измерении временной задержки импульсных сигналов, отраженных от муфт отложений, относительно зондирующих сигналов и отношении амплитуд этих отраженных импульсов, также имеет трудности определения порога обнаружения отложений. При этом добавляется также трудно регистрируемое и учитываемое влияние волновых процессов в линиях передачи сигналов, а также влияние отпаек от ВЛ и режимов работы нагрузки на них.

Часто измерения температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра входят в функции гравитационных систем (как дополнительные опции), но по этим данным невозможно с большой точностью определить факт наличия или отсутствия отложений. Даже в условиях пересыщенного воздуха (влажность больше 100 %) гололед может не образовываться при большой нагрузке в линии (температура провода выше температуры воздуха на 1–5 °С).

2.1 Анализ существующих систем прогнозирования гололедообразования.

В настоящее время существующие системы прогнозирования гололедообразования разработаны в основном в области обледенения воздушных [32-37, 46, 50, 52, 57, 59, 61] и морских судов [39-45, 56]. Также существуют работы, рассматривающие зимнее обледенение автомобильных дорог [28, 29, 30, 47, 48, 49, 54, 60].

2.1.1 Анализ систем прогнозирования обледенения воздушных судов.

Обледенение воздушных судов может наблюдаться при необходимом условии, состоящем в наличии переохлажденных облачных капель в нужном количестве. Это условие не является достаточным. Чувствительность различных типов самолетов и вертолетов к обледенению неодинакова. Она зависит как от характеристик облака, так и от скорости полета и аэродинамических характеристик. Поэтому прогнозируется лишь «возможное» обледенение в слоях, где выполняется его необходимое условие. Такой прогноз должен слагаться, в идеале, из прогноза наличия облаков, их водности, температуры, а также фазового состояния облачных элементов.

На ранних стадиях развития расчетных методов прогноза обледенения [34] их алгоритмы опирались на прогноз температуры и точки росы, синоптический прогноз облачности и статистические данные о микрофизике облаков и повторяемости обледенения воздушного судна. Опыт показал, что такой прогноз в то время был малоэффективным.

Известен способ определения пространственных зон вероятного обледенения воздушных судов, который включает измерение метеорологических величин: по данным наземных наблюдений определяют приземные значения относительной влажности воздуха, температуры точки росы и значение высоты нижней кромки облачности: при помощи запускаемых два раза в сутки радиозондов проводят регистрацию фактических значений вертикальных профилей температуры. Возможность возникновения обледенения определяется по методу Годске или методу, который предложен в NCER.

В случае метода Годске [32, 34] знание вертикальных профилей температуры и температуры точки росы, которая характеризует влажность воздуха, позволяет рассчитать пространственные зоны вероятного обледенения воздушных судов по формуле

$$T(z) \leq -8 \cdot \{T(z) - T_d(z)\},$$

где $T(z)$ - температура на высоте z ,

$T_d(z)$ - температура точки росы на высоте z .

Величина $-8 \cdot \{T(z) - T_d(z)\}$ есть температура насыщения по отношению ко льду.

Для метода, предложенного в NCER [37], пространственные зоны вероятного обледенения воздушных судов определяются с помощью неравенств

$$\begin{aligned} -16^\circ\text{C} \leq T(z) \leq 0^\circ\text{C} \\ R_H(z) \geq 63\% \end{aligned},$$

где $R_H(z)$ - относительная влажность на высоте z .

Первый недостаток - это то, что запуск радиозонда производится в ряде аэропортов только два раза в сутки. Такая периодичность запуска радиозонда исключает диагностику приземного слоя в режиме реального времени в пределах аэропорта. Вторым недостатком является привязка к станциям, которые выполняют аэрологические наблюдения.

Оба метода неприменимы для прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП, так как учитывают только специфику обледенения воздушных судов.

В работах [56,58,60] рассматривается прогноз обледенения самолета при пролёте через зону обледенения. Цель прогноза обледенения заключается в определении границ зоны возможного обледенения и в приблизительной оценке опасности этого обледенения. Для достижения этой цели необходимо:

- 1) Определить границы зоны жидких осадков, нижнюю и верхнюю границы облаков;
- 2) Определить положение нулевой изотермы;
- 3) Определить вероятность и опасность обледенения в облаках и осадках выше нулевой изотермы.

Как видно из краткого описания метода прогнозирования, подобный вариант рассматривает прогнозирование возможности обледенения воздушного судна при пролете через определенную зону. Способ не подходит для прогнозирования гололедообразования, так как Линия электропередач статична и имеет огромную протяженность, в связи с чем определить опасные зоны на каждом участке сети не представляется возможным.

Альтернативные методы прогноза замерзающих осадков

Альтернативные методы прогноза замерзающих осадков опираются на статистические связи между определенными характеристиками погодных систем синоптического масштаба и повторяемостью замерзающих осадков. Не останавливаясь на ранних работах этого направления у нас и за рубежом, отметим только несколько работ, появившихся после 2000 года.

В работе [35] была проведена (вручную) классификация синоптических ситуаций и воздушных масс на 25-летней выборке приземных карт погоды, что позволило выделить классы «архетипических» погодных систем, в которых повторяемость замерзающих осадков на территории континентальных США наибольшая. В течение следующих нескольких лет интенсивно развивались схемы автоматизированной типизации синоптических процессов.

Эти схемы успешно применялись для решения задач о переносе примесей и о влиянии погоды на здоровье населения. Одна из схем такого рода была разработана для целей типизации синоптических ситуаций и воздушных масс, в которых чаще всего наблюдаются замерзающие осадки [51]. После проведения типизации, дальнейшим шагом к прогнозу было применение логистического регрессионного анализа для каждого типа ситуаций.

Однако многие процессы (замерзающая морось, кратковременный замерзающий дождь) не удастся надежно предсказать таким методом.

В качестве еще одного примера метода альтернативного прогноза можно указать разработку [61, 62]. На материале данных дневников погоды на нескольких аэродромах России и Украины авторы провели оригинальную объективную классификацию

синоптических ситуаций, а в качестве других предикторов замерзающих осадков использовали предложенный в [53, 54] фронтальный параметр, адвекцию температуры на поверхности 850 гПа и температуру воздуха у земли. Прогноз формулировался в вероятностной форме, причем пороговая вероятность выбиралась с учетом неравнозначности потерь от ложных тревог и непредсказанных явлений. Было отмечено, что интенсивные замерзающие осадки (дожди) прогнозируются более успешно, чем малоинтенсивные (морось). Расчеты на независимых данных показали в целом практически значимую успешность прогноза замерзающих осадков в пунктах и удовлетворительную точность пространственной локализации зон гололеда. Представляется, что прогноз альтернативными методами может быть полезен в комплексе с прямыми методами определения типа осадков, учитывая сложность идентификации замерзающих осадков и особую опасность этого явления.

2.1.2 Анализ систем прогнозирования обледенения морских судов.

Почти во всех работах отечественных и зарубежных авторов [39-45, 56] особое внимание уделяется определению гидрометеорологических комплексов, при которых наблюдается обледенение судов.

Различают несколько видов обледенения:

1. Обледенение в потоке морских брызг, возникающих при ударе волн о корпус судна (брызговое обледенение).
2. Обледенение вследствие заливания палубы судна забортной водой.
3. Обледенение в атмосферных осадках: переохлажденном дожде, мороси или мокром снеге, в переохлажденном тумане (атмосферное обледенение).
4. Смешанное обледенение, которое образуется при совместном действии морских брызг, заливания забортной водой, атмосферных осадков. Брызговое обледенение является наиболее распространённым и составляет более 90% всех случаев обледенения, в то же время оно наиболее опасно из-за неравномерного нарастания льда. К основным гидрометеорологическим факторам, обуславливающим брызговое обледенение, относятся:

- скорость ветра V ;
- температура воздуха T_a ;
- температура воды T_w ;
- температура замерзания воды T_f (соленость воды S);
- направление ветра относительно судна;
- характеристики ветрового волнения и зыби.

Для прогноза брызгового обледенения за рубежом широко используется метод Д. Оверлэнда [39, 40]. В отличие от отечественного метода, основанного на учете двух факторов [42, 44, 45], приводящих к обледенению – температуры воздуха и скорости ветра, этот метод позволяет дополнительно учесть температуру воды и температуру замерзания морской воды. На первом этапе выполняется расчет величины так называемого показателя (предиктора) обледенения PPR , как функции от скорости ветра V , температуры воздуха T_a , температуры воды T_w , и температуры замерзания воды T_f :

$$PPR = \frac{V(T_f - T_a)}{1 + 0,3(T_w - T_f)}.$$

Данный метод так же неприменим для использования при разработке системы прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП, так как учитывает один локальный (не протяженный) объект. Кроме того, данный метод использует малое количество факторов, влияющих на обледенение.

2.1.3 Анализ систем прогнозирования обледенения автомобильных дорог.

Зимняя скользкость включает в себя все виды снежно-ледяных образований на поверхности дороги, приводящие к снижению коэффициента сцепления: различные виды естественного обледенения, которые в метеорологии объединяют понятием гололедицы, и искусственное обледенение в виде снежного наката.

Согласно [28, 29, 30] ледяная корка образуется в зимний период при температуре воздуха от $+4$ до -20°C : 55% случаев приходится на период $0 - 5^{\circ}\text{C}$; 80% на период $+2...-6^{\circ}\text{C}$; 90% на период $+2...-15^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха оказывает

сильное влияние на формирование условий льдообразования. Гололед на покрытиях в 95% случаев возникает при $w=70\div 100\%$, 90% случаев при $w=80\div 100\%$.

Прогнозирование момента образования гололеда

Для получения оперативной информации о метеорологических условиях, необходимых для расчета прогноза состояния дорожного покрытия, используются пункты дорожного метеоконтроля, создаваемые на основе автоматических дорожных метеорологических станций (далее - АДМС) с набором датчиков, измеряющих метеорологические параметры и состояния поверхности дорожного покрытия. АДМС рекомендуется укомплектовывать датчиками:

- температуры воздуха;
- относительной влажности воздуха;
- температуры поверхности дорожного покрытия;
- температуры под поверхностью дорожного покрытия на глубине 4 - 7 см;
- состояния поверхности дорожного покрытия.

Расчет прогноза параметров погоды, температур дорожного покрытия и состояния дорожного покрытия производится по математическим моделям, алгоритмам и методам. Фактические и накопленные данные должны использоваться для расчета прогноза изменения метеопараметров в местах установки АДМС и на участках дороги между ними. Математическая модель включает в себя следующую информацию: данные о термопрофиле дороги (по результатам термокартирования), топогеодезические данные дороги, ландшафтно- климатические данные. Математическая модель должна обеспечивать заблаговременный расчет параметров окружающей среды и параметров состояния поверхности дорожного покрытия. На основании анализа фактических и расчетных метеорологических параметров и тенденций их изменения составляется прогноз об изменениях состояния дорожного покрытия [59].

Также повторяемость наземного обледенения зависит от климатических и орографических условий. Так, наибольшая повторяемость гололеда, зернистой

изморози и твердого налета наблюдается в тех районах [48], которые подвержены резким изменениям погоды от сильного мороза к оттепели и наоборот, наименьшая — там, где зимой преобладает устойчивая морозная погода. Большое значение имеет относительная высота пункта, т. е. превышение его над окружающей местностью, а также форма рельефа. Наибольшая повторяемость гололеда и плотной изморози наблюдается на возвышенностях, на вершинах холмов, относительная высота которых над окружающей местностью превышает 50 м, а также на наветренных склонах гор. Наименьшая повторяемость гололеда отмечается в долинах рек и низинах.

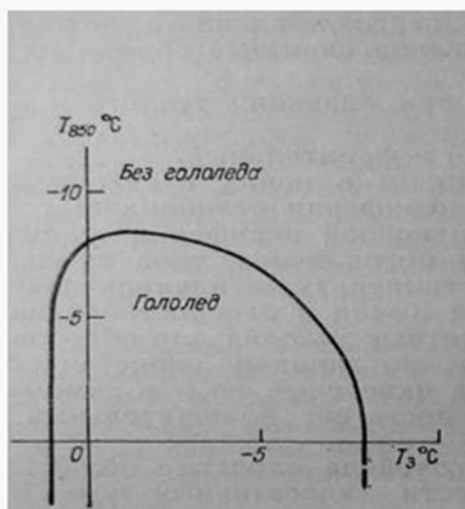


Рис. 1. Зависимость образования гололеда от температуры у поверхности земли (T_3) и температуры на поверхности 850 гПа (T_{850})

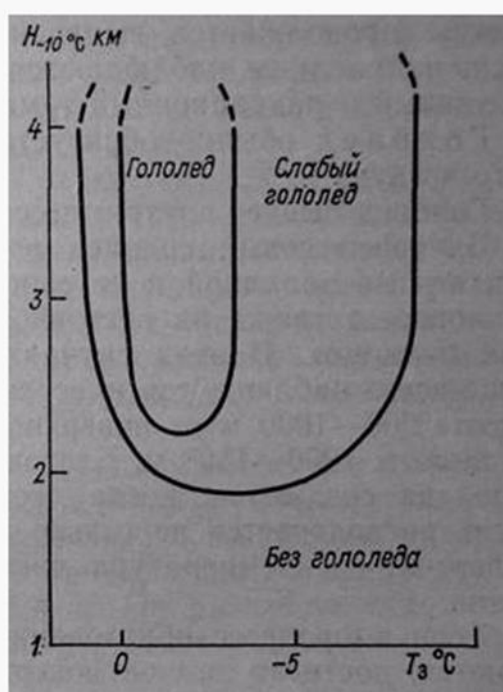


Рис. 2. Зависимость интенсивности гололедообразования от температуры у поверхности земли (T_3) и высоты изотермы -10°C ($H_{-10^{\circ}\text{C}}$)

Одним из методов прогнозирования гололедообразования в настоящее время является графический метод (рисунок 1).

Если в холодное полугодие ожидается адвекция теплого и влажного воздуха, вызванная перемещением в район прогноза теплых атмосферных фронтов, фронтов окклюзии, волновых возмущений и т. д., то по графику дается альтернативный прогноз гололеда, а по графику на рисунке 2 определяется его интенсивность. Если по одному

из графиков прогнозируется гололед, а по другому — его отсутствие, в прогнозе указывается возможность слабого гололеда.

Данный метод не подходит для прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП, так как нет возможности интеграции данных в автоматизированную систему удаления гололеда, учитывается малое количество факторов, влияющих на гололедообразование.

2.1.4. Анализ систем прогнозирования гололедных нагрузок на воздушных линиях

В настоящий момент существует множество научных публикаций, в которых освещено исследование процесса гололедообразования, однако систем прогнозирования гололедообразования в этих публикациях либо нет, либо они при описании процесса не учитывают разнообразные факторы.

Существует подход, в котором климатическое прогнозирование возможных гололедных нагрузок осуществляется путем разработки региональных карт нормативных районов по гололеду. Нормативные значения гололедных нагрузок определяются на основании статистической обработки данных инструментальных наблюдений за гололедом на гидро-метеостанциях с учетом физико-географических условий, влияющих на процесс гололедообразования. Прогнозирование гололедоопасной обстановки осуществляется в соответствии с [43].

Исследованию возможностей прогноза ГИО на ВЛ посвящено относительно немного публикаций. В России подобных публикаций нам не известно, за рубежом их также немного, но все же они есть, например, [68-75].

Во всех опубликованных методах делается упор на определение типа осадков, приводящих к ГИО на ВЛ. Без сомнения холодные осадки являются одной из основных причин, влияющих на формирование ГИО. Однако там не рассматриваются множество других факторов, влияющих на гололедообразование на проводах ЛЭП.

Из российских работ можно выделить подход к прогнозированию гололедообразования на ВЛ с помощью тепло-балансного метода [64-67]. В нем для расчета теплового баланса в качестве входных данных используются результаты прогнозов характеристик воздуха на уровне проводов, рассчитываемых с помощью

региональной гидродинамической модели, имеющей достаточно высокое пространственное разрешение. Использовалась модель WRF-ARW (Исследование и прогноз погоды, США) с шагом по пространству 18км. В качестве входных данных для расчета баланса на проводах ВЛ используются прогностические величины температуры воздуха и точка росы на уровне ВЛ, интенсивность осадков и скорость ветра на уровне ВЛ.

Данный подход также учитывает малое количество факторов, влияющих на гололедообразование.

Краткосрочное прогнозирование гололёдных нагрузок на ВЛ и гололёдоопасной обстановки

Основным источником метеорологической информации о неблагоприятных для энергетики явлениях природы (образование гололедно-изморозевых отложений) являются данные наблюдений сети гидрометеорологических станций (ГМС), расположенных по всей территории Российской Федерации (РФ).

Климатическое прогнозирование возможных гололедных нагрузок осуществляется путем разработки региональных карт нормативных районов по гололеду. Нормативные значения гололедных нагрузок определяются на основании статистической обработки данных инструментальных наблюдений за гололедом на ГМС с учетом физико-географических условий, влияющих на процесс гололедообразования.

В соответствии с ПУЭ-7 определение гололедных нагрузок производится по нормативным нагрузкам с вероятностью непревышения 0,96 (повторяемость 1 раз в 25 лет) с районированием территории РФ по 8 районам по гололеду.

Гидрометеорологическое обеспечение предприятий электроэнергетики осуществляется центральными и территориальными гидрометцентрами Росгидромета (республиканский, краевой, областной и др.) по планам, согласованным с производственными организациями электроэнергетики. Гидрометеорологическое обеспечение предприятий включает предоставление информации о сложившихся и ожидаемых гидрометеорологических условиях по пункту и территории.

Основными видами регулярной информации предоставляемой учреждениями Росгидромета являются:

- долгосрочные (месячные) прогнозы погоды;
- прогноз погоды на сутки и последующие двое суток;
- данные о текущем состоянии погоды;
- штормовые предупреждения об опасных метеорологических явлениях (ОЯ).

Прогноз погоды на сутки и последующие двое суток составляется ежедневно. В прогнозах погоды указывают облачность, осадки, атмосферные явления (шквал, туман, гололед, изморозь, налипание мокрого снега на проводах и деревьях и т.д.), направление и скорость ветра, минимальную температуру воздуха (ночью) и максимальную температуру воздуха (днем).

Прогноз погоды на последующие двое суток составляется на каждые сутки отдельно.

Прогнозы публикуют в ежедневных гидрометеорологических бюллетенях, доводят (передают) до пользователей (потребителей) через средства массовой информации, а также с использованием различных средств связи.

Данные о текущем состоянии погоды приводятся в ежедневных гидрометеорологических бюллетенях по данным наблюдений метеостанций.

Текущую информацию о наличии гололеда на проводах можно получить по данным метеопостов, созданных энергосистемой в соответствии со стандартом организации «Инструкция по производству наблюдений над обледенением проводов и сильным ветром на гололедных постах».

Выводы по главе

На основании вышеприведенного 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.

2. Разработка подходов к созданию нечеткой системы прогнозирования

2.1 Выявление основных параметров, влияющих на процесс гололедообразования

Основной целью практически любой системы мониторинга является определение необходимого параметра в режиме реального времени, а предсказать направление изменения параметра можно только на основе анализа динамики этого параметра. При этом приращение контролируемого параметра базируется на предшествующих измерениях, то есть смена знака одной из величин, функционально связанной с измеряемым параметром в текущий момент времени, приведет к ошибке предсказания. Другой подход, направленный на возможность предсказания изменения управляемого параметра, связан с созданием системы прогнозирования, в основу которой должно быть положено математическое описание реального процесса.

Одним из путей, снижающих недостатки систем мониторинга, подробнее рассмотренные в главе 1, является путь, направленный на наделение их функцией прогнозирования гололедообразования. В настоящее время, прогнозирующие системы широко применяются в науке и технике. Существуют адаптивные прогнозирующие системы управления полётом, системы прогнозирования ледообразования для авиационной техники, системы прогнозирующего нейроуправления нелинейными динамическими объектами, прогнозирующее инверсное нейроуправление в условиях возмущений для позиционно-следящего пневмопривода и т.д. [4,5].

Заблаговременное прогнозирование дает возможность проводить упреждающие мероприятия по удалению льда. Кроме того, позволяет снизить энергозатраты, обеспечить возможность проведения профилактических мероприятий, а также дать запас времени на предотвращение аварии, то есть позволяет проводить планирование противогололёдных мероприятий в масштабах всей сети энергоснабжения.

Созданию моделей гололёдообразования посвящена работа [6], но приведенные в ней модели носят упрощённый характер и не учитывают всех факторов, влияющих на гололёдообразование, причём выборка факторов производилась достаточно условно.

Следует отметить, что в технической литературе имеются отрывочные попытки провести оценку влияния того или иного фактора на процесс гололёдообразования. К примеру, в [2], приводится оценка влияния на гололёдообразование таких факторов, как

температура воздуха, влажность, скорость и направление ветра и т.д. Однако оценка проводится на основании недостаточного количества данных, что в конечном итоге не позволяет разработать адекватное математическое описание процесса гололёдообразования.

Поэтому, цель диссертационной работы 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.

Одним из возможных путей, по которому можно пойти для построения системы прогнозирования гололёдообразования на проводах Линии электропередач, является использование статистических данных, предоставленных ФГБУ Дальневосточным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на территории Хабаровского края.

В качестве примера ниже приводится выборка измерений гололёдообразования 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 гололёдообразования 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).

Сводная таблица метеорологических данных приведена на рисунке 3-4, расшифровка обозначений приведена в списке сокращений и условных обозначений.

S	Tnach	Pr1	Pr2	tnach	Nnach	vnach	tmax	Nmax	vmax	D	L	Day	tp
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. 3. – Метеорологические данные

ttr	H	Dn	Ps	Pym	OO	ON	OCc-Cs	OAc-As	OCu-Cb	OSt-Sc	OFr-nb	W	ww
-30.9	73	0.18	993.6	1025.9	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-25.4	79	0.21	988.4	1019.9	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.9	83	0.26	987.3	1018.1	75	0	0	0	0	0	0	1	2
-25.5	78	0.22	985.6	1017.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-24.7	79	0.22	990.1	1021.6	57	10	0	8	2	0	0	7	71
-27.9	76	0.20	989.2	1021.0	57	4	0	1	0	0	0	1	10
-30.2	75	0.17	989.0	1021.1	78	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.1	82	0.25	992.0	1023.1	58	10	0	5	0	0	0	1	10
-20.2	83	0.26	1000.0	1031.2	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-14.3	90	0.23	983.5	1013.3	75	0	0	0	0	0	0	0	2
-27.6	77	0.19	999.5	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-29.8	75	0.17	995.3	1027.5	56	10	0	5	0	0	0	1	10
-31.9	74	0.15	993.6	1026.0	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-16.3	88	0.24	982.8	1013.1	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.3	86	0.31	981.3	1011.4	84	0	0	0	0	0	0	1	2
-19.7	85	0.23	991.8	1022.8	81	10	0	3	0	0	0	2	2
-23.0	83	0.20	992.2	1023.6	77	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.1	89	0.24	981.0	1011.1	76	10	0	3	0	0	0	7	2
-18.5	87	0.22	986.3	1017.0	62	10	0	3	0	0	0	1	2
-19.6	86	0.21	989.5	1020.4	66	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.6	94	0.21	984.3	1013.8	62	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.6	99	0.00	993.4	1024.7	50	0	0	0	0	0	0	0	10
-22.6	96	0.05	988.2	1019.6	80	4	0	1	0	0	0	0	2
-13.9	70	0.91	988.6	1018.5	84	10	0	8	4	0	0	2	2
-34.0	72	0.14	992.0	1024.6	59	10	0	3	0	0	0	2	10
-22.3	84	0.20	989.1	1020.3	83	0	0	0	0	0	0	1	2
-22.0	83	0.22	984.3	1015.3	50	10	0	8	2	0	0	7	71
-14.7	100	0.00	988.3	1018.8	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-18.8	97	0.07	974.6	1005.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-13.7	88	0.24	983.4	1013.4	84	10	0	3	0	0	0	2	2
-12.3	98	0.00	986.1	1016.1	99	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.4	75	1,13	991.0	1020.3	99	10	0	8	2	0	0	2	2
-29.3	87	0.10	994.4	1026.7	72	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.0	92	0.13	994.9	1026.2	84	0	0	0	0	0	0	0	2
0.2	100	0.00	964.3	992.3	6	10	10	8	8	2	0(*600)	8	86
-16.1	96	0.09	994.0	1024.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-25.6	88	0.09	987.9	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-26.8	86	0.12	1000.8	1032.9	84	1	0	1	0	0	0	0	2
-17.9	95	0.08	992.8	1023.7	68	0	0	0	0	0	0	0	2
-13.1	96	0.12	991.7	1021.9	80	6	0	1	0	0	0	1	2
-5.0	100	0.01	994.9	1024.4	7	0	0	0	0	0	0	4	44
-36.2	83	0.05	991.4	1024.4	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-23.4	89	0.10	994.3	1025.8	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	82	0.09	981.2	1013.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-24.2	86	0.15	984.2	1015.5	58	10	0	3	0	0	0	7	70
-8.8	100	0.00	982.7	1012.3	50	6	0	1	0	0	0	1	10
-14.8	95	0.10	989.1	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-30.5	87	0.09	998.9	1031.6	70	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	81	0.09	1002.3	1035.5	84	4	0	1	0	0	0	0	2
-28.8	81	0.14	996.9	1029.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-15.9	94	0.09	975.8	1005.9	57	10	0	5	0	0	0	1	10
-22.3	94	0.05	989.1	1020.5	57	0	0	0	0	0	0	1	10
-18.2	97	0.08	989.1	1020.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-10.1	92	0.26	1001.4	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-22.0	88	0.12	985.9	1017.0	64	0	0	0	0	0	0	7	2
-29.8	84	0.09	990.8	1023.0	57	10	0	3	0	0	0	7	71

Рис. 4. – Метеорологические данные (продолжение)

Анализ приведенных данных показывает, что в самом общем виде Диаметр гололедного образования является функцией как минимум шестнадцати параметров $D=F(T_{nach}, Pr1, t_{nach}, V_{nach}, t_{max}, t_{pp}, t_{tr}, H, P_s, O_o, W, D_n, Pr2, S, P_{ym}, V_{max})$. Необходимо отметить, что кроме фактически измеряемых факторов, на величину гололедного образования оказывают влияние еще и геофизические параметры местности расположения измерительного станка. В частности, для приведенных в таблице данных использовались параметры такого типа:

Метеостанция расположена между долинами рек Горбыль и Чергали на ровной возвышенности, в восточной части села. Возвышенность имеет превышение над долинами 10-15 м, вытянута с Ю на С, заросла густым смешанным лесом, состоящим из березы, осины, кустарника.

Уровень грунтовых вод не выявлен.

Ближайшее окружение метеоплощадки: К Северу, Северо-Востоку, Востоку, Юго-Востоку, Югу, Северо-Западу - на расстоянии 100-120 м густой смешанный лиственный лес из березы, кустарника высотой 8-10м.

К Северо-Востоку, Северо-Западу и Западу на расстоянии около 60 -70м густой смешанный лиственный лес из березы, кустарника высотой 8-10м.

Село – к Западу, Северо-Западу – одноэтажные частные дома на расстоянии 150 м и далее.

На Юго-Востоке на расстоянии около 400 м деревья и кустарник высотой 4-5м.

Огромное количество факторов, влияющих в той или иной мере на величину гололедного образования, указывает на необходимость при построении системы прогнозирования ориентироваться методы системного анализа, выделив путем декомпозиции внутрисистемные факторы и факторы, обусловленные воздействием внешней среды.

При оценке толщины отложения будем ориентироваться на общепринятую технологию определения диаметра отложения на проводах гололедного станка состоящую в следующем. Вид и продолжительность гололёдно-изморосевого отложения определяется визуальным осмотром провода на гололёдном станке. Размеры отложения определяются измерением наибольшей по величине оси поперечного

сечения отложения (диаметр D) и расстояния между двумя наиболее удалёнными точками в направлении, перпендикулярном линии диаметра (толщина T). Из результатов измерений диаметр провода d исключается. Схема измерения диаметра и толщины отложения представлены на рисунке 5.

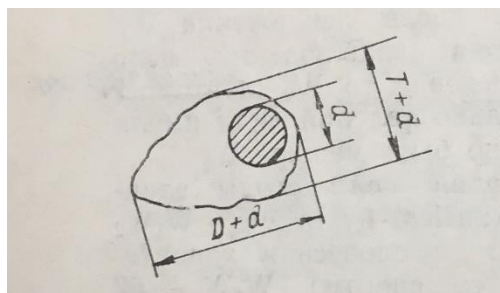


Рис. 5. – Схема измерения диаметра и толщины гололёдно-изморозевого отложения

На основании вышеизложенного, выходной координатой разрабатываемой системы является диаметр ледообразования, которая зависит от значительного количества факторов.

Таким образом, рассматривая процесс гололедообразования как систему, можно констатировать, что данная система относится к сложным системам, что позволяет использовать при анализе системный подход. К примеру, в [6] автор делает вывод, что для ответа на вопрос о возможности образования гололёда, необходимо и достаточно знать температуру провода, а также относительную влажность и температуру воздуха.

В [1] автор анализирует зависимость различных видов обледенения от различных метеорологических факторов на основании экспериментальных данных с гололёдных станций Донбасса. Показывает, при каких температурах регистрируется наибольшее количество случаев образования гололёда, а также наиболее вероятные величины относительной влажности, при которых возможно образование гололёда. Кроме того, по мнению автора, направление ветра также оказывает достаточно сильное влияние на процесс гололедообразования.

На основании анализа вышеприведённых литературных источников, можно утверждать, что такие параметры, как температура воздуха, относительная влажность

воздуха, направление ветра являются главными факторами системы образования гололеда.

Очевидно, что такие факторы, как скорость ветра, температура поверхности почвы, температура точки росы, погодные условия, облачность, расположение станции, дефицит насыщения, атмосферное давление на уровне станции являются второстепенными и оказывают гораздо меньшее влияние, чем главные факторы.

На рисунке ниже приведена схема системы гололёдообразования.

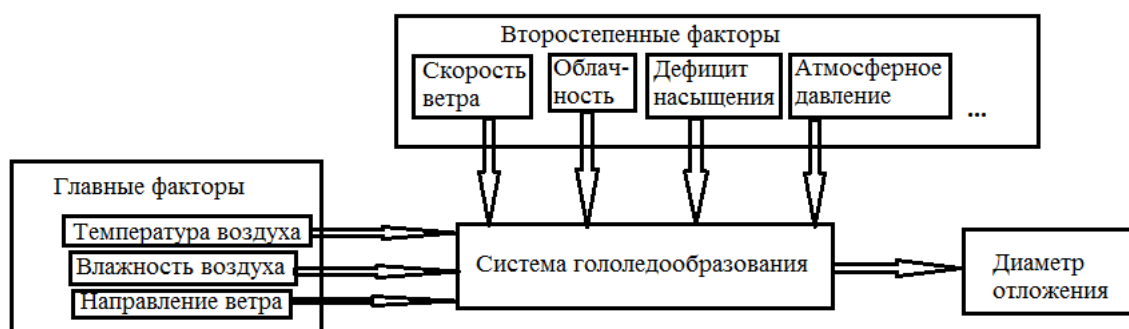


Рис. 6-

Схема системы гололёдообразования

Целью обработки полученных статистических данных измерения гололедных отложений является получение экспертной оценки влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования, при этом можно оперировать качественными характеристиками.

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.

Данные зависимости реализовывались на соответствующей плоскости параметров (см. рис. 4-11). Точки измерения зависимостей при одинаковых значениях вида гололедообразования и одинаковых диаметрах гололедообразования приведены на одном рисунке (обозначены литерами, а и б).

Оценка влияния геофизического месторасположения на гололедообразование на проводах ЛЭП осуществлялась путем сравнения точек измерения согласно статистическим данным (рисунок 1,2).

В рамках данной диссертационной работы в качестве примера на рис. 7 – 14 показаны временные зависимости ряда основных параметров ледообразования: температуры воздуха в начале нарастания отложения, ° С; скорости ветра в начале нарастания отложения, м/с; температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, ° С; скорость ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с; относительной влажность воздуха, % при фиксации толщины отложения.

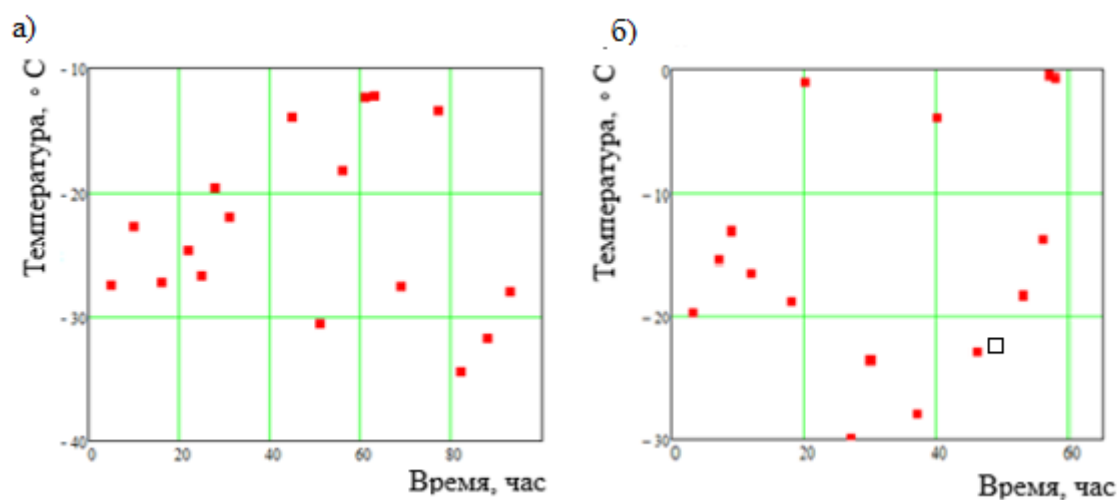


Рис.7 – Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

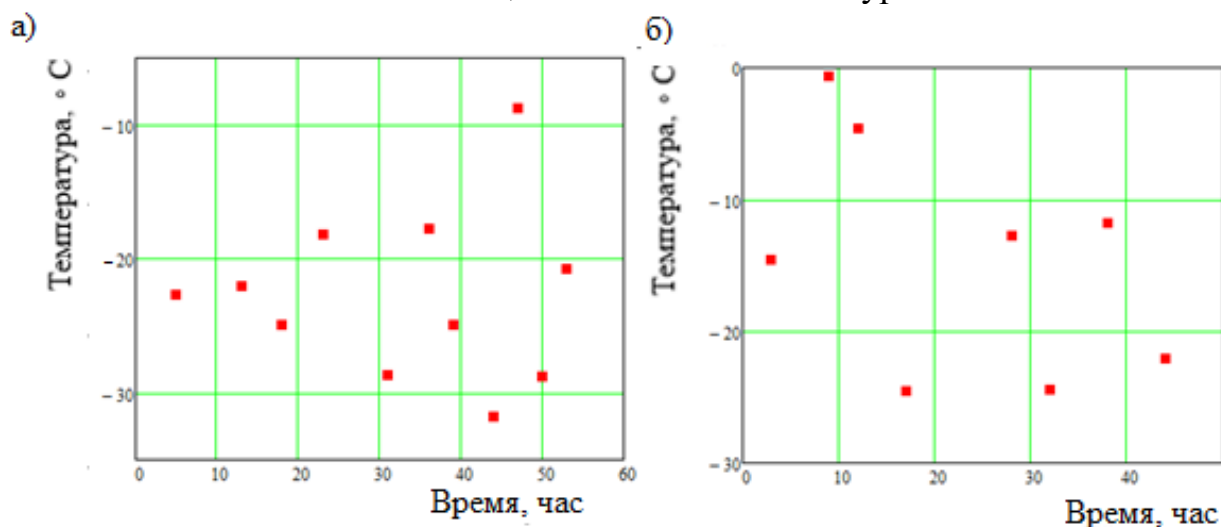


Рис.8 – Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 6 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

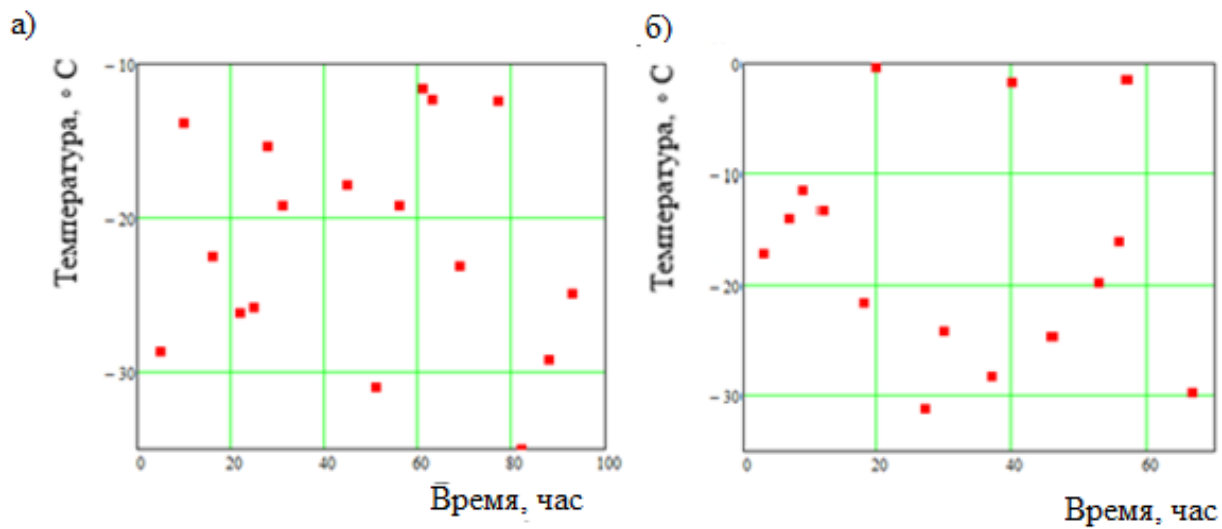


Рис.9 – Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

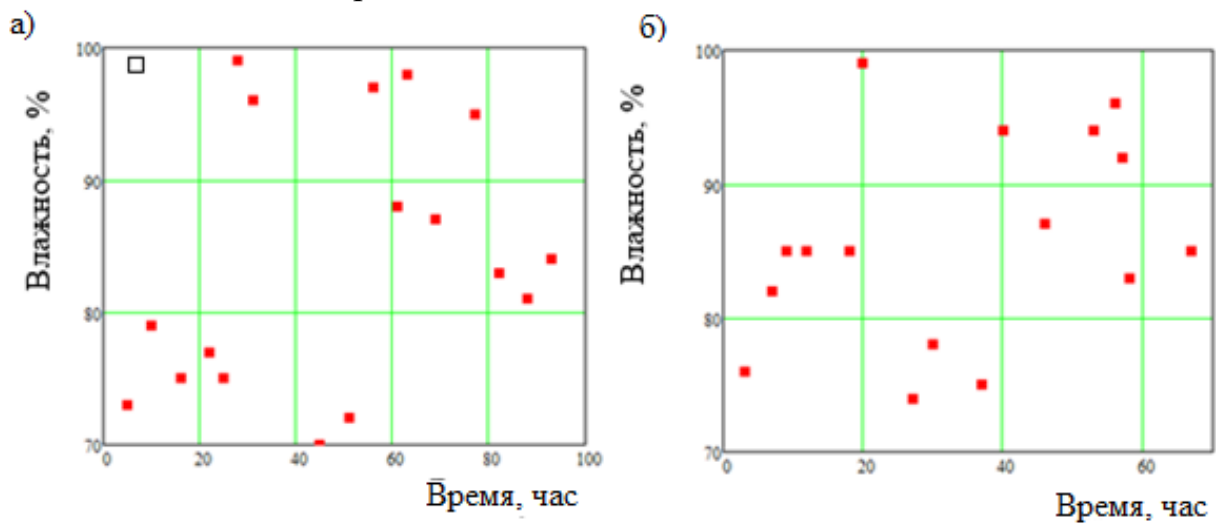


Рис.10 – Зависимость относительной влажности воздуха от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

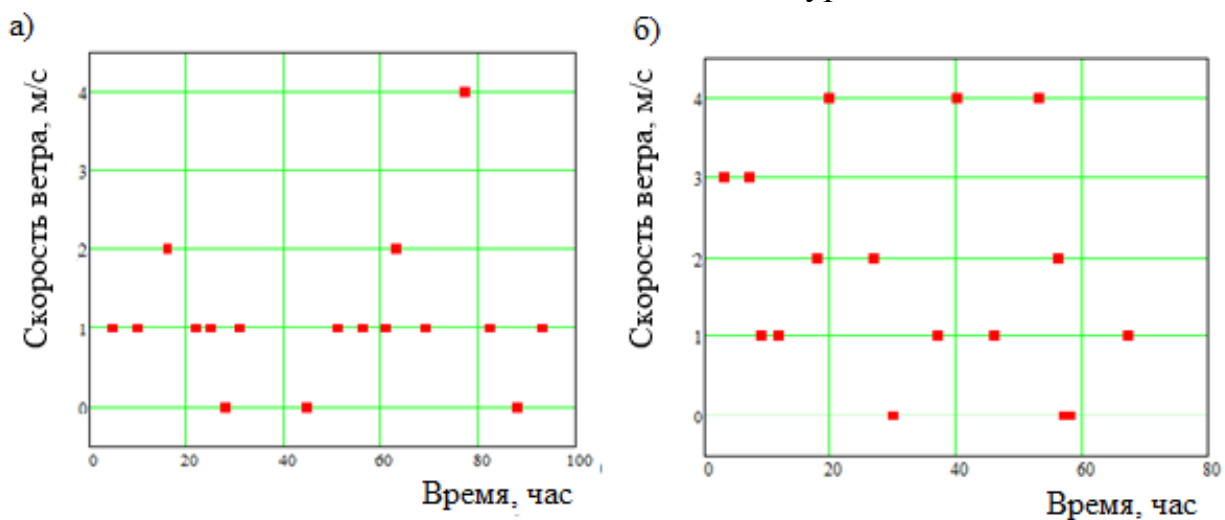


Рис.11 – Зависимость скорости ветра в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

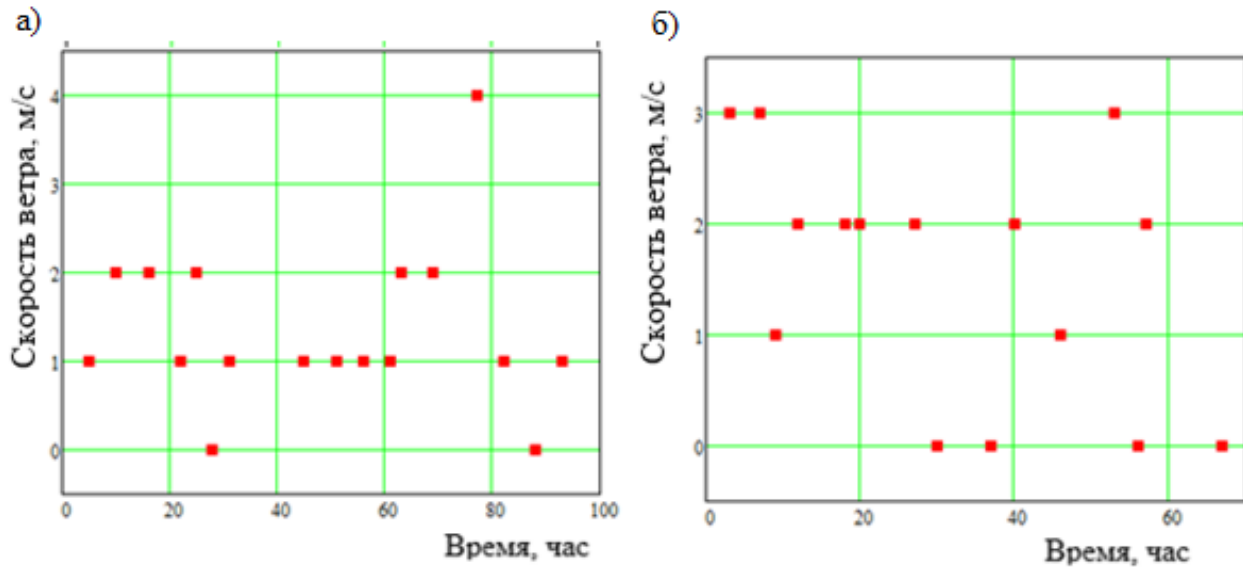


Рис.12 – Зависимость скорости ветра при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

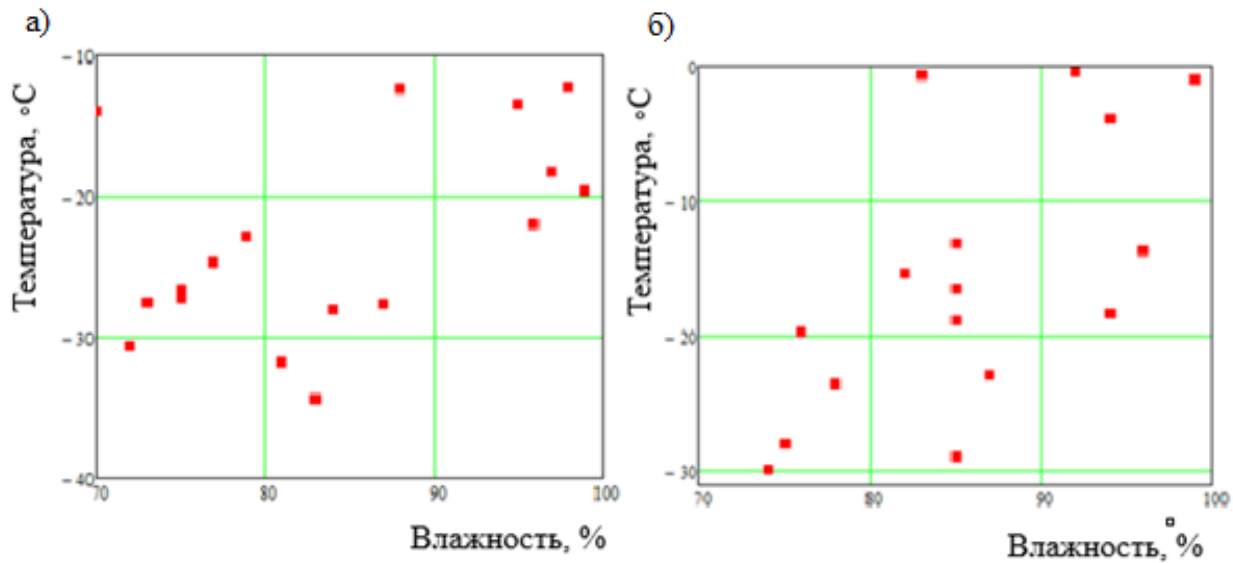


Рис.13 – Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

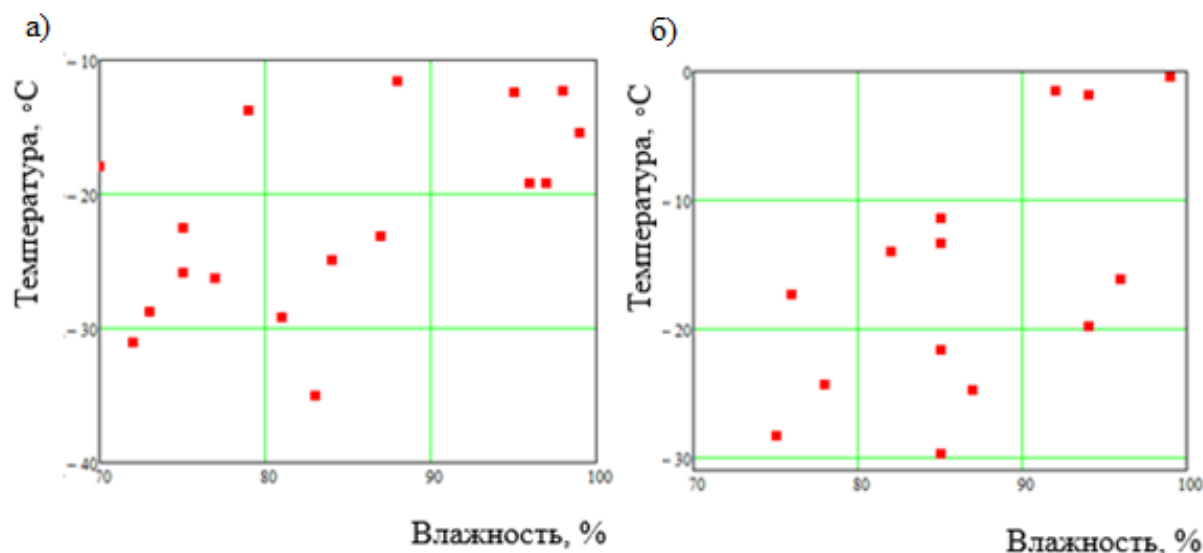


Рис.14 – Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции Братолюбовка, б – для метеостанции Николаевск-на-Амуре

Анализ обработанных результатов измерения, приведенных на рис. 7-14 позволяет утверждать, что описать аналитически временную зависимость ни одного из параметров ледообразования не представляется возможным. Вместе с тем использованный подход путем попарного сравнения для одной фиксированной точки измерения, позволяет выявить, какие из параметров оказывают влияние на процесс ледообразования. 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. То есть поиск адекватного математического описания процесса гололедообразования как некой динамической системы вести на базе принципов нечёткой идентификации. Кроме того, приведенные на рис. 7 - 14 результаты обработки хорошо отражают диапазоны изменения каждого параметра в ходе ледообразования, а распределения точек измерения на плоскости в виде некой концентрированной области позволяет использовать ее как некий «информационный сгусток» при составлении правил базы знаний.

Таким образом, одним из возможных путей создания математического описания процесса ледообразования является путь, базирующийся на принципах нечеткой идентификации. Выше описанный подход обработки статистических данных позволяет

на качественном уровне оценить влияние того или иного параметра на процесс ледообразования.

2.2 Анализ возможности математического описание процесса гололедообразования

При исследовании любого технологического процесса во главу угла встает вопрос математического описания процесса. Создание математической модели процесса относительно легко удастся, если на выходные параметры процесса оказывает влияние незначительное количество возмущающих факторов. При этом известен диапазон изменения каждого фактора, его периодичность, частота и т.п.

Задача создания математического описания технологического процесса в случае многофакторного воздействия, как правило, решается индивидуально в частном случае, с использованием специальных приемов.

С точки зрения теории управления процесс гололедообразования представляет собой технологический объект, на выходные параметры которого оказывают влияние многочисленные факторы от состояния окружающей среды до параметров месторасположения.

Исходя из приведенного в разделе 2.1 анализа факторов, влияющих на гололедообразование, можно констатировать, 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.

Поэтому стоит задача формализовать и унифицировать математическое описание гололедообразования, что в дальнейшем позволит использовать данное математическое описание в целях прогнозирования гололедообразования.

С другой стороны, в каждом регионе имеются большие базы данных метеостанций, контролирующих процесс ледообразования, поэтому напрашивается решение попытаться на основе этих данных 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.

Исходные данные: Параметры, влияющие на гололедообразование, снятые на метеорологических станциях. Все 5 станций оборудованы гололедными станками с четырьмя проводами диаметром 5 мм. и комплектом приспособлений для снятия отложений. Наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями производятся наблюдателями с момента появления отложения до момента полного его исчезновения с проводов станка по графику наблюдений, но не реже, чем 1 раз в полтора часа. Во время наблюдений определяются следующие характеристики гололедно-изморозевых отложений: вид гололедно-изморозевого отложения на проводе, продолжительность обледенения, размеры отложения на проводе, ход развития процесса гололедно-изморозевого отложения.

Существует множество методов обработки статистических данных [13-20]. Например, свodka и группировка материалов статистического наблюдения – это процесс обработки определенных единичных факторов, образующих общую совокупность всех данных, собранных при наблюдении.

Вариационные ряды - вариация или разброс показателей отдельных единиц. Используется в случае, если на индивидуальные значения величин воздействуют многие факторы, а сами изучаемые явления или процессы обладают вариацией, причины которой следует искать в сущности того, что изучается.

Вариационный ряд служит для описания больших массивов чисел. Чтобы охарактеризовать вариационный ряд, необходимо рассчитать специальные показатели, в том числе средние величины, показатели вариабельности, показатели репрезентативности выборочных данных.

Данный подход не целесообразно использовать для обработки имеющихся статистических данных, так как он требует больших временных затрат.

Метод корреляционного анализа заключается в изучении коэффициентов корреляции между переменными. При этом сравниваются коэффициенты корреляции между одной парой или множеством пар признаков для установления между ними статистических взаимосвязей.

Корреляционный анализ ставит задачи:

Измерения тесноты имеющейся связи дифференцирующихся признаков; Определения неизвестных причинных связей; Оценка факторов, в наибольшей степени воздействующих на окончательный признак.

Данный подход также не целесообразно использовать для обработки статистических данных, потому что результаты применения достоверны с определенной долей вероятности, не всегда возможно обеспечить требуемую точность вычислений из-за недостатков измерительной техники.

Регрессионный анализ — метод моделирования измеряемых данных и исследования их свойств. Данные состоят из пар значений зависимой переменной (переменной отклика) и независимой переменной (объясняющей переменной). Регрессионная модель - это функция независимой переменной и параметров с добавленной случайной переменной. Параметры модели настраиваются таким образом, что модель наилучшим образом приближает данные.

Регрессионный анализ ставит задачи:

Определение формы связи; Установление степени воздействия независимых показателей на зависимый; Определение расчетных значений зависимого показателя.

Данный подход требует больших временных затрат, не решает в полной мере те задачи, которые необходимы в рамках текущего исследования.

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Другой подход связан с непосредственной оценкой влияния того или иного фактора на диаметр отложения. В качестве первого допущения, пренебрегаем географическим положением станций и рассматриваем параметры независимо от того, на какой станции они были получены, поскольку количество рассматриваемых параметров и без географических данных превышает 10.

Выбираем на каждой станции случай гололёдного отложения с приблизительно одинаковой температурой и диаметром, за эталонную точку принимаем точку со станции Братолюбовка. Числами от 1 до 10 обозначены названия параметров, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров, оказывающих влияние на гололедообразование

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-26,70	-26,70	1	107	2	116	0,52	75	0,17	995,30
-26,8	-28	0	0	1	240	0,61	88	0,07	1002,5
-26,4	-24	0	0	2	180	0,61	87	0,11	1025,4
-25,60	-24,10	1	320	4	260	0,65	83	0,11	1000,6
-26,2	-31,9	0	0	0	0	0,65	90	0,07	997

- 1- Температура воздуха в начале гололедообразования, °С
- 2- Температура воздуха max, °С
- 3- Скорость ветра в начале гололедообразования, м/с
- 4- Направление ветра в начале гололедообразования, град.
- 5- Скорость ветра max, м/с
- 6- Направление ветра max, град.
- 7- Парц, Давление вод п, гПа
- 8- Относительная влажность, %
- 9- Дефицит насыщения гПа
- 10- Атм. давление на уровне станции, мм. рт. ст.

Параметры под номерами 1, 2, 4, 6, 8 – являются основными. Параметры под номерами 3, 5, 7, 9, 10 – являются второстепенными. Анализ проведём как для основных, так и для второстепенных параметров.

Как видно из таблицы 1, Температура начала случая имеет несущественные отклонения от эталонной точки: от 0,37 до 4,1 %. Максимальная температура к стадии установившегося отложения – отклоняется от 4,8% до 19,47%. Причем имеются отклонения как в положительную, так и в отрицательную сторону. Скорость и направление ветра имеет отклонение от 0% до 200%. Парциальное давление отклоняется в отрицательную сторону от 17,3% до 25%, относительная влажность отклоняется в отрицательную сторону от 10,67 до 20 %. Дефицит насыщения отклоняется от 35,29% до 58,8 % в положительную сторону, Атмосферное давление имеет отклонение от эталонной точки от 0,17% до 3% в отрицательную сторону.

Таблица 2

Значения параметров, оказывающих влияние на гололедообразование

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-24,70	-24,70	1	326	1	303	0,64	77	0,19	999,50
-24,8	-19,7	3	28	3	22	0,67	81	0,16	1013,3
-25,2	-29,4	1	160	3	150	0,71	88	0,08	1016,9

-23,60	-24,30	0	0	0	0	0,73	78	0,18	1013,4
-24,5	-25,4	0	0	0	0	0,94	90	0,10	994,5

В таблице 2 приведена выборка параметров для того же диаметра отложения, но с несколько иной начальной температурой ледообразования. В данном случае видно, что, существует большой размах в относительных значениях: Температура начала случая имеет несущественные отклонения: от 0,4% до 4,45%. Максимальная температура к стадии установившегося отложения – отклоняется от 2,83% до 20,24%. Причем имеются отклонения как в положительную, так и в отрицательную сторону. Дефицит насыщения отклоняется от 5,26% до 57,9% в положительную сторону, а парциальное давление отклоняется в отрицательную сторону от 4,69% до 46,88%. Существенное отклонение от 0% до 200% имеет скорость и направление ветра. Отрицательное отклонение от 1,3% до 16,88% имеет относительная влажность. Атмосферное давление имеет отклонение от эталонной точки от 0,5% до 1,7% как в отрицательную, так и в положительную сторону.

С увеличением числа выборок для одного и того же диаметра отложений приводит к ещё большему разбросу параметров. Так, например, включение в анализ ещё трех выборок приводит к следующим изменениям: Температура начала случая изменяется: от 0,7% до 13,3%. Максимальная температура к стадии установившегося отложения – отклоняется от 2,83% до 64,38%. Скорость ветра в начале отложения имеет отклонение от 0% до 300%. От 0% до 199% отклоняется направление ветра в начале отложения, а Максимальная скорость ветра к стадии установившегося отложения имеет отклонение от 0% до 300%. От 19% до 153% отклоняется максимальное направление ветра к стадии установившегося отложения. Парциальное давление имеет меньшее отклонение - от 4,69% до 98%, относительная влажность отклоняется ещё меньше - от 1,05% до 36%. Дефицит насыщения имеет существенные отклонения от 0% до 415%, От 0,17% до 4,28% отклоняется от эталонной точки атмосферное давление.

Аналогичная ситуация прослеживается и при других значениях выходного параметра гололедообразования. В таблице 3 приведена выборка параметров гололедообразования при диаметре 6 мм.

Таблица 3

Значения параметров, оказывающих влияние на гололедообразование

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-20,80	-20,80	0	0	1	180	1,04	88	0,12	985,90
-21,8	-21,3	3	35	3	20	0,90	83	0,18	1016,4
-21	-21,9	2	360	3	30	1,04	92	0,12	1012,2
-21,90	-22,50	1	260	0	0	0,90	84	0,16	1009,3
-21,5	-22,1	0	0	0	0	0,72	49	0,72	990,8

При увеличении числа выборок до трех, разброс некоторых параметров незначительно снижается, а некоторых – значительно увеличивается. Так, например, Температура начала случая несущественно изменяется (от 0,95% до 11,9%). Максимальная температура к стадии установившегося отложения – отклоняется уже существеннее (от 0,91% до 35%). Скорость ветра в начале отложения имеет гораздо большее отклонение от 0% до 200%, а направление ветра в начале отложения отклоняется, в свою очередь, от 27% до 681%. От 0% до 100% отклоняется максимальная скорость ветра к стадии установившегося отложения, а максимальное направление ветра к стадии установившегося отложения отклоняется очень существенно (от 25% до 1400%). Парциальное давление, в свою очередь, имеет отклонение от 13,5% до 48,3%, а относительная влажность отклоняется от 1,03% до 46,7%. От 9,1% до 500% отклоняется дефицит насыщения, а атмосферное давление имеет несущественное отклонение от эталонной точки от 0,28 % до 3,3%.

Разброс параметров сохраняется и при значении выходного параметра, равного 7 мм. (Таблица 4)

Таблица 4

Значения параметров, оказывающих влияние на гололедообразование

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-15,30	-15,30	0	0	1	67	1,77	94	0,09	975,80
-15,8	-16	4	10	4	10	1,58	90	0,18	1004,8
-16,3	-18	1	40	2	33	1,49	86	0,24	1015,5
-16,00	-16,00	2	6	2	6	1,53	86	0,25	1012,5
-15,1	-15,8	0	0	0	0	1,66	87	0,25	989,5

Наиболее сильный разброс виден на параметрах скорость и направление ветра. Они имеют существенное отклонение от 0% до 1016,7%.

Из полученных результатов не прослеживается связь между параметрами, участвующими в гололедообразовании даже для одного и того же значения выходной величины. Попытка получить графическую зависимость для трех основных параметров (согласно рисунка 1-4) также не приводит к однозначным результатам.

На рисунках 13-16 приведены поверхности изменения основных факторов для четырех ранее рассмотренных выборок статистических данных.

Анализ полученных поверхностей наглядно демонстрирует отсутствие однозначности в виде полученных поверхностей.

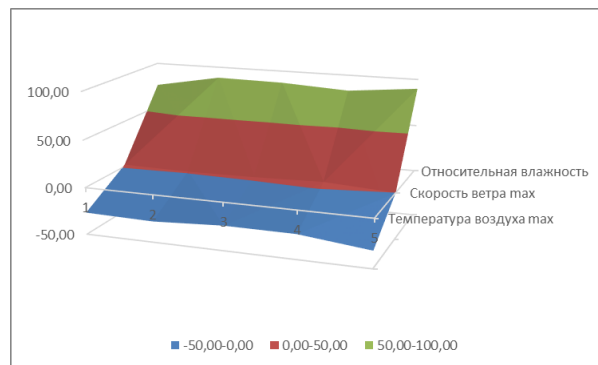


Рис. 13 Поверхность отклика гололедного отложения от основных параметров при диаметре отложения 5 мм. для выборки 1.

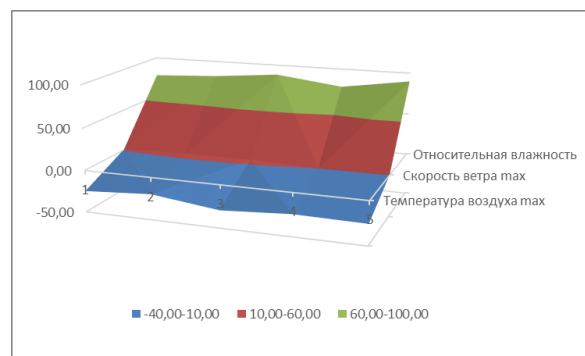


Рис.14 Поверхность отклика гололедного отложения от основных параметров при диаметре отложения 5 мм. для выборки 2.

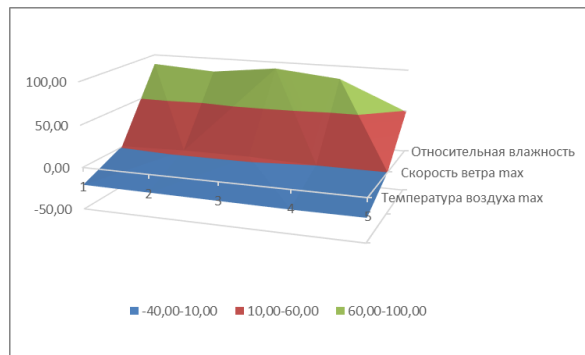


Рис.15 Поверхность отклика гололедного отложения от основных параметров при диаметре отложения 6 мм. для выборки 1.

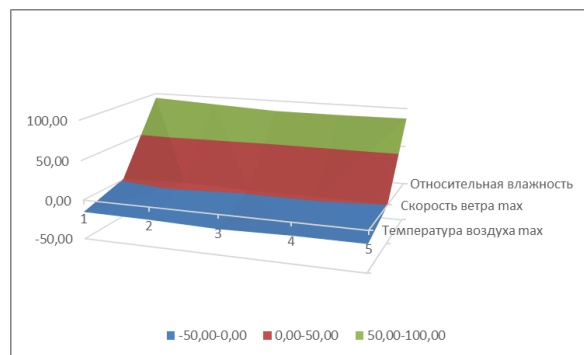


Рис.16 Поверхность отклика гололедного отложения от основных параметров при диаметре отложения 7 мм. для выборки 1.

На основании полученных результатов можно констатировать, 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.

Таким образом, на основании вышеизложенного, ставится задача проведения нечеткой идентификации. Процесс нечеткой идентификации базируется на экспертной оценке области распределения функций принадлежности. Поскольку в рамках данной работы исследуется большой массив статистических данных, то стоит задача на базе этих данных разработать подход к определению областей функций принадлежности нечеткого идентификатора.

2.3 Обоснование и реализация математического подхода к оценке определения области распределения функций принадлежности нечеткого идентификатора

Ранее при анализе возможности математического описания процесса гололедообразования путем обработки массива статистических данных было выявлено, что аналитической зависимости между параметрами, влияющими на процесс гололедообразования (температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажность, парциальное давление, дефицит насыщения, атмосферное давление), установить невозможно даже в случае одинакового диаметра отложения.

Нелинейность и неоднозначность влияния каждого из параметров, участвующих в процессе ледообразования вынуждает использовать другие подходы для идентификации модели процесса ледообразования. Одним из возможных вариантов такого подхода может быть подход, ориентированный на использование интеллектуальных вычислительных методов, к примеру, таких как нечёткая идентификация [2-6].

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. В настоящее время для обработки огромного количества статистических данных используются различные вычислительные алгоритмы. Например, генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, алгоритм «Кукушкин поиск», муравьиный алгоритм.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Проанализируем известные вычислительные алгоритмы с точки зрения их применения для решения поставленной задачи – определения наиболее вероятной зоны расположения функций принадлежности нечеткого идентификатора. Генетический алгоритм - Генетические алгоритмы предназначены для решения задач оптимизации.

Примером такой задачи является обучение нейронной сети, то есть выбор таких значений весов, при которых достигается минимальная ошибка. Генетический алгоритм основан на методе случайного поиска. Основным недостатком случайного поиска является то, что у нас отсутствует информация о том, сколько времени займет решение проблемы [11-12]. С помощью данного алгоритма невозможно получить оптимальное решение по выявлению рабочей области.

Алгоритм имитации отжига относится к классу пороговых алгоритмов локального поиска. На каждом шаге этого алгоритма для текущего решения ik в его окрестности $N(ik)$ выбирается некоторое решение j и, если разность по целевой функции между новым и текущим решением не превосходит заданного порога tk , то новое решение j заменяет текущее. В противном случае выбирается новое соседнее решение [13-14], то есть его применение для поставленной задачи малоприменимо, так как данный алгоритм также не дает возможность выделения необходимой области.

Алгоритм «Кукушкин поиск» - Алгоритм вдохновлен поведением кукушек, подкладывающих в свои яйца в гнезда других птиц. В этом алгоритме каждое яйцо в гнезде представляет собой решение, а яйцо кукушки - новое решение. Цель заключается в использовании новых и потенциально лучших (кукушкиных) решений, чтобы заменить менее хорошее решение в гнездах. В простейшем варианте алгоритма в каждом гнезде находится по одному яйцу [15-17]. Использование данного алгоритма возможно, но связано только с поиском наилучшей области, упуская промежуточные решения.

Муравьиный алгоритм - Механизмы нахождения кратчайшего пути от муравейника до источника пищи основаны на неявных взаимодействиях муравьев, называемых стигмергией. Каждый раз, когда они переходят от гнезда к еде и обратно, муравьи оставляют след феромонов. Другие муравьи, почувствовав такие следы на земле, инстинктивно устремляются к нему. Поскольку эти муравьи также оставляют после себя пути феромонов, то чем больше муравьев движется по определенному пути, тем привлекательнее они становятся для своих родственников. В то же время, чем короче путь к источнику пищи, тем меньше времени требуется для его перемещения муравьям, и, следовательно, тем быстрее становятся заметными оставленные на нем следы. Муравьиный алгоритм моделирует многоагентную систему. Ее агентов в дальнейшем

будем называть муравьями. Как и настоящие муравьи, они довольно просто устроены: для выполнения своих обязанностей они требуют небольшое количество памяти, а на каждом шаге работы выполняют несложные вычисления.

Каждый муравей хранит в памяти список пройденных им узлов. Этот список называют списком запретов (или просто памятью муравья). Выбирая узел для следующего шага, муравей «помнит» об уже пройденных узлах и не рассматривает их в качестве возможных для перехода. На каждом шаге список запретов пополняется новым узлом, а перед новой итерацией алгоритма – то есть перед тем, как муравей вновь проходит путь – он опустошается.

Кроме списка запретов, при выборе узла для перехода муравей руководствуется «привлекательностью» ребер, которые он может пройти. Она зависит, во-первых, от расстояния между узлами (то есть от веса ребра), а во-вторых, от следов феромонов, оставленных на ребре прошедшими по нему ранее муравьями. Естественно, что в отличие от весов ребер, которые являются константными, следы феромонов обновляются на каждой итерации алгоритма: как и в природе, со временем следы испаряются, а проходящие муравьи, напротив, усиливают их. Выбор правильного соотношения параметров является предметом исследований, и в общем случае производится на основании опыта.

После того, как муравей успешно проходит маршрут, он оставляет на всех пройденных ребрах след, обратно пропорциональный длине пройденного пути. Таким образом, в конце каждой итерации необходимо обновить значения интенсивностей. [18-20].

МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ ЗОН РАСПОЛОЖЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКОГО ИДЕНТИФИКАТОРА.

В данной работе рассматривается использование муравьиного алгоритма для определения наиболее вероятных зон расположения функций принадлежности нечеткого идентификатора. 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.

Приведём блок-схему алгоритма для построения замкнутых областей графиков имеющихся статистических данных для выявления наиболее вероятного расположения функций принадлежности нечеткого идентификатора.

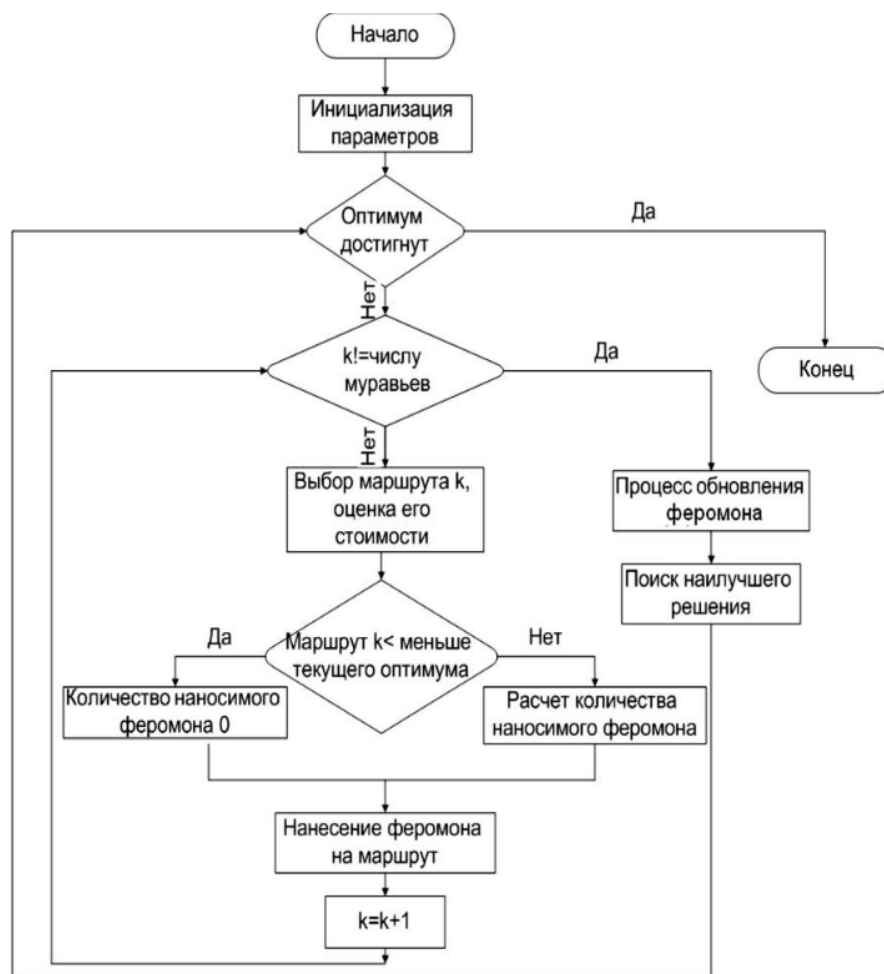


Рис.17 Блок-схема муравьиного алгоритма

Ниже приводятся результаты построения областей расположения нечеткого множества конкретного параметра, участвующего в процессе ледообразования для данных пяти метеостанций Хабаровского края.

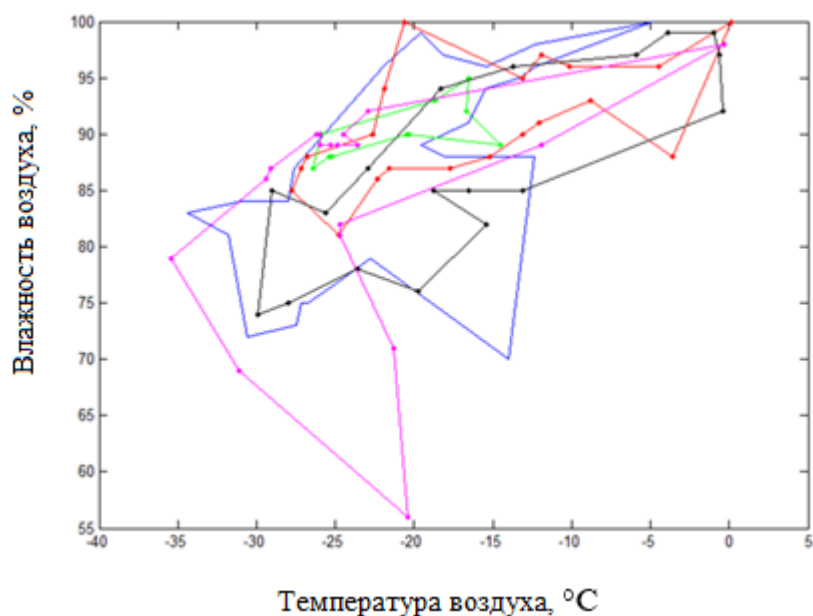


Рис.18 Зависимость относительной влажности от температуры воздуха при диаметре отложения в 5 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зея – фиолетовым.

Анализ полученных результатов расчета (рис.18) показывает, что область, в которой пересекаются все графики – очень мала: Влажность от 89 до 94%, температура от -21 до -16 °С. Однако область графика станции Елабуга небольшая, поэтому рассмотрим пересечение четырех оставшихся станций - Влажность: от 81 до 94%, температура от -26 до -16°С. Область пересечения графиков Братолюбовки и Большого Шантара – Влажность: от 81 до 98 %, температура от -28 до -14 °С.

Сравним области графиков Николаевска и Зеи - Влажность: от 81 до 98%, температура от -26 до -1 °С.

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 густым 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. Близость к реке, наиболее вероятно, влияет на показатели влажности воздуха вблизи метеостанции в сторону увеличения, что, в свою очередь, оказывает влияние на толщину гололеда так же в сторону увеличения.

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 западу 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. Равнинный рельеф, вероятно, может влиять на общий показатель скорости ветра, а также на показатели влажности в периоды выпадения осадков.

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

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.

Очевидно, что гололедный станок на территории метеорологической площадки станции Елабуга, находится на открытой местности, лесополоса не находится в непосредственной близости, а значит, не влияет на скорость и направление ветра, что способствует увеличению вероятности образования гололеда на гололедном станке.

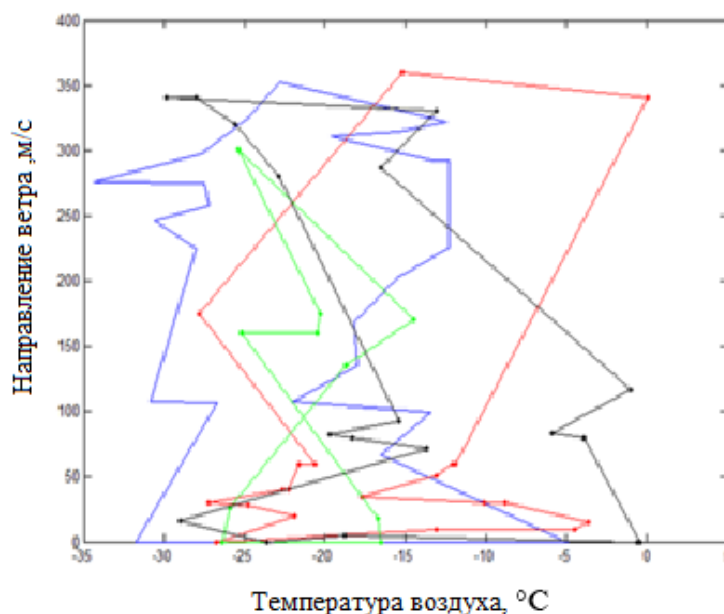


Рис.19 Зависимость направления ветра от температуры воздуха при диаметре отложения в 5 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зезя – значения направления ветра нулевые.

Анализ полученных результатов расчета (рисунок 19) показывает, что область, в которой пересекаются все графики – очень мала: Направление ветра от 0 до 75 и от 175 до 260, температура от -25 до -17 °С на первом участке и от -21 до -16°С на втором участке. Однако область графика станции Елабуга небольшая, поэтому рассмотрим пересечение трех оставшихся станций - Направление ветра: от 0 до 100 и от 175 до 320, температура от -25 до -7°С на первом участке и от -22 до -12°С на втором участке. Область пересечения графиков Братолюбовки и Большого Шантара – Направление ветра: от 0 до 320, температура от -25 до -7 °С. Сравним области графиков Николаевска и Большого Шантара - Направление ветра: от 0 до 340, температура от -25 до -4 °С.

Разница между значениями может быть обусловлена разным территориальным расположением станций. К примеру, гололедообразование на станциях Братолюбовка

и Большой Шантар происходит при достаточно низких температурах. Однако, на станции Николаевск при том же направлении ветра гололед образовывается и при более высоких температурах – до -1°C . На станции Елабуга разброс значений температуры и направления ветра значительно меньше, чем на других станциях.

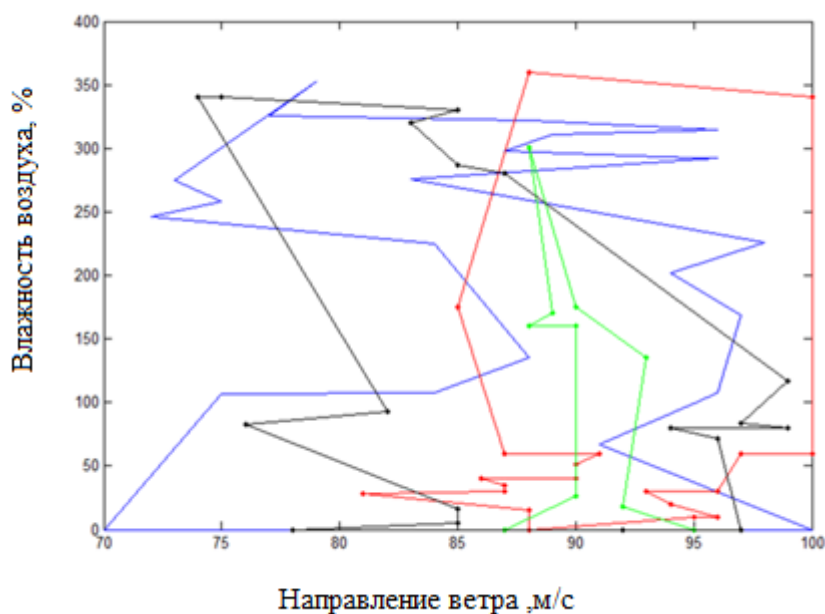


Рис.20 Зависимость относительной влажности от направления ветра при диаметре отложения в 5 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зей – значения направления ветра нулевые.

В результате анализа полученных результатов расчета (рисунок 20) можно сделать вывод, что область, в которой пересекаются все графики – достаточно мала: Влажность от 87 до 95 % на первом участке и от 90 до 92% на втором участке, направление ветра от 0 до 175 и от 200 до 270. Однако область графика станции Елабуга небольшая, поэтому целесообразно рассмотреть пересечение трех оставшихся станций - Направление ветра: от 0 до 270, влажность от 81 до 95%. В области пересечения графиков Братолюбовки и Большого Шантара влажность от 82 до 97%, а направление ветра от 0 до 330. При сравнении области графиков Николаевска и Большого Шантара, выявлено, что параметр направления ветра находится в диапазоне от 0 до 270, влажность от 84 до 99%.

Разница между значениями может быть обусловлена разным территориальным расположением станций. К примеру, гололедообразование на станциях Братолюбовка

и Николаевск, происходит на большем диапазоне влажности (от 70 до 95%), чем на станции Большой Шантар от (82 до 100%). На станции Елабуга разброс значений влажности и направления ветра значительно меньше, чем на других станциях.

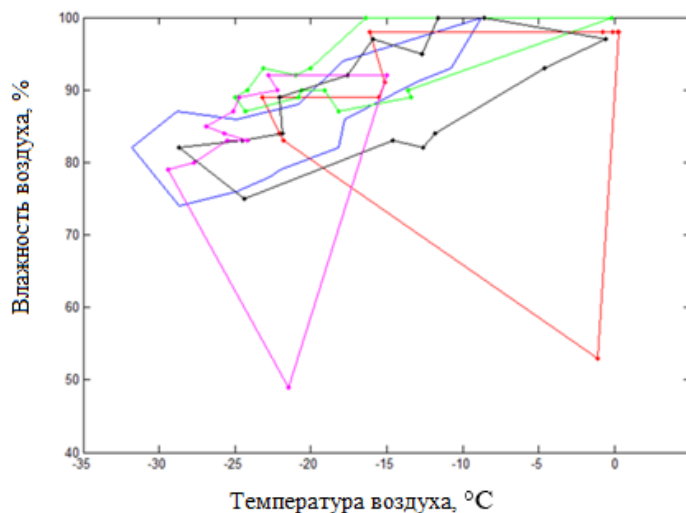


Рис. 21 Зависимость относительной влажности от температуры воздуха при диаметре отложения в 6 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зей – фиолетовым.

Как видно из графика на рисунке 21, область, в которой пересекаются все графики – достаточно мала: Влажность от 86 до 89% (разница в 3%, что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 2%), температура от -19 до -15 °C (разница в 4°C, что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 1°C). Рассмотрим пересечение станций попарно: Братолюбовка и Большой Шантар - Влажность: от 80 до 98% (разница в 18%, что больше, чем при диаметре в 5 мм., на 1%), температура от -23 до -9°C. – область достаточно большая. (разница в 14°C, как и при диаметре в 5 мм.) Область пересечения графиков Зеи и Николаевска – Влажность: от 75 до 92 % (разница в 17%, как и при диаметре в 5 мм.), температура от -27 до -15 °C. – область пересечения небольшая (разница в 12°C, что меньше, чем при диаметре в 5 мм., на 13°C). Сравним области графиков Николаевска и Елабуги - Влажность: от 90 до 100%, температура от -22 до -3 °C.

Разное территориальное расположение станций обуславливает разницу между значениями. К примеру, гололедообразование на станции Зей происходит при достаточно низких температурах в то время как на станциях Елабуга и Большой Шантар

при той же влажности гололед образовывается и при более высоких температурах – до -1°C .

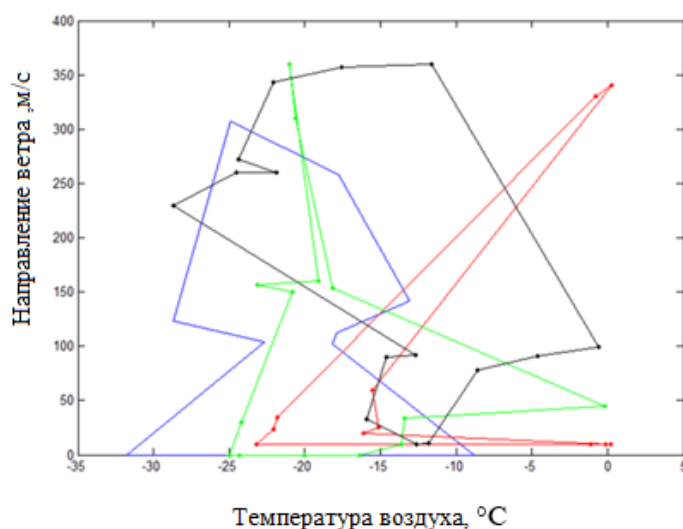


Рис.22 Зависимость направления ветра от температуры воздуха при диаметре отложения в 6 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зея – значения направления ветра нулевые.

Анализируя полученные результаты расчета (рисунок 22) можно увидеть, что область пересечения всех графиков достаточно невелика: Температура от -16 до -15°C (разница в 1°C , что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 7°C), направление ветра от 20° до 50° (разница в 30° , что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 130°). Рассмотрим пересечение станций попарно: Братолюбовка и Большой Шантар - Направление ветра: от 10° до 90° (разница в 80° , что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 240°), температура от -23 до -10°C (разница в 13°C , что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 7°C). Область пересечения графиков Елабуги и Большого Шантара – Температура от -25 до -7°C , направление ветра: от 0 до 320. Сравним области графиков Николаевска и Большого Шантара - Направление ветра: от 10° до 130° (разница в 120° , что меньше, чем при диаметре в 5 мм., на 220°), температура от -23 до $-12,5^{\circ}\text{C}$. (разница в $10,5^{\circ}\text{C}$, что меньше, чем при диаметре в 5 мм., на $10,5^{\circ}\text{C}$).

Разброс в значениях может быть обусловлен разницей в территориальном расположении станций. К примеру, на станции Братолюбовка гололедообразование происходит при достаточно низких температурах. Однако на остальных станциях при том же направлении ветра гололед образовывается и при более высоких температурах

– до 0°C . Очевидно, рабочий диапазон температуры воздуха про гололедообразование является достаточно обширным, и включает в себя практически весь диапазон минусовых температур вплоть до 0°C .

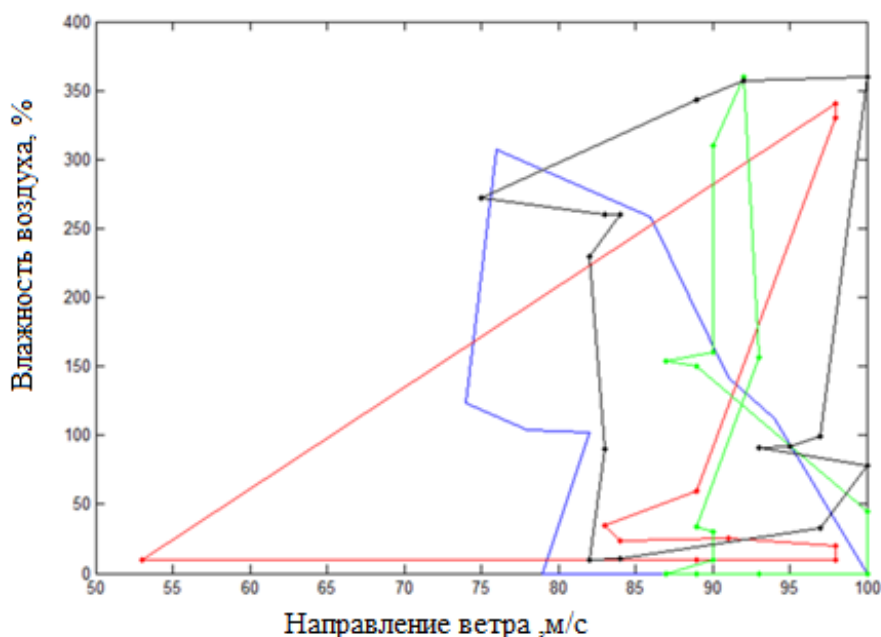


Рис. 23 Зависимость относительной влажности от направления ветра при диаметре отложения в 6 мм. График приведен для станции Братолюбовка – синим цветом, Большой Шантар – красным, Елабуга – зеленым, Николаевск – черным, Зей – значения направления ветра нулевые.

На рисунке 23 изображена зависимость относительной влажности от направления ветра при диаметре отложения в 6 мм. Анализ полученных результатов расчета показывает, что область, в которой пересекаются все графики – очень мала: Направление ветра от 60 до 160 (разница в 100° , что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 145°), влажность от 86 до 92% (разница в 6%, что меньше, чем при диаметре в 5 мм., на 4%). Рассмотрим пересечение станций попарно: Братолюбовка и Большой Шантар - Направление ветра: от 10 до 250 (разница в 240° , что меньше, чем при диаметре в 5 мм., на 30°), влажность от 79 до 92%. (разница в 13%, что меньше, чем при диаметре в 5 мм. на 15°C).

Сравним области графиков Николаевска и Большого Шантара: Направление ветра: от 10 до 350 (разница в 340° , что больше, чем при диаметре в 5 мм., на 70°), влажность от 82 до 97%. (разница в 15%, как и при диаметре в 5 мм).

Область пересечения графиков Елабуги и Николаевска – Направление ветра: от 25 до 350, влажность от 86 до 97%.

Разное территориальное расположение станций, вероятно, является причиной разницы между значениями. К примеру, гололедообразование на станции Большой Шантар происходит на большем диапазоне влажности (от 53 до 98%), чем на станции Елабуга (всего лишь от 87 до 100%). На станции Елабуга разброс значений влажности значительно меньше, чем на других станциях. Очевидно, в данном случае, близость к реке значительно влияет на гололедообразование, так как гололед образуется даже при низких значениях относительной влажности.

На основании проведенного анализа можно констатировать:

- 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 силу того, что при формировании общей области будут явно участвовать наиболее весомые параметры, влияющие на процесс гололедообразования.

3. Синтез системы прогнозирования гололедообразования ЛЭП и разработка модели системы прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП

3.1 Синтез системы прогнозирования гололедообразования ЛЭП

Проблематика создания математического описания прогнозирующей модели гололедообразования достаточно подробно освещена в [1]. Там показано, что установить однозначную аналитическую зависимость между выходной величиной гололеда (массой, диаметром обледенения) и хотя бы одним параметром, оказывающим влияние на процесс обледенения (температура воздуха, скорость ветра и направление, относительная влажность, парциальное давление, дефицит насыщения, атмосферное давление) практически не возможно.

Поскольку каждый из связанных параметров нелинейно и неоднозначно влияет на процесс обледенения, необходимо использовать нетрадиционные подходы для разработки модели процесса гололёдообразования. Одной из возможных альтернатив может быть подход, основанный на интеллектуальных вычислительных методах, например, на основе использования нечеткой идентификации [2-6].

Однако реализация нечеткого идентификатора создает проблему, связанную с определением локализации функций принадлежности входных и выходных переменных [7-10]. Необходимая экспертная оценка влияния конкретных параметров на выходное значение обледенения может быть получена путем обработки больших объемов данных, собранных с метеостанций, которые постоянно отслеживают процесс обледенения. Большой объем статистических данных можно обрабатывать с помощью различных вычислительных алгоритмов. Для снижения вычислительных затрат при определении диапазона распределения функций принадлежности нечеткого идентификатора был использован муравьиный алгоритм, с помощью которого был сделан анализ и обработка статистических данных [11].

В силу того, что с помощью нечеткого идентификатора была установлена нечеткая зависимость между основными факторами, влияющими на гололёдообразование и диаметром гололеда, то в первом предположении попытаемся пренебречь взаимовлиянием параметров друг на друга и рассматривать систему в качестве линейной, где будет действовать принцип суперпозиции. В этом случае структуру можно представить в таком виде, как на рисунке 24.

Имея в наличии зависимость влияния каждого из параметров обледенения на выходное значение обледенения представленную в нечетком виде общую структуру нечеткого прогнозирующего устройства (НПУ) процесса обледенения можно представить в виде суммирующего устройства (при условии отсутствия взаимного влияния параметров друг на друга) имеющего n – входов. При этом каждому конкретному параметру должен быть назначен свой собственный весовой коэффициент в процессе идентификации. Диапазон для каждого конкретного параметра процесса обледенения следует принимать как диапазон изменения общей площади пересечения для нечеткого множества этого параметра для всех метеостанций.

На рис. 24 приведен вариант схемной реализации нечеткого 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. Выходной блок каждого идентификатора использует алгоритм Сугено, так как данный алгоритм позволяет обеспечить большее приближение к статистическим данным, жёстко фиксируя выходной параметр как статичную величину.

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.

В [1] приведены области пересечения графиков зависимости влажности воздуха от температуры воздуха при диаметрах отложения соответствующих выше приведенным термам выходной переменной ($d_1 - d_5 = 5-9$ мм) для каждой из пяти метеостанций: Братолюбовка, Большой Шантар, Елабуга, Николаевск, Зоя. На основе этих областей пересечения выполнено распределение нечетких термов входных переменных Fuzzy logic controller.

Область пересечения графиков зависимости направления ветра от температуры воздуха при диаметрах отложения, равных 5-9 мм для тех же пяти метеостанций влияет на распределение нечетких термов Fuzzy logic controller 1.

А распределение нечетких термов Fuzzy logic controller 2 выполнено на базе областей пересечения графиков зависимости направления ветра от влажности воздуха при диаметрах отложения, равных 5-9 мм для тех же пяти метеостанций.

Примем допущение, что если расхождение между смоделированным значением выходной переменной и статистическими данными не будет выходить за диапазон в 10%, то будем считать, что модель работоспособна, отклонение приемлемо для того, чтобы уложиться в инженерную точность.

Для проверки работы НПУ случайным образом выберем по одному зафиксированному случаю гололедообразования для каждой метеостанции. Подадим на входы модели статистические данные и оценим процент отклонения выходной величины от реальных данных.

Как видно из таблицы 4, среднее значение отклонения выходного параметра модели от статистических данных – 19,2%. Данная точность неприемлема для корректной работы модели, в связи с чем можно сделать вывод о том, что учтены не все основные параметры, оказывающие влияние на процесс гололедообразования.

Таблица 4

Параметры, влияющие на гололёдообразование для каждой из метеостанций

Метеостанция	t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	D_m	K_v
Братолюбовка	-18,20	1	169	97	5	5	4,1	-18
Большой Шантар	-20,6	3	60	100	5	6	3,8	-24
Елабуга	-16,7	1	18	92	5	5	3,5	-30
Николаевск	-19,7	3	83	76	5	3	4,3	-14
Зея	-25,3	0	0	89	5	7	4,5	-10
Среднее значение	-20,1	1,6	66	90,8	5	5,2	4,04	-19,2

Для увеличения точности отработки НПУ введем в структуру устройства дополнительно нечеткий идентификатор по параметру «скорость нарастания гололёда».

Распределение нечетких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» выполнено с помощью анализа статистических данных, аналогичного анализу, проведённому для других входных переменных, то есть с помощью муравьиного алгоритма.

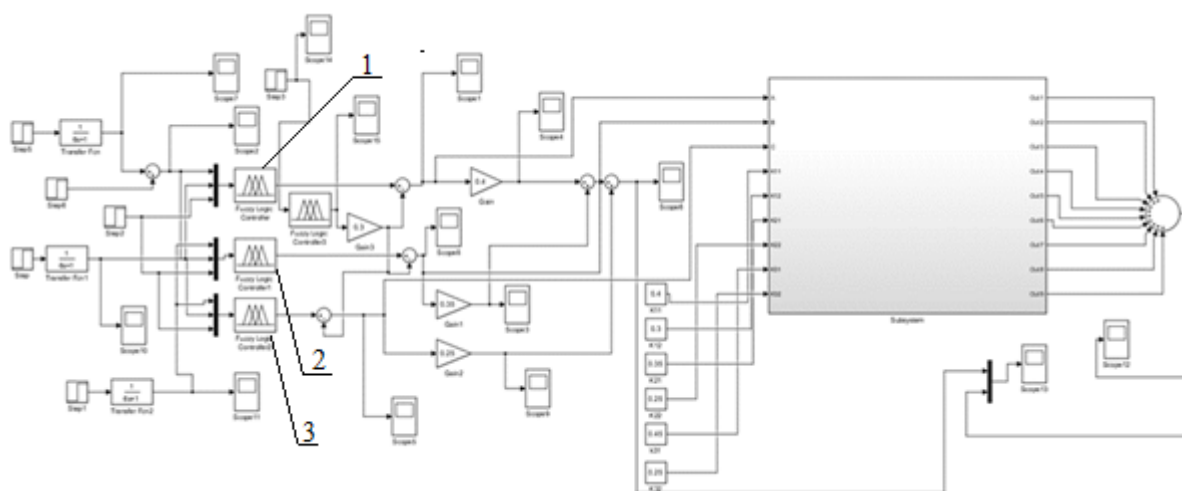


Рис. 24 – Модель гололедообразования.

На рисунке 25 приведено распределение нечетких термов входной переменной «Влажность» контроллера Fuzzy logic controller. На рисунке 26 приведено распределение нечетких термов входной переменной «Температура» контроллера Fuzzy logic controller. На рисунке 27 приведено распределение нечетких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» контроллера Fuzzy logic controller. На рисунке 28 приведена база правил нечёткого контроллера Fuzzy logic controller. Вышеупомянутые распределения нечётких термов, а также нечёткая база правил выполнены на основании анализа статистической базы с использованием муравьиного алгоритма.

Аналогично рисункам 25-28, на рисунках 29-32 изображено распределение термов входных переменных контроллера Fuzzy logic controller1, а на рисунках 33-35 – распределение термов входных переменных контроллера Fuzzy logic controller2, на рисунке 9 приведена база правил нечёткого контроллера Fuzzy logic controller1, на рисунке 36 приведена база правил нечёткого контроллера Fuzzy logic controller2.

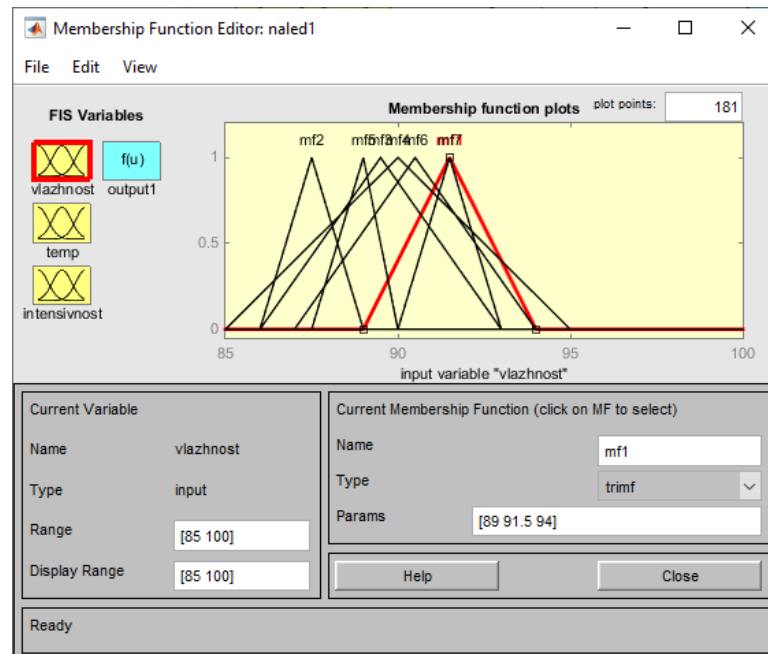


Рис.25 – Распределение нечётких термов входной переменной «Влажность» контроллера «Fuzzy logic controller».

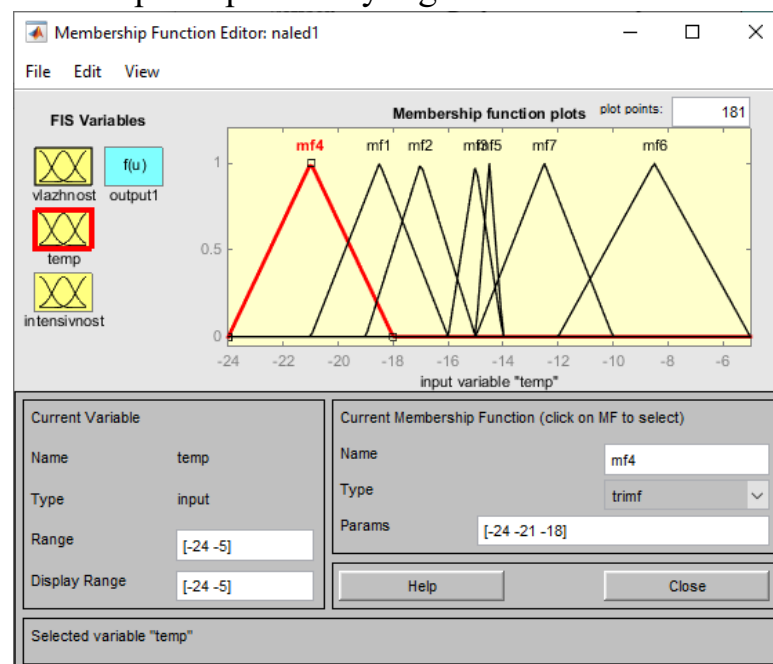


Рис. 26 – Распределение нечётких термов входной переменной «Температура» контроллера «Fuzzy logic controller».

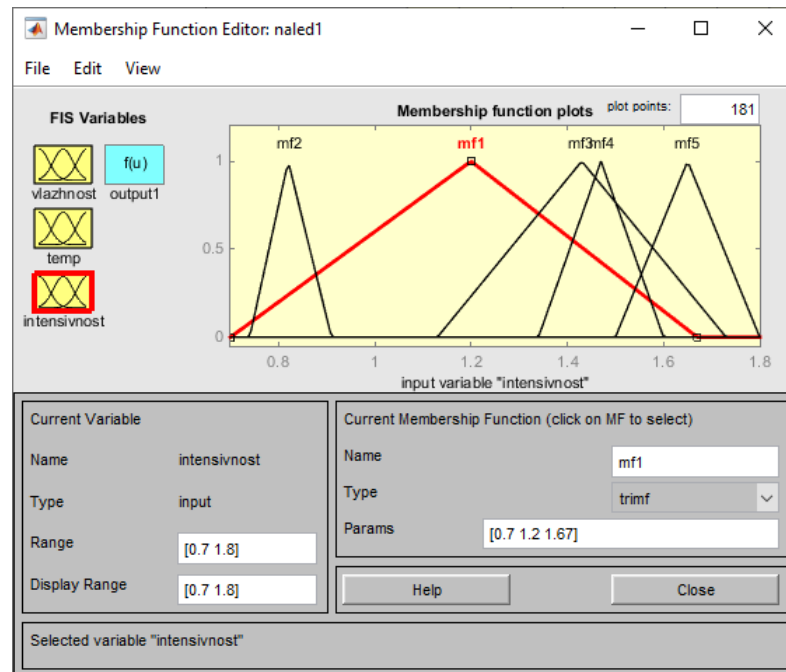


Рис. 27 – Распределение нечётких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» контроллера «Fuzzy logic controller».

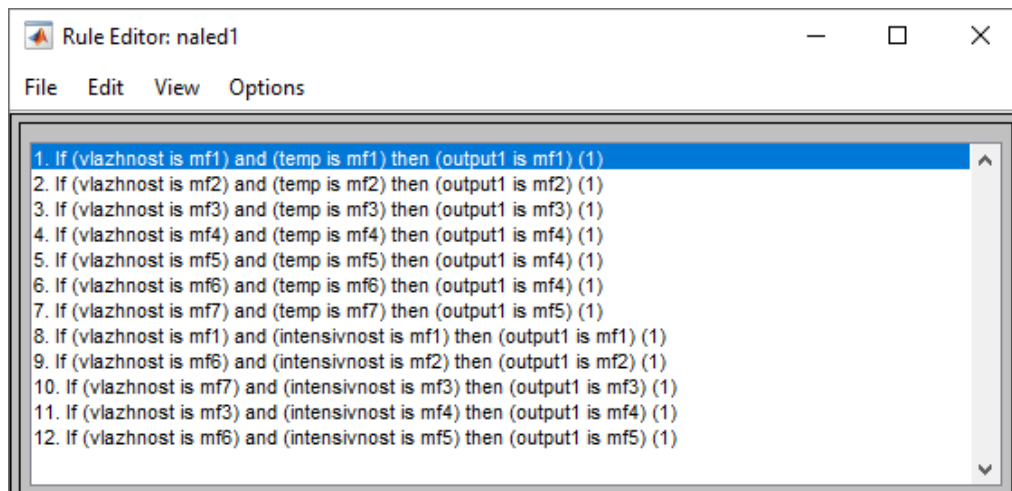


Рис. 28 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller».

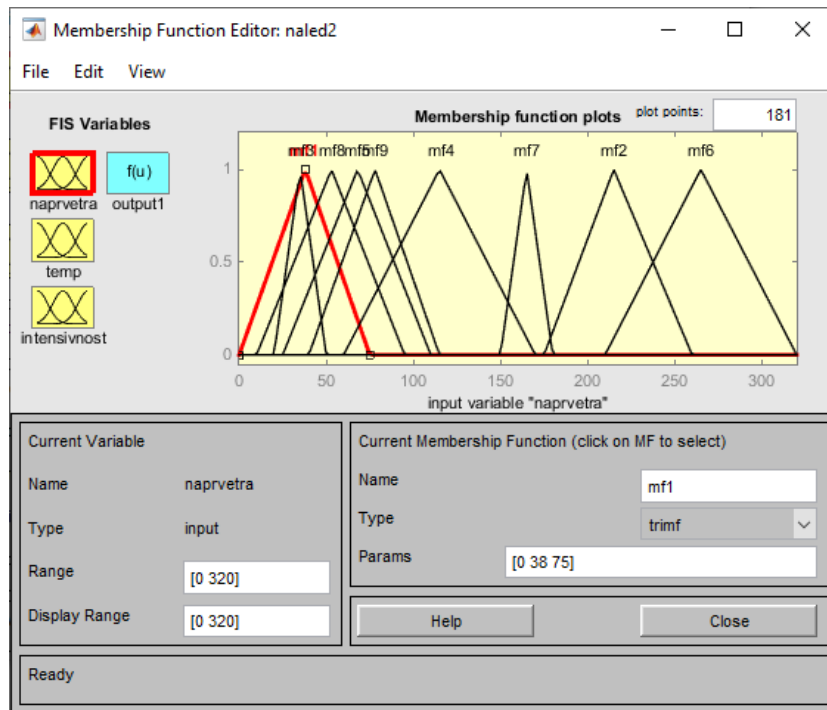


Рис. 29 – Распределение нечётких термов входной переменной «Направление ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller1».

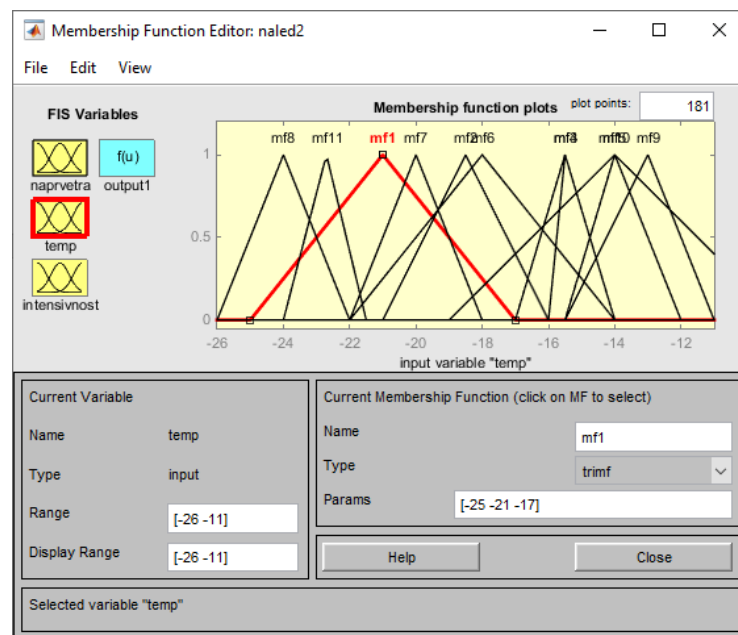


Рис. 30– Распределение нечётких термов входной переменной «Температура» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller1».

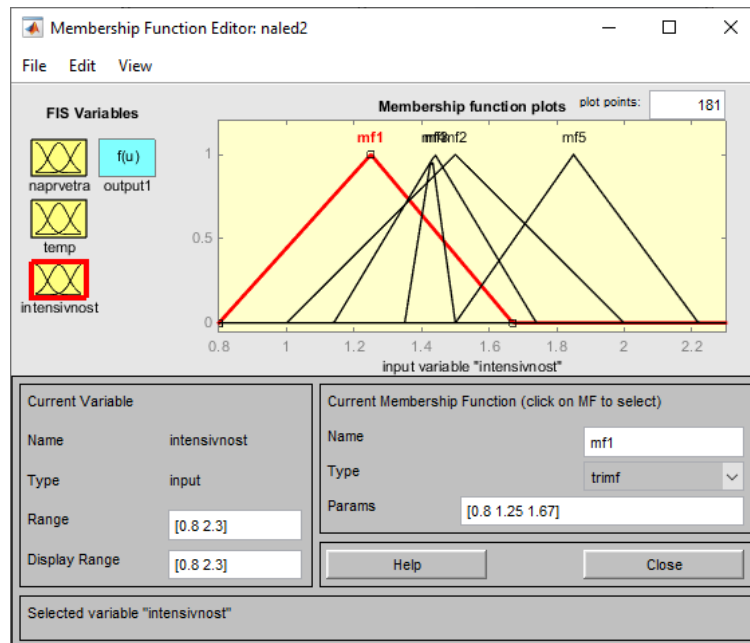


Рис. 31 – Распределение нечётких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller1».

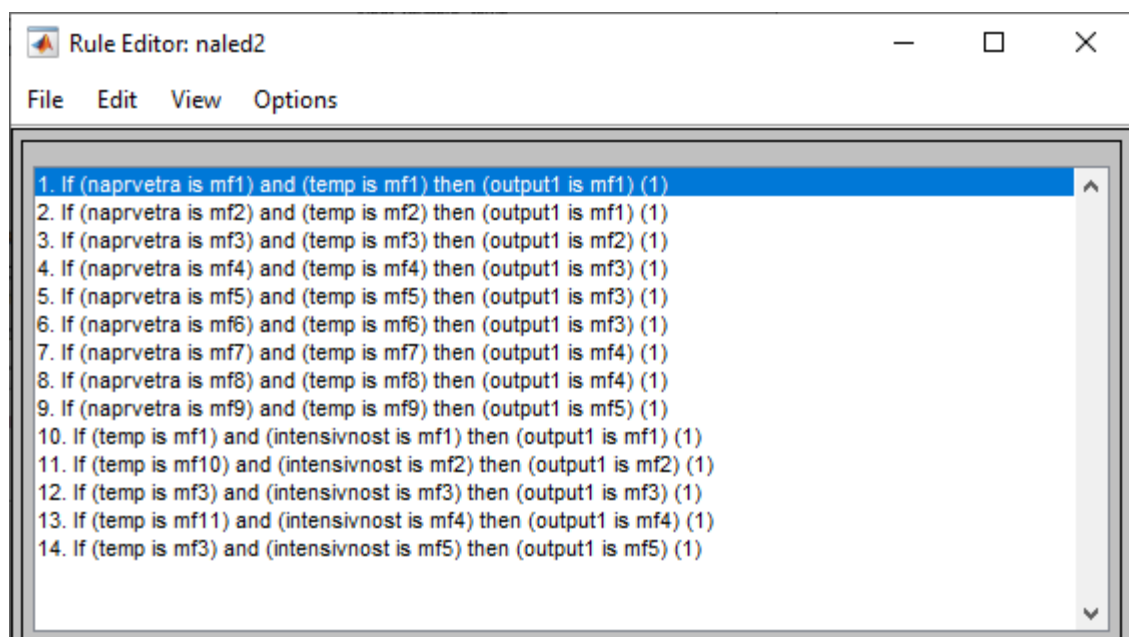


Рис. 32 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller1».

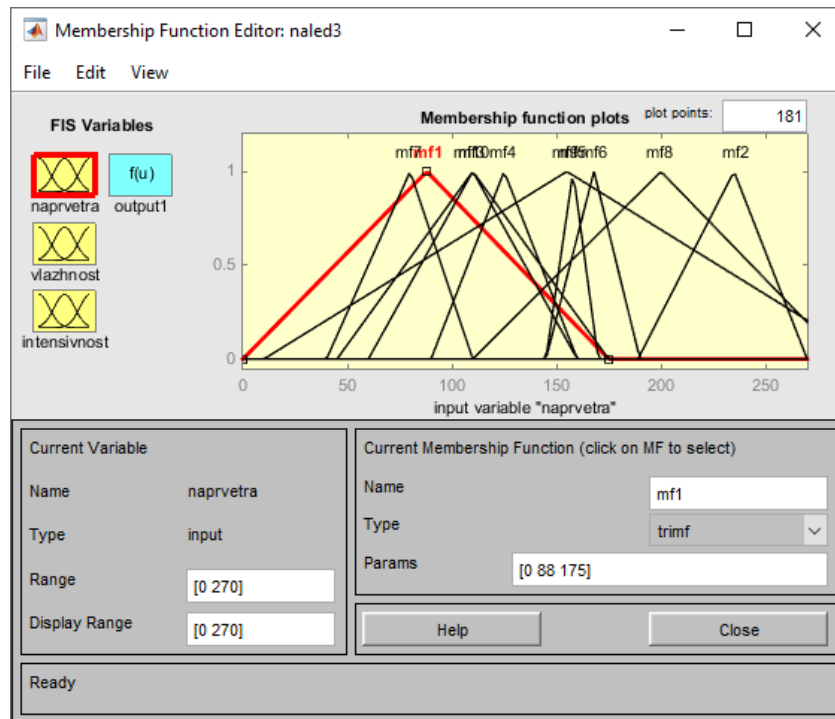


Рис. 33 – Распределение нечётких термов входной переменной «Направление ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller2».

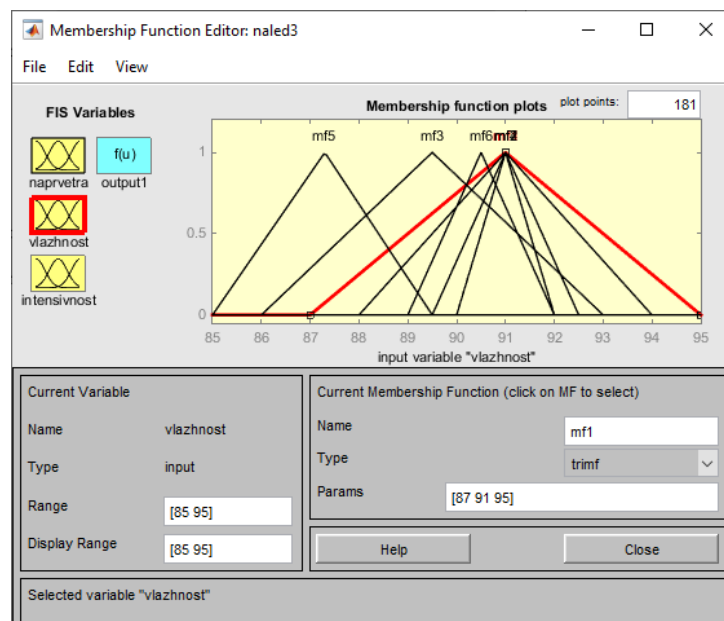


Рис. 34 – Распределение нечётких термов входной переменной «Влажность» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller2».

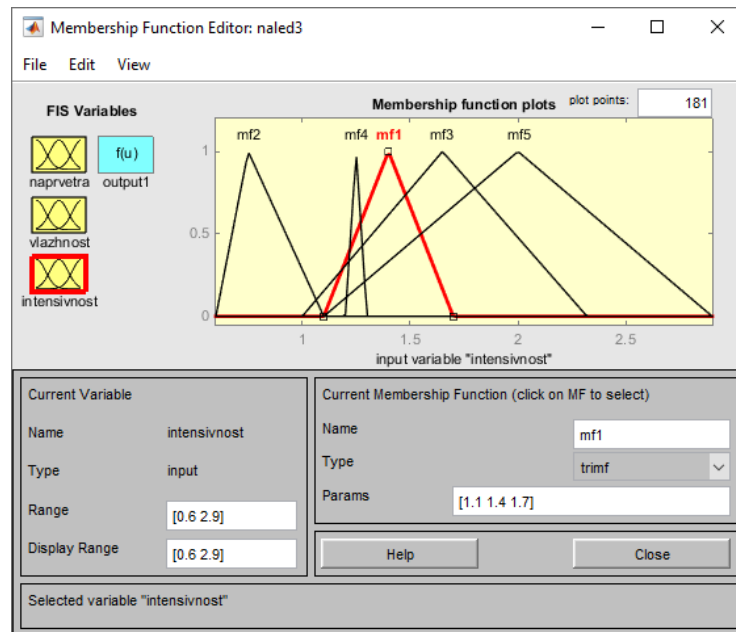


Рис. 35 – Распределение нечётких термов входной переменной «Скорость нарастания гололёда» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller2».

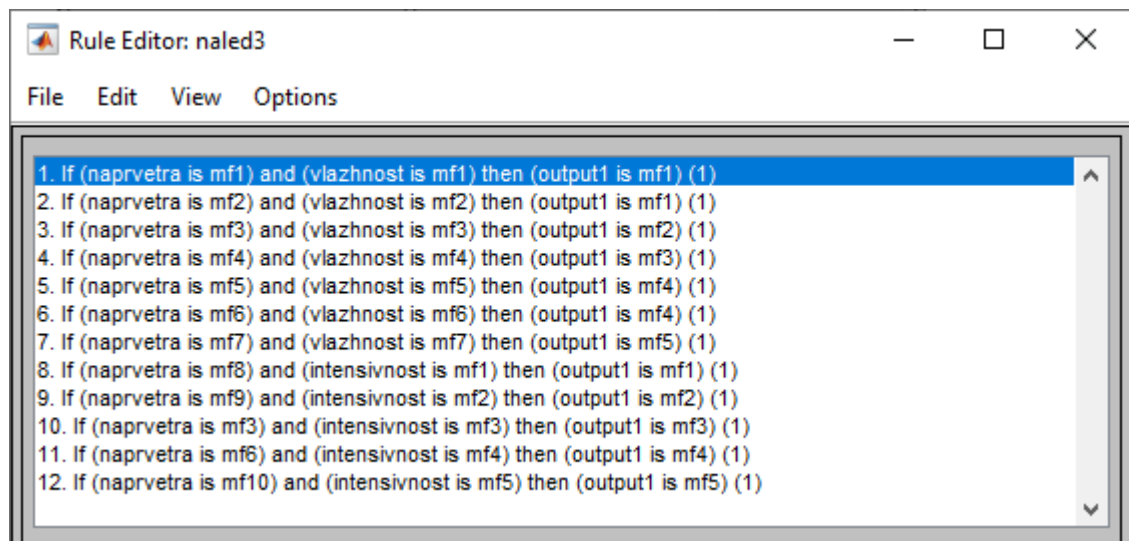


Рис. 36 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller2» .

Выходы со всех трех нечетких идентификаторов параметров суммируются, при этом составляющая каждого параметра принимающего участие в процессе идентификации корректируется в блоке Subsystem, обеспечивая наделение ему собственного весового коэффициента. На рис. 37 приведено схемная реализация данного блока.

Блок If, If1 и If2 являются блоками цикла сравнения входных параметров, на вход блока If подаётся выходная переменная с нечёткого контроллера Fuzzy logic controller,

на вход If1 подаётся выходная переменная с нечёткого контроллера Fuzzy logic controller1, на вход If2 подаётся выходная переменная с нечёткого контроллера Fuzzy logic controller2. В этих блоках происходит сравнение переменных с фиксированным значением x . Если выход с контроллера Fuzzy logic controller $\geq x$, то к нему применяется коэффициент K11, иначе применяется коэффициент K12. Если выход с контроллера Fuzzy logic controller1 $\geq x$, то применяется коэффициент K21; иначе применяется коэффициент K22. Если выход с контроллера Fuzzy logic controller2 $\geq x$, то применяется коэффициент K31; иначе применяется коэффициент K32. Если сумма коэффициентов не равна 1, то все коэффициенты принимаются равными 0,33. Затем все выходы складываются (хотя работают каждый раз только 3 выхода, остальные выводят на выход 0).

Численные значения коэффициентов K определены с помощью метода перебора с привязкой к анализу статистических данных.

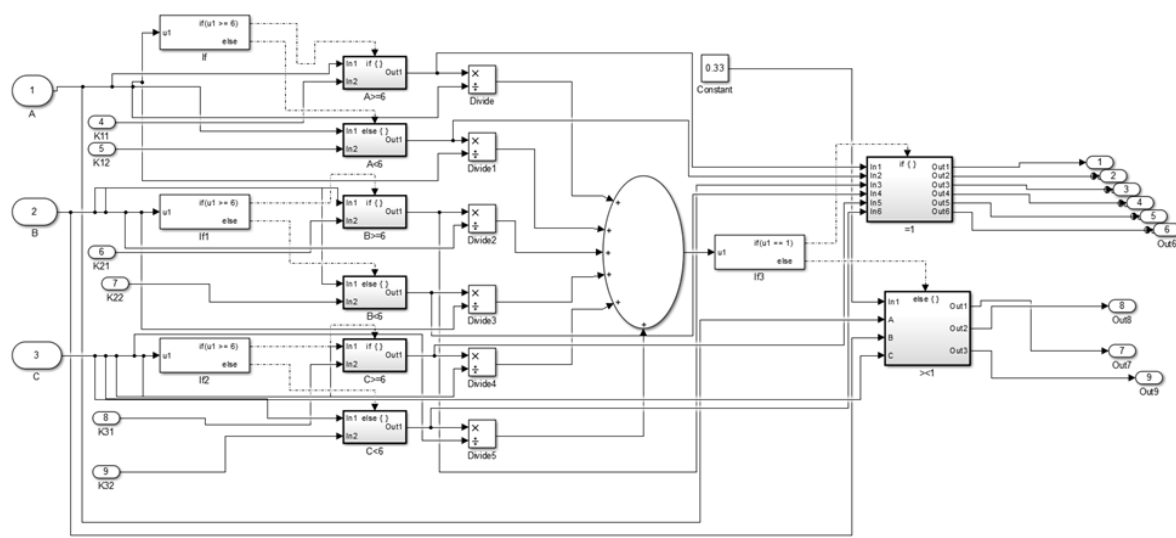


Рис. 37 – Блок Subsystem.

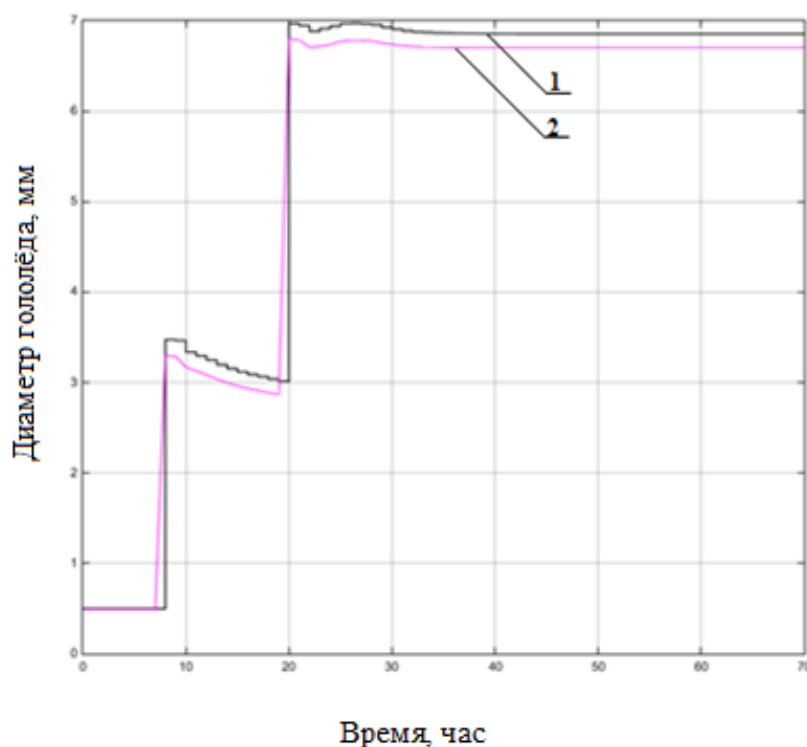


Рис. 38 - График выхода с фиксированными коэффициентами и с коэффициентами, обработанными блоком Subsystem.

В результате синтеза вышеописанной структуры прогнозирования была проведена оценка адекватности её функционирования. На рис. 38 приведены графики изменения выходного параметра – диаметра гололёда для двух различных вариантов настройки весовых коэффициентов нечетких контроллеров. Кривая 1 соответствует фиксированным значениям весовых коэффициентов. Кривая 2 – настраиваемым коэффициентам.

Как видно из графиков на рисунке 38, введение блока переменных коэффициентов по каждому параметру обеспечивает достижение более адекватного результата, выходная величина НПУ не превышает 10% отклонения от среденестатистической на практически всем диапазоне изменения входных параметров. не чем постоянные, приблизительно на 10%.

Выходная величина с контроллера «Fuzzy logic controller3» формирует возмущающее воздействие ко всем трём контроллерам. Входная переменная этого контроллера – скорость ветра, выходная переменная – диаметр гололёда - состоит из шести термов, mf1=5 мм, mf2=6 мм, mf3=7 мм, mf4=8 мм, mf5=9 мм, mf6=2 мм, база правил представлена на рисунке 40.

Распределение нечётких термов входной переменной строится на анализе статистических данных с помощью муравьиного алгоритма аналогично распределению, приведенному выше.

Для оценки реакции системы на дополнительные (возмущающие) факторы было проведено моделирование системы с введением параметра «Скорость ветра». На рисунке 39 приведено распределение функций принадлежности входной переменной данного параметра, а на рисунке 40 приведена база правил нечёткого контроллера.

Реакция системы на данное возмущение при различных значениях весового коэффициента на данное возмущение показана на рисунке 41.

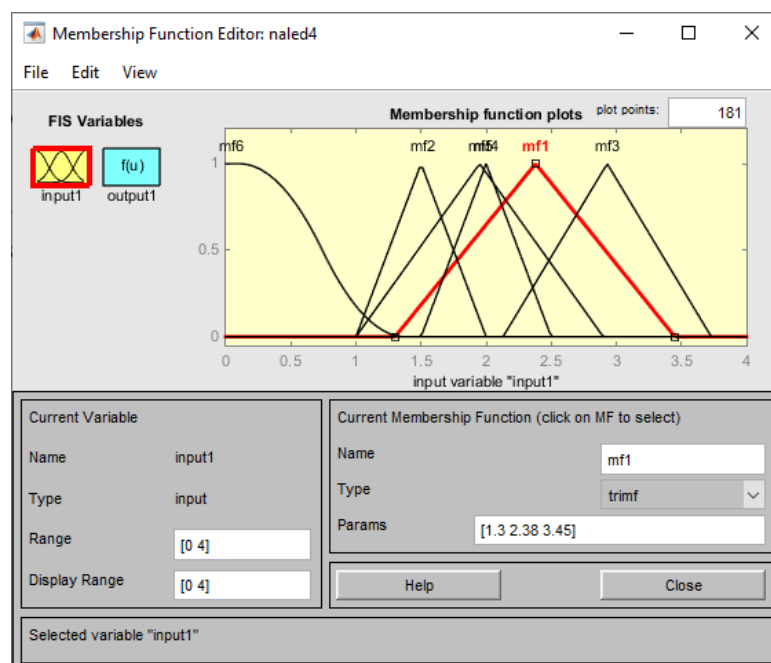


Рис. 39 – Распределение нечётких термов входной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера, введённого как возмущающее воздействие.

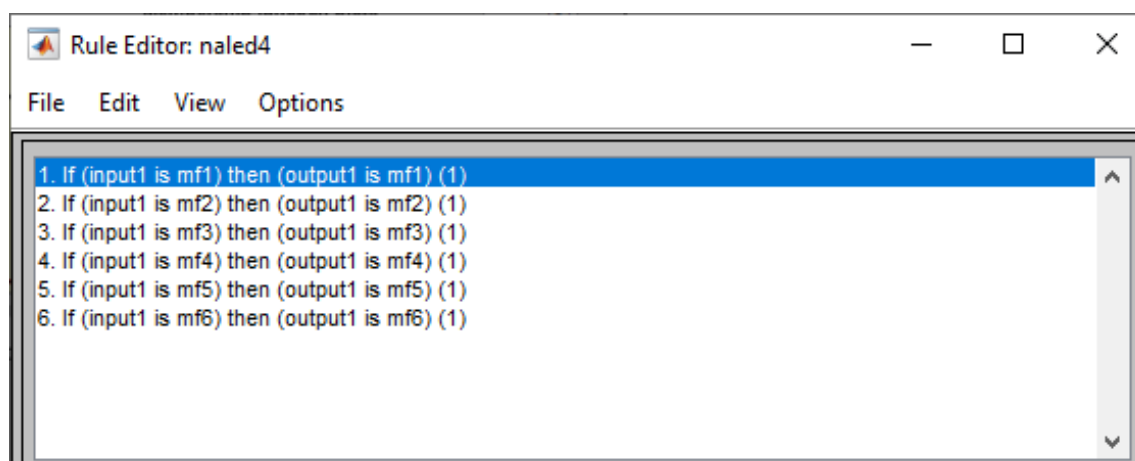


Рис. 40 – База правил нечеткого контроллера, введённого как возмущающее воздействие.

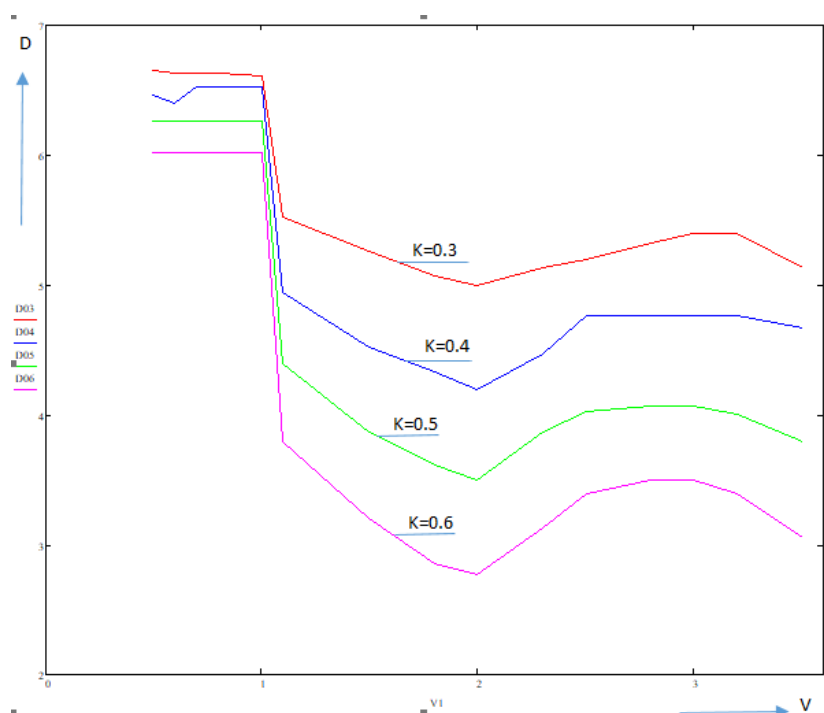


Рис. 41 – Зависимость выходной переменной от скорости ветра (возмущающее воздействие) при весовых коэффициентах, равных 0,3; 0,4; 0,5 и 0,6.

Для верного выбора весового коэффициента на возмущающее воздействие случайным образом выберем один зафиксированный случай гололедообразования для каждой метеостанции. Подадим на входы модели статистические данные и оценим процент отклонения выходной величины от реальных данных при различных весовых коэффициентах на возмущающее воздействие.

Таблица 5

Влияние весового коэффициента на возмущающее воздействие на выходную переменную

Метеостанция	K_V	t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	$Pr1$	v_{sn}	D_m	$\Delta\%$
Братоловковка	0,2	-22,0	1	108	96	5	3	1,67	4,8	-4,0
Братоловковка	0,3	-22,0	1	108	96	5	3	1,67	5,0	0,0
Братоловковка	0,4	-22,0	1	108	96	5	3	1,67	5,2	4,0
Братоловковка	0,5	-22,0	1	108	96	5	3	1,67	5,4	8,0

Братолюбовка	0,6	-22,0	1	108	96	5	3	1,67	5,6	12,0
Большой Шантар	0,2	-27,8	2	175	85	5	4	1,25	4,2	-
Большой Шантар	0,3	-27,8	2	175	85	5	4	1,25	4,9	-2,0
Большой Шантар	0,4	-27,8	2	175	85	5	4	1,25	5,6	12,0
Большой Шантар	0,5	-27,8	2	175	85	5	4	1,25	6,2	24,0
Большой Шантар	0,6	-27,8	2	175	85	5	4	1,25	7,0	40,0
Елабуга	0,2	-13,4	2	34	89	6	9	0,67	5,7	-5,0
Елабуга	0,3	-13,4	2	34	89	6	9	0,67	6,2	3,3
Елабуга	0,4	-13,4	2	34	89	6	9	0,67	7,0	16,7
Елабуга	0,5	-13,4	2	34	89	6	9	0,67	7,7	28,3
Елабуга	0,6	-13,4	2	34	89	6	9	0,67	8,5	41,7
Никола-евск	0,2	-22,1	1	343	89	5	6	1,00	4,7	-6,0
Никола-евск	0,3	-22,1	1	343	89	5	6	1,00	5,1	2,0
Никола-евск	0,4	-22,1	1	343	89	5	6	1,00	5,5	10,0
Никола-евск	0,5	-22,1	1	343	89	5	6	1,00	5,7	14,0
Никола-евск	0,6	-22,1	1	343	89	5	6	1,00	5,8	16,0
Зея	0,2	-21,3	1	192	71	5	12	0,42	4,4	-
Зея	0,3	-21,3	1	192	71	5	12	0,42	4,8	-4,0
Зея	0,4	-21,3	1	192	71	5	12	0,42	5,4	8,0
Зея	0,5	-21,3	1	192	71	5	12	0,42	5,8	16,0
Зея	0,6	-21,3	1	192	71	5	12	0,42	6,3	26,0

Как видно из таблицы 5, результаты моделирования при весовом коэффициенте на возмущающее воздействие, равным 0,3 имеют лучший результат. Средний процент отклонения смоделированного диаметра отложения от статистического составляет 2,3 %.

Выводы по главе

Таким образом, в работе рассмотрен один из возможных вариантов построения системы прогнозирования на основе нечёткого подхода. 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 %. Следующим этапом работы будет апробация и исследование системы нечеткой идентификации в различных условиях.

3.2 Разработка модели системы прогнозирования гололёдообразования

Анализ материала, изложенного в предыдущей главе, показывает, что реализация системы прогнозирования с использованием базовых параметров не позволяет добиться полного соответствия между прогнозируемой величиной, снимаемой с модели и реальными значениями с метеостанций. Это подтверждает тот фактор, что на формирование массы гололеда оказывают влияние не только базовые параметры, на которые опирались при разработке имитационной модели, представленной в предыдущем разделе, но и второстепенные. Дальнейшее уточнение разрабатываемой модели будем проводить последовательно вводя в структуру модели дополнительные элементы. При этом введение каждого дополнительного элемента будем оценивать в рамках его влияния на физический процесс ледообразования.

На текущем этапе не учтены в модели прогнозирования гололёдообразования такие параметры, как атмосферное давление на уровне станции, дефицит насыщения, облачность (все виды), погода в срок наблюдения (наличие или отсутствие осадков), геофизические параметры местности.

Поэтому в качестве учёта дополнительных параметров введем нечёткий идентификатор, в качестве входных параметров которого на первом этапе рассмотрим атмосферное давление на уровне станции и дефицит насыщения. Построение данного идентификатора будем осуществлять по ранее изложенному принципу. Настройка контроллера показана на рисунках 43-45. Диапазон изменения дефицита насыщения – от 0 до 0,8 гПа, однако наибольшая кучность функций принадлежности (3 из 4) находится в диапазоне от 0 до 0,5 гПа. Диапазон изменения Атмосферного давления на уровне станции от 975 до 1029 мм.рт. Все 4 функции принадлежности находятся внутри этого диапазона.

Выходные переменные нечёткого идентификатора приравнены к диаметру гололеда из статистической базы, состоят из четырёх термов и равны $mf1=5$ мм, $mf2=6$ мм, $mf3=7$ мм, $mf4=8$ мм.

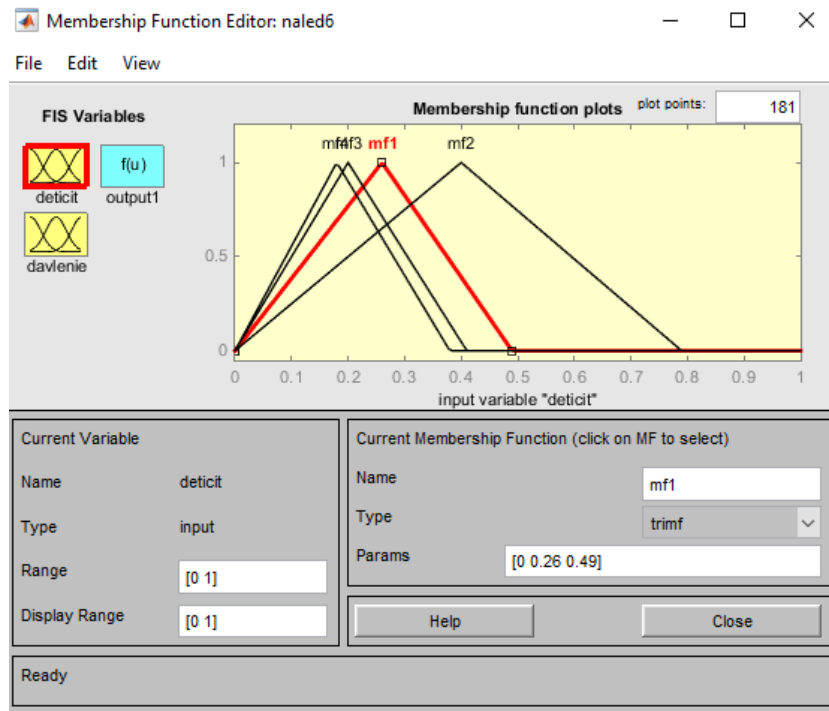


Рис. 43 – Распределение нечётких термов входной переменной «Дефицит насыщения» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller5».

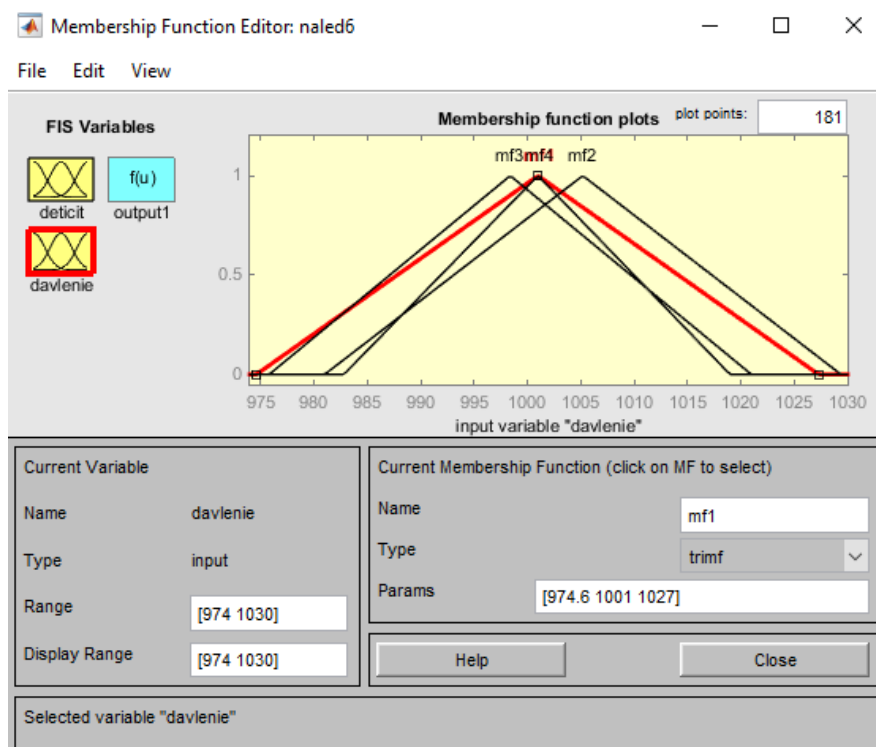


Рис. 44 – Распределение нечётких термов входной переменной «Атмосферное давление на уровне станции» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller5».

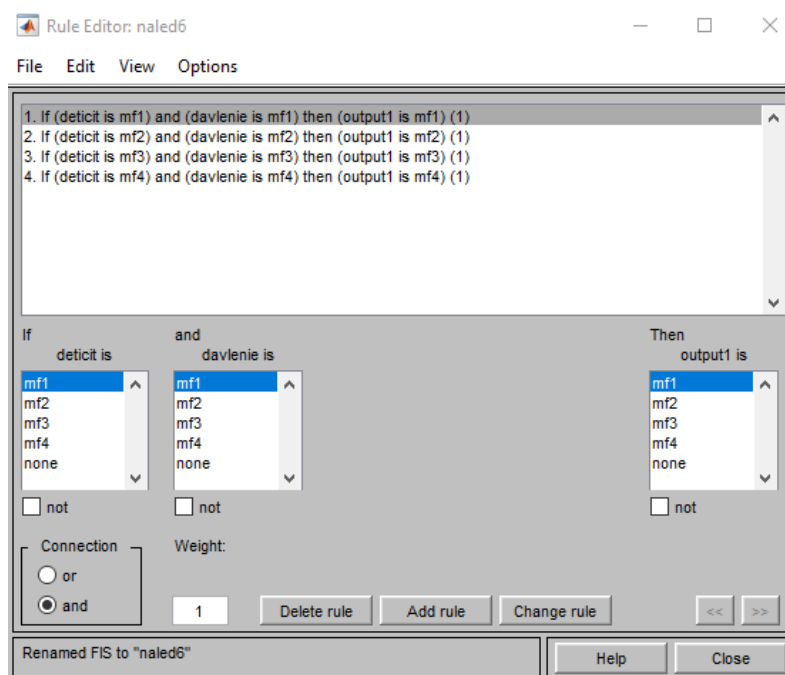


Рис. 45 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller5».

Распределение нечётких термов входной переменной строится на анализе статистических данных с помощью муравьиного алгоритма аналогично распределению, приведенному выше.

В силу того, что указанные выше параметры являются второстепенными, то в общей системе учёт данных параметров будем реализовывать в виде блока возмущения, сигнал которого поступает в общий блок прогнозирования.

Как и все предыдущие блоки системы прогнозирования, данный блок должен иметь свой весовой коэффициент.

Для верного выбора весового коэффициента на возмущающее воздействие случайным образом выберем один зафиксированный случай гололедообразования для каждой метеостанции. Подадим на входы модели статистические данные и посчитаем процент отклонения выходной величины от реальных данных при различных весовых коэффициентах на возмущающее воздействие.

Таблица 6

Влияние весового коэффициента на возмущающее воздействие на выходную переменную

Метеостанция	K _v	t _{nach}	v _{nach}	N _{nach}	H	D	Pr1	v _{sn}	D _n	P _s	D _m	Δ%
Братоловская	0,05	-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	4,7	-6
Братоловская	0,1	-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	4,95	-1
Братоловская	0,15	-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,2	4
Братоловская	0,2	-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,6	12
Братоловская	0,25	-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,95	19
Большой Шантар	0,05	-20,60	3	60	10 0	5	6	0,83	0	1016,4	4,5	-10
Большой Шантар	0,1	-20,60	3	60	10 0	5	6	0,83	0	1016,4	5,2	4
Большой Шантар	0,15	-20,60	3	60	10 0	5	6	0,83	0	1016,4	5,5	10
Большой Шантар	0,2	-20,60	3	60	10 0	5	6	0,83	0	1016,4	5,8	16
Большой Шантар	0,25	-20,60	3	60	10 0	5	6	0,83	0	1016,4	6,10	22
Елабуга	0,05	-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	4,50	-10
Елабуга	0,1	-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	4,90	-2
Елабуга	0,15	-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	5,40	8
Елабуга	0,2	-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	5,90	18
Елабуга	0,25	-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	6,40	28
Николаевск	0,05	-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	4,20	-16
Николаевск	0,1	-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	4,90	-2
Николаевск	0,15	-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	5,40	8
Николаевск	0,2	-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	6,00	20
Николаевск	0,25	-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	6,50	30
Зея	0,05	-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	4,80	-4
Зея	0,1	-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	5,10	2
Зея	0,15	-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	5,30	6
Зея	0,2	-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	5,50	10
Зея	0,25	-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	5,80	16

Как видно из таблицы 6, результаты моделирования при весовом коэффициенте на возмущающее воздействие, равным 0,1 имеют лучший результат. Процент отклонения смоделированного диаметра отложения от статистического составляет 2,2%

Проведем моделирование системы для оценки влияния дополнительных параметров (атмосферное давление на уровне станции, дефицит насыщения) на конечный результат. В таблице 7 приведены статистические значения метеостанции Братолюбовка, а также результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке в модель на входы статистических данных. Среднее отклонение смоделированной величины от статистической – 8,28%. Это полная система с учетом доппараметра

Таблица 7

Результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Братолюбовка.

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-27,50	1	275	73	5	5	1,00	0,18	993,6	4,3	14,0
-22,80	1	352	79	5	5	1,00	0,21	988,4	6	20,0
-27,20	2	258	75	5	6	0,83	0,17	989	4,3	14,0
-24,70	1	326	77	5	6	0,83	0,19	999,5	4,3	14,0
-26,70	1	107	75	5	3	1,67	0,17	995,3	4,9	2,0
-19,6	0	0	99	5	3	1,67	0	993,4	4,3	14,0
-22,0	1	108	96	5	3	1,67	0,05	988,2	5,4	8,0
-14,0	0	0	70	5	14	0,36	0,91	988,6	4,5	10,0
-30,6	1	246	72	5	6	0,83	0,14	992	4,3	14,0
-18,2	1	169	97	5	5	1,00	0,07	974,6	4,1	18,0
-12,4	1	322	88	5	5	1,00	0,24	983,4	4,5	10,0
-12,3	2	226	98	5	2	2,50	0	986,1	4,5	10,0
-27,6	1	298	87	5	6	0,83	0,1	994,4	4,3	14,0
-13,4	4	99	95	5	8	0,63	0,08	992,8	6	20,0
-34,4	1	276	83	5	5	1,00	0,05	991,4	4,3	14,0
-31,8	0	0	81	5	6	0,83	0,09	1002,3	5,5	10,0
-28,0	1	225	84	5	5	1,00	0,09	990,8	4,3	14,0
-15,4	1	315	96	5	3	1,67	0,09	991,9	4,8	4,0
-18,0	1	135	88	5	5	1,00	0,2	975,2	5,6	12,0
-19,6	1	311	89	5	4	1,25	0,13	993,3	5,5	10,0
-30,9	2	108	84	5	4	1,25	0,07	987,7	5	0,0
-13,3	1	292	95	5	5	1,00	0,11	992,3	4,3	14,0
-16,5	1	67	91	5	6	0,83	0,17	985,2	5,4	8,0
-15,5	1	202	94	5	3	1,67	0,09	987,2	5	0,0
-12,3	3	292	96	5	6	0,83	0,12	977,3	4,3	14,0
-4,9	0	0	100	5	9	0,56	0	988,7	5,5	10,0
-22,7	2	104	78	6	5	1,20	0,22	985,6	6,2	3,3
-22,0	0	0	79	6	8	0,75	0,22	990,1	6	0,0
-24,9	1	307	76	6	5	1,20	0,2	989,2	6	0,0

-18,2	1	102	82	6	5	1,20	0,25	992	6,4	6,7
-28,7	2	123	74	6	8	0,75	0,15	993,6	5,3	11,7
-17,8	1	258	86	6	5	1,20	0,21	989,5	6	0,0
-24,9	0	0	86	6	3	2,00	0,12	1000,8	5	16,7
-31,8	0	0	82	6	5	1,20	0,09	981,2	5,9	1,7
-8,8	0	0	100	6	3	2,00	0	982,7	6,1	1,7
-28,8	0	0	87	6	3	2,00	0,09	998,9	5,2	13,3
-20,8	0	0	88	6	6	1,00	0,12	985,9	6	0,0
-13,1	1	142	91	6	9	0,67	0,22	980,7	6,2	3,3
-10,8	0	0	93	6	6	1,00	0,13	989,7	6,3	5,0
-17,9	2	112	94	6	6	1,00	0,08	993,4	6,5	8,3
-17,7	1	273	83	7	7	1,00	0,26	987,3	6,4	8,6
-13,5	2	271	86	7	9	0,78	0,31	981,3	6	14,3
-15,3	0	0	94	7	3	2,33	0,09	975,8	6,2	11,4
-3,5	0	0	97	7	3	2,33	0,15	983,6	7,1	1,4
-17,7	1	315	96	7	10	0,70	0,08	991,8	7,2	2,9
-17,8	1	337	95	7	9	0,78	0,08	980,8	7,4	5,7
-14,8	2	247	88	8	9	0,89	0,24	982,8	8,7	8,7
-20,3	1	173	84	8	6	1,33	0,2	989,1	8,1	1,3
-22,3	2	125	89	8	9	0,89	0,1	994,3	8	0,0
-22,4	2	45	86	8	8	1,00	0,15	984,2	8,4	5,0
-21,7	0	0	94	8	6	1,33	0,05	989,1	8	0,0
-25,9	0	0	86	8	5	1,60	0,11	993,5	7	12,5
-21,7	2	250	86	8	9	0,89	0,16	995,8	8,4	5,0
-20,9	1	285	90	8	8	1,00	0,11	990,1	7,2	10,0
-14,0	3	315	95	8	8	1,00	0,1	989,6	8,4	5,0

Приведем результаты моделирование системы для станций Большой Шантар – таблица 8, Елабуга – таблица 9, Николаевск – таблица 10, Зея – таблица 11.

Таблица 8

Результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Большой Шантар

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-17,70	2	35	87	5	9	0,56	0,2	1017	5,00	0,0
-24,80	3	28	81	5	4	1,25	0,16	1013,3	4,70	6,0
-13,10	2	51	90	5	1	5,00	0,23	1027,3	5,10	2,0
-20,60	3	60	100	5	6	0,83	0	1016,4	5,20	4,0
-11,90	4	60	97	5	3	1,67	0,12	1017,9	5,40	8,0
-26,8	0	0	88	5	5	1,00	0,07	1002,5	5	0,0
-8,8	4	30	93	5	4	1,25	0,13	1019,7	5,1	2,0
-3,6	2	15	88	5	6	0,83	0,6	1015,9	5	0,0
-27,8	2	175	85	5	4	1,25	0,09	1021,4	4,8	4,0
-22,6	3	40	90	5	8	0,63	0,1	1023,6	5,4	8,0

-12,1	1	60	91	5	6	0,83	0,24	1007,9	4,9	2,0
-27,2	3	30	87	5	6	0,83	0,21	1023,8	4,8	4,0
-13,1	2	10	95	5	6	0,83	0,11	1021,8	5	0,0
-21,6	2	60	87	5	2	2,50	0,16	1021,9	5,5	10,0
-22,3	2	40	86	5	3	1,67	0,15	1019	5,3	6,0
0,1	8	340	100	5	7	0,71	0	1009,1	5,1	2,0
-4,5	2	10	96	5	5	1,00	0,19	1013,4	5	0,0
-21,9	2	20	94	5	10	0,50	0,05	1011,2	4,8	4,0
-10,1	2	30	96	5	9	0,56	0,14	1025,8	5,2	4,0
-15,2	3	360	88	5	6	0,83	0,19	1006,1	4,6	8,0
-22,1	3	24	84	6	4	1,50	0,17	1018,3	6	0,0
-21,8	3	35	83	6	7	0,86	0,18	1016,4	5,7	5,0
-16,1	3	20	98	6	6	1,00	0	1016	6,3	5,0
-23,2	3	10	89	6	18	0,33	0,1	1029,1	6	0,0
-15,5	2	60	89	6	6	1,00	0,18	1014	6,6	10,0
0,3	6	340	98	6	5	1,20	0,12	992,7	5,4	10,0
0,2	4	10	98	6	5	1,20	0,13	993	5,8	3,3
-0,8	3	330	98	6	5	1,20	0,12	998,9	5,5	8,3
-1,1	3	10	53	6	7	0,86	43923	1012,9	6,5	8,3
0,1	10	10	98	6	2	3,00	0,11	995,9	5,5	8,3
-15,1	3	25	91	6	1	6,00	0,19	1026,6	6,4	6,7
-13,1	2	60	92	7	2	3,50	0,22	1018,6	7	0,0
-14,7	2	60	89	7	6	1,17	0,2	1011,4	7,2	2,9
-0,4	10	340	97	7	15	0,47	0,16	988,3	7,5	7,1
-12,8	2	20	97	7	6	1,17	0,11	1021	6,8	2,9
-15,8	4	10	90	7	1	7,00	0,18	1004,8	6,4	8,6
0,0	9	360	94	8	3	2,67	0,38	991,8	8	0,0
0,0	7	360	98	8	3	2,67	0,13	987,6	7,5	6,3
0,3	6	10	98	8	3	2,67	0,12	998,2	7,4	7,5
0,0	5	30	100	8	3	2,67	0	997,1	7,2	10,0
-12,3	2	20	87	8	1	8,00	0,36	1016,7	8,2	2,5
-14,0	3	315	95	8	8	1,00		989,6	8	0,0

Среднее отклонение смоделированной величины от статистической по станции
Большой Шантар – 4,44%.

Таблица 9

Результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Елабуга

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-14,50	1	170	89	5	4	1,25	0,22	1017,4	4,5	10,0
-16,70	1	18	92	5	5	1,00	0,17	1017,7	5,5	10,0
-25,90	1	26	90	5	3	1,67	0,07	1015,7	5,3	6,0
-25,40	1	301	88	5	6	0,83	0,08	1011,9	4,3	14,0
-25,20	1	160	88	5	8	0,63	0,08	1016,9	4,3	14,0
-20,5	3	160	90	5	6	0,83	0,12	1015,2	4,1	18,0
-16,5	0	0	95	5	6	0,83	0,09	1015,4	5,2	4,0
-26,4	0	0	87	5	3	1,67	0,11	1025,4	5,2	4,0
-18,7	2	135	93	5	3	1,67	0,07	1015,9	5	0,0
-20,3	6	175	90	5	2	2,50	0,12	1013,9	5,8	16,0
-18,2	3	154	87	6	6	1,00	0,19	1025,7	5,3	11,7
-13,4	2	34	89	6	9	0,67	0,24	1011,2	6,9	15,0
-20,0	0	0	93	6	5	1,20	0,06	1023,1	5,1	15,0
-13,6	2	10	90	6	8	0,75	0,22	1017,4	5,7	5,0
-20,8	2	150	89	6	6	1,00	0,12	1013,3	7,2	20,0
-21,0	2	360	92	6	5	1,20	0,12	1012,2	6,8	13,3
-19,1	2	160	90	6	5	1,20	0,14	1014,3	6,5	8,3
-25,0	0	0	89	6	6	1,00	0,08	1014,6	5,5	8,3
-23,1	4	157	93	6	2	3,00	0,07	1011,4	6,5	8,3
-0,2	2	45	100	6	2	3,00	0	1001,9	5,5	8,3
-24,3	0	0	87	6	5	1,20	0,11	1011,8	6,5	8,3
-16,4	0	0	100	6	3	2,00	0	1000,1	6,6	10,0
-24,2	3	30	90	6	2	3,00	0,09	1021,2	6,8	13,3
-20,6	2	310	90	6	4	1,50	0,17	1027,2	6,4	6,7
-16,3	1	40	86	7	6	1,17	0,24	1015,5	6,1	12,9
-14,1	2	166	90	7	3	2,33	0,21	1013,6	5,9	15,7
-14,4	3	145	95	7	9	0,78	0,1	1005	6,4	8,6
-24,4	4	45	86	7	11	0,64	0,13	1013,4	6,6	5,7
-14,2	3	155	82	7	3	2,33	0,41	1014,1	7,4	5,7
-15,8	1	150	99	8	6	1,33	0	1011,4	7,1	11,3
-24,3	2	145	85	8	6	1,33	0,13	1006,6	7,3	8,8
-21,2	4	190	100	8	6	1,33	0	1007,1	6,8	15,0
-20,5	2	170	89	8	4	2,00	0,12	1012,7	8,5	6,3

Среднее отклонение смоделированной величины от статистической по станции Елабуга – 10,22%.

Таблица 10

Результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Николаевск.

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-19,70	3	83	76	5	3	1,67	0,24	1004,6	4,8	4,0
-15,40	3	93	82	5	4	1,25	0,34	1004,4	5,1	2,0
-13,10	1	330	85	5	2	2,50	0,36	993,9	5,3	6,0
-16,50	1	287	85	5	3	1,67	0,35	1020,7	5,4	8,0
-18,80	2	5	85	5	6	0,83	0,21	1019,2	4,9	2,0
-1,0	4	117	99	5	2	2,50	0,08	1002,3	4,7	6,0
-29,9	2	340	74	5	7	0,71	0,13	1016,6	5,2	4,0
-23,6	0	0	78	5	3	1,67	0,18	1013,4	5,4	8,0
-28,0	1	340	75	5	7	0,71	0,15	1008,8	4,8	4,0
-3,9	4	80	99	5	3	1,67	0,06	1003,6	5,3	6,0
-22,9	1	280	87	5	6	0,83	0,25	1006,3	5,4	8,0
-18,3	4	80	94	5	7	0,71	0,07	1011,4	4,7	6,0
-13,7	2	72	96	5	3	1,67	0,11	1006,9	4,9	2,0
-0,4	0	0	92	5	1	5,00	0,49	999,2	5	0,0
-0,6	0	0	97	5	1	5,00	0,16	1023,4	4,9	2,0
-29,0	1	16	85	5	9	0,56	0,08	1012,5	5	0,0
-5,9	5	84	97	5	4	1,25	0,12	1001,2	5,3	6,0
-25,6	1	320	83	5	3	1,67	0,11	1000,6	5,1	2,0
-14,6	2	90	83	6	3	2,00	0,34	1014,4	5,7	5,0
-0,6	4	99	97	6	6	1,00	0,18	1004	6,2	3,3
-4,6	4	91	93	6	3	2,00	0,29	994,8	6,4	6,7
-24,5	3	260	83	6	5	1,20	0,14	1013,9	5,8	3,3
-12,7	3	92	95	6	11	0,55	0,12	1010,8	5,5	8,3
-24,4	2	272	75	6	4	1,50	0,21	1010,7	6,3	5,0
-11,8	1	11	84	6	6	1,00	0,79	1002,3	5,4	10,0
-22,1	1	343	89	6	6	1	0,1	1008,7	6	0,0
-8,6	4	78	100	6	5	1,2	0	995,3	6,5	8,3
-15,9	1	33	97	6	8	0,75	0,11	1006,4	6,3	5,0
-11,6	2	360	100	6	4	1,5	0	1014,5	6,2	3,3
-17,6	1	357	92	6	10	0,6	0,15	1000,4	5,7	5,0
-12,6	2	10	82	6	3	2	0,53	991,6	5,9	1,7
-21,9	1	260	84	6	3	2	0,16	1009,3	6,6	10,0
-28,7	1	230	82	6	3	2	0,11	1011,1	6,1	1,7
-6,4	1	61	91	7	1	7	0,34	1011,5	6,5	7,1
-18,7	1	276	92	7	4	1,75	0,25	1006,2	6,9	1,4
-16,8	1	358	87	7	5	1,4	0,22	1006,3	6,8	2,9
-8,5	0	0	93	7	7	1	0,23	1007,3	7	0,0
-16	2	6	86	7	6	1,17	0,25	1012,5	6,8	2,9
-11,7	5	80	100	7	2	3,50	0	1004,2	7,2	2,9
-16,9	2	20	85	7	9	0,78	0,25	999,4	6,7	4,3

-26,6	0	0	82	7	3	2,33	0,14	1014,4	7,3	4,3
-4,9	3	78	92	8	4	2,00	0,34	994,3	7,6	5,0
-24,8	2	327	79	8	4	2,00	0,17	1011,1	8	0,0
-27	3	6	76	8	3	2,67	0,16	1016,1	8,2	2,5
-28	3	329	74	8	7	1,14	0,15	1018,7	8,5	6,3
-14,8	3	309	90	8	2	4,00	0,2	1012,1	8,1	1,3
-15,4	2	333	87	8	4	2,00	0,24	1016,3	7,8	2,5
-9	3	95	94	8	8	1,00	0,19	1008,3	7,5	6,3
-9,8	3	105	92	8	7	1,14	0,23	1005,9	7,6	5,0
-24,3	2	345	80	8	4	2,00	0,17	1005,5	8,5	6,3
-0,6	0	0	82	8	1	8,00	0,23	1004,4	8,3	3,8
-4,4	3	100	81	8	7	1,14	0,24	998,4	7,5	6,3
-5,1	3	72	95	8	3	2,67	0,2	997,3	8	0,0

Среднее отклонение смоделированной величины от статистической по станции Николаевск – 10,22%.

Таблица 11

Результаты моделирования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Зезя.

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
0,00	0	0	69	5	29	0,17	0,14	990,4	4,7	6,0
-29,40	0	0	86	5	8	0,63	0,08	1003	5,3	6,0
-26,00	0	0	89	5	11	0,45	0,07	990	4,5	10,0
-22,90	0	0	92	5	10	0,50	0,1	994,7	5,4	8,0
-26,00	0	0	90	5	9	0,56	0,07	996,1	4,9	2,0
-0,3	0	0	98	5	1	5,00	0,12	983,3	4,5	10,0
-21,3	1	192	71	5	12	0,42	0,23	991,5	5,3	6,0
-20,4	0	0	56	5	12	0,42	0,12	985,7	4,4	12,0
-23,6	0	0	89	5	11	0,45	0,09	984,3	5,6	12,0
-24,5	0	0	90	5	12	0,42	0,1	994,5	5,3	6,0
-24,9	0	0	89	5	28	0,18	0,08	988,4	5	0,0
-25,3	0	0	89	5	7	0,71	0,08	991,9	4,4	12,0
-11,9	0	0	89	5	13	0,38	0,35	990,2	4,5	10,0
-29,1	0	0	87	5	25	0,20	0,08	992	5,5	10,0
-26,2	0	0	90	5	14	0,36	0,07	997	4,6	8,0
-24,7	0	0	81	5	11	0,45	0,17	991,1	4,7	6,0
-24,7	0	0	82	5	11	0,45	0,17	991,5	4,5	10,0
-35,4	0	0	79	5	7	0,71	0,06	995,7	5,6	12,0
-22,8	0	0	92	6	11	0,55	0,09	988,3	5,5	8,3
-15	0	0	92	6	6	1,00	0,12	997,8	5,2	13,3
-21,5	0	0	49	6	10	0,60	0,72	990,8	6,7	11,7
-22,2	0	0	90	6	13	0,46	0,06	999,6	6	0,0
-24,7	0	0	89	6	34	0,18	0,08	986,7	6,3	5,0

-26,9	0	0	85	6	12	0,50	0,1	1000,7	5,7	5,0
-24,2	0	0	83	6	10	0,60	0,13	992,8	5,5	8,3
-25,1	0	0	87	6	9	0,67	0,12	996	6,8	13,3
-25,7	0	0	84	6	11	0,55	0,11	995,6	6	0,0
-25,5	0	0	83	6	11	0,55	0,12	985,3	6,3	5,0
-29,4	0	0	79	6	7	0,86	0,11	982,1	6,6	10,0
-27,7	0	0	80	6	10	0,60	0,13	995,4	5	16,7
-15,1	0	0	87	7	4	1,75	0,25	989,5	6,2	11,4
-24,3	0	0	95	7	11	0,64	0,04	1003	7,6	8,6
-11,3	0	0	90	7	8	0,88	0,08	995,9	7,5	7,1
-11,7	0	0	61	7	6	1,17	0,9	994,9	6,3	10,0
-13,1	0	0	63	7	6	1,17	0,59	1004,7	6,5	7,1
-14	0	0	92	7	4	1,75	0,11	1005	6,4	8,6
-25,2	0	0	94	7	16	0,44	0,04	985,3	7,5	7,1
-35,4	0	0	80	7	13	0,54	0,06	985,2	6,2	11,4
-23,9	1	302	74	8	37	0,22	0,19	983,4	7,6	5,0

Среднее отклонение смоделированной величины от статистической по станции Зея – 8,18%.

Анализ результатов моделирования говорит о том, что несмотря на то, что по некоторым метеостанциям величина отклонения составляет незначительную величину от среднестатистической, то на ряде других станций она всё-таки существенна. Это говорит о том, что на данных метеостанциях дополнительное влияние на процесс гололедообразования оказывают ещё не рассмотренные параметры. Анализ географического месторасположения метеостанций указывает на то, что они находятся в существенно различных условиях.

В [1] описывается влияние расположения лесополосы от проводов с обледенением на скорость ветра, которая, в свою очередь, влияет на процесс гололедообразования. Автор, ссылаясь на статистику по метеостанциям, делает вывод о том, что в непосредственной близости от лесополосы (1 метр и менее) скорость ветра снижается практически до нуля. На расстоянии 3 метров скорость ветра снижается на 84%, на расстоянии 7 метров – до 57%, на расстоянии 11 метров – на 34%. При удалении лесного массива более чем на 20 метров скорость ветра остается такой же, как на открытой местности.

Возьмем данные, описанные выше для настройки нечёткого идентификатора. Входными данными будет расстояние до лесополосы, выходными данными – скорость ветра. Настройка нечеткого идентификатора представлена на рисунках 46-48.

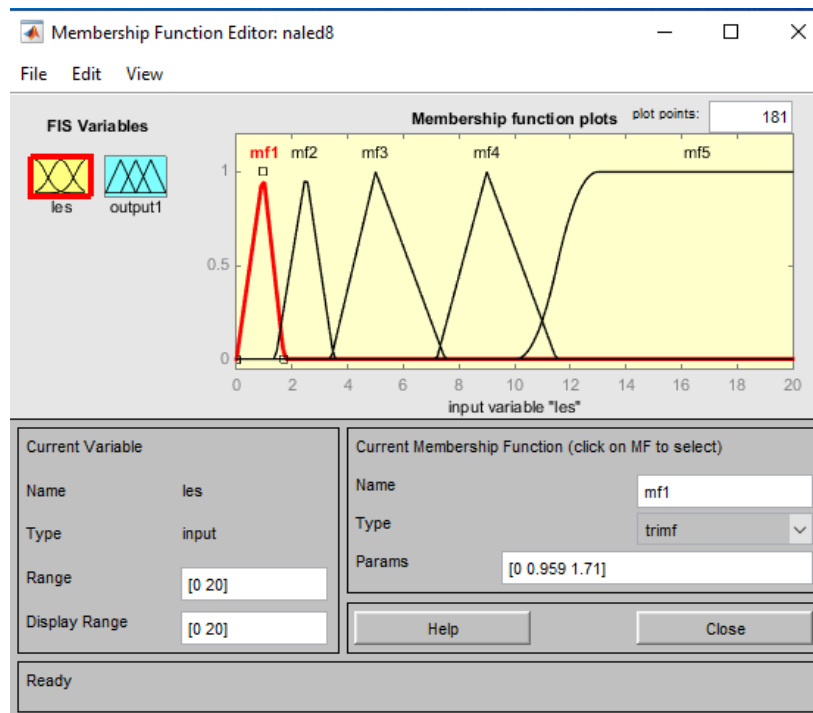


Рис. 46 – Распределение нечётких термов входной переменной «Расстояние до лесополосы» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

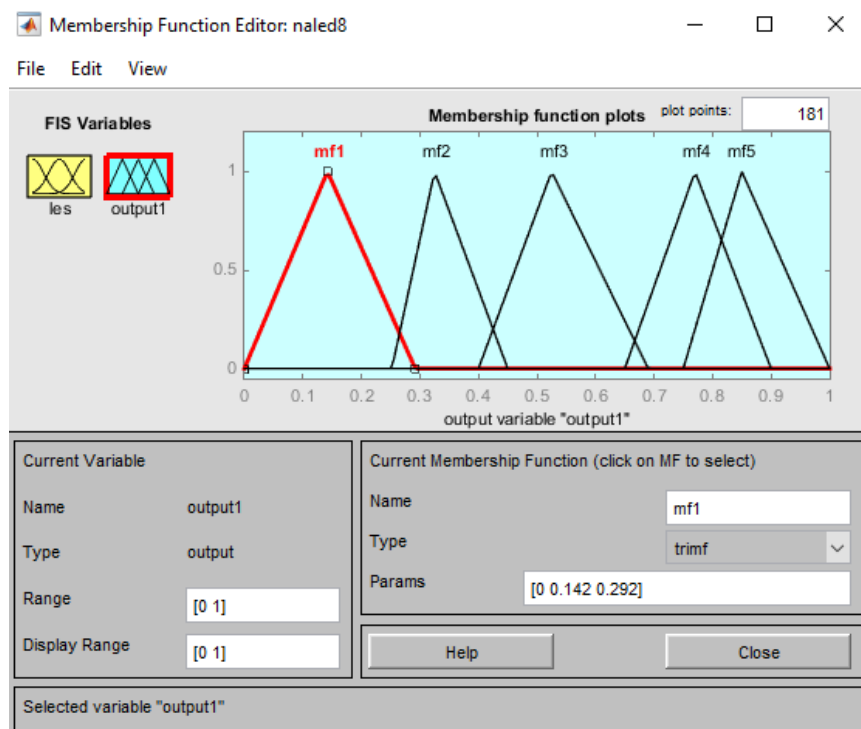


Рис. 47 – Распределение нечётких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

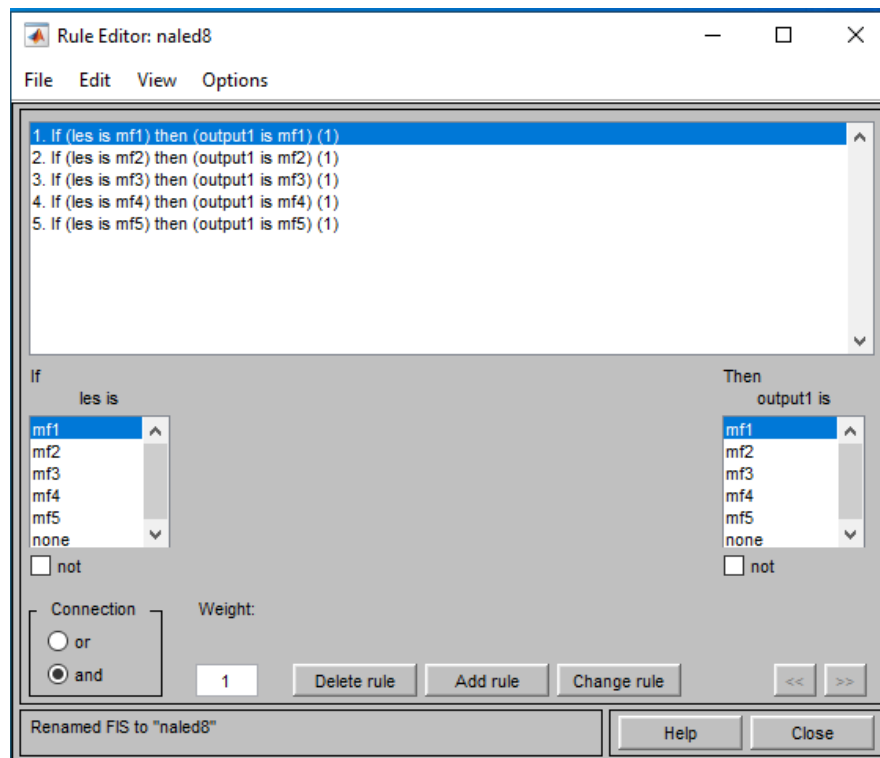


Рис. 48 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

Кроме того, автор [1] рассматривает влияние высоты над уровнем моря на скорость ветра. На основании рисунка 49 можно определить относительное влияние высоты над уровнем моря на величину скорости ветра в относительных единицах. Данное влияние учтём в виде блока нечеткого идентификатора с входным параметром – Высота над уровнем моря, и выходным параметром – скорость ветра.

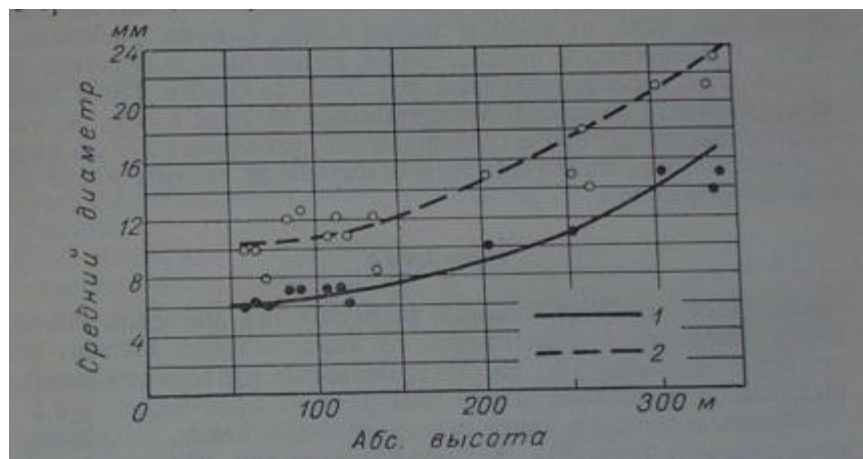


Рис. 49 – Зависимость диаметра гололеда и изморози от высоты места

1- гололёд, 2 - изморось.

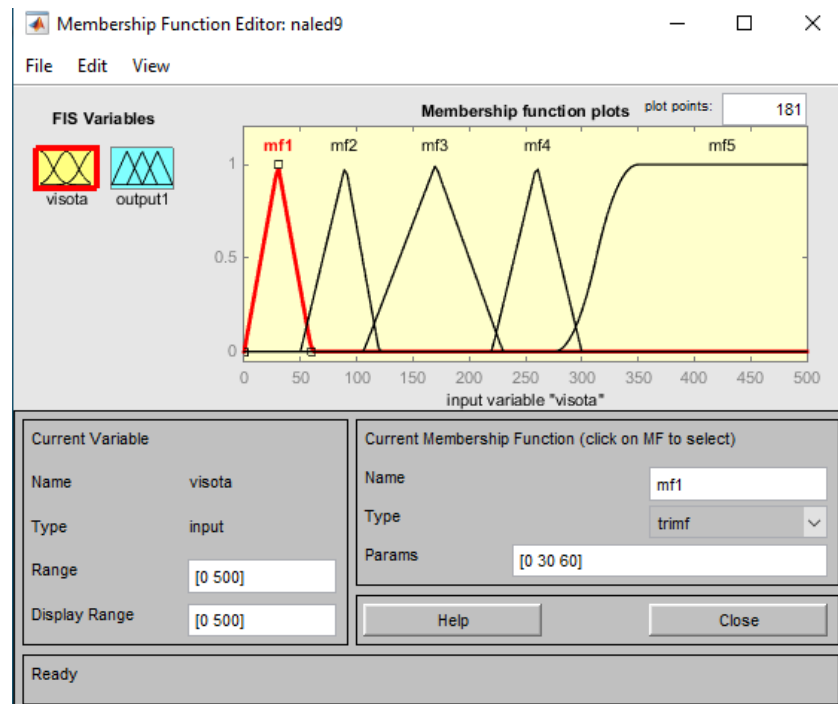


Рис. 50 – Распределение нечётких термов входной переменной «Высота над уровнем моря» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

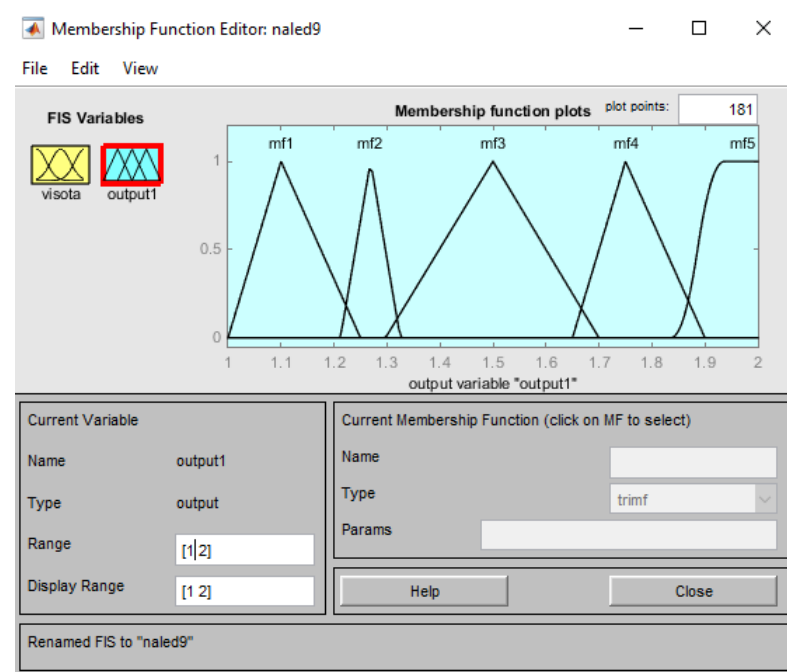


Рис. 51 – Распределение нечётких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

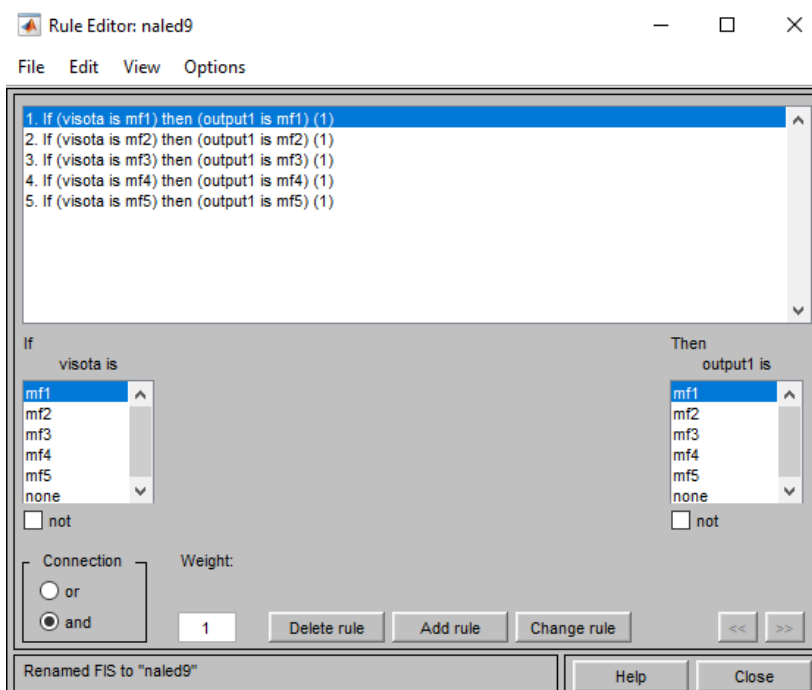


Рис. 52 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller8».

Выходы обоих идентификаторов представляют собой относительную величину корректировки скорости ветра. Они перемножаются между собой, и умножаются на параметр «скорость ветра», подающийся на вход возмущающего воздействия «Fuzzy logic controller3».

Подобным способом введем в модель влияние параметра «облачность» и «осадки» как процентную корректировку к параметру «влажность воздуха».

Данные для создания идентификатора возьмем из статистических данных. Приведём эти данные для станции Братолюбовка ниже в таблице 12.

Таблица 12

Статистические данные по метеостанции Братолюбовка

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Осадки	ON	OCc- Cs	OAc- As	OCu- Cb	OSt- Sc	OFr- nb
-27,50	1	275	73	5	нет	0	0	0	0	0	0
-22,80	1	352	79	5	нет	0	0	0	0	0	0
-27,20	2	258	75	5	нет	0	0	0	0	0	0
-24,70	1	326	77	5	нет	0	0	0	0	0	0
-26,70	1	107	75	5	нет	10	0	5	0	0	0
-19,6	0	0	99	5	нет	0	0	0	0	0	0
-22,0	1	108	96	5	нет	10	0	8	2	0	0
-14,0	0	0	70	5	нет	10	0	8	4	0	0
-30,6	1	246	72	5	нет	10	0	3	0	0	0

-18,2	1	169	97	5	нет	10	0	5	0	0	0
-12,4	1	322	88	5	нет	10	0	3	0	0	0
-12,3	2	226	98	5	нет	0	0	0	0	0	0
-27,6	1	298	87	5	нет	0	0	0	0	0	0
-13,4	4	99	95	5	нет	0	0	0	0	0	0
-34,4	1	276	83	5	нет	0	0	0	0	0	0
-31,8	0	0	81	5	нет	0	0	0	0	0	0
-28,0	1	225	84	5	Снег	10	0	3	0	0	0
-15,4	1	315	96	5	нет	0	0	0	0	0	0
-18,0	1	135	88	5	нет	0	0	0	0	0	0
-19,6	1	311	89	5	нет	0	0	0	0	0	0
-30,9	2	108	84	5	нет	0	0	0	0	0	0
-13,3	1	292	95	5	нет	0	0	0	0	0	0
-16,5	1	67	91	5	Снег	10	0	0	0	0	0
-15,5	1	202	94	5	нет	0	0	0	0	0	0
-12,3	3	292	96	5	нет	0	0	0	0	0	0
-4,9	0	0	100	5	туман	0	0	0	0	0	0
-22,7	2	104	78	6	нет	0	0	0	0	0	0
-22,0	0	0	79	6	Снег	10	0	8	2	0	0
-24,9	1	307	76	6	нет	4	0	1	0	0	0
-18,2	1	102	82	6	нет	10	0	5	0	0	0
-28,7	2	123	74	6	нет	0	0	0	0	0	0
-17,8	1	258	86	6	нет	10	0	3	0	0	0
-24,9	0	0	86	6	нет	4	0	1	0	0	0
-31,8	0	0	82	6	нет	0	0	0	0	0	0
-8,8	0	0	100	6	нет	6	0	1	0	0	0
-28,8	0	0	87	6	нет	0	0	0	0	0	0
-20,8	0	0	88	6	нет	0	0	0	0	0	0
-13,1	1	142	91	6	нет	0	0	0	0	0	0
-10,8	0	0	93	6	нет	0	0	0	0	0	0
-17,9	2	112	94	6	нет	0	0	0	0	0	0
-17,7	1	273	83	7	нет	0	0	0	0	0	0
-13,5	2	271	86	7	нет	0	0	0	0	0	0
-15,3	0	0	94	7	нет	10	0	5	0	0	0
-3,5	0	0	97	7	туман	0	0	0	0	0	0
-17,7	1	315	96	7	нет	0	0	0	0	0	0
-17,8	1	337	95	7	нет	10	0	3	0	0	0
-14,8	2	247	88	8	нет	0	0	0	0	0	0
-20,3	1	173	84	8	нет	0	0	0	0	0	0
-22,3	2	125	89	8	нет	0	0	0	0	0	0
-22,4	2	45	86	8	Снег	10	0	3	0	0	0
-21,7	0	0	94	8	нет	0	0	0	0	0	0
-25,9	0	0	86	8	нет	0	0	0	0	0	0
-21,7	2	250	86	8	нет	0	0	0	0	0	0
-20,9	1	285	90	8	нет	0	0	0	0	0	0
-14,0	3	315	95	8	нет	10	0	8	4	0	0

Как видно из таблицы 12, облачность и осадки присутствуют не во всех случаях гололёдообразования. Однако, во всех случаях выпадения снега, наблюдается облачность в 10 баллов – то есть небо затянуто облаками полностью. Таким образом можно сделать вывод о том, что наличие облачности и осадков взаимосвязано, а также оказывает влияние на относительную влажность воздуха.

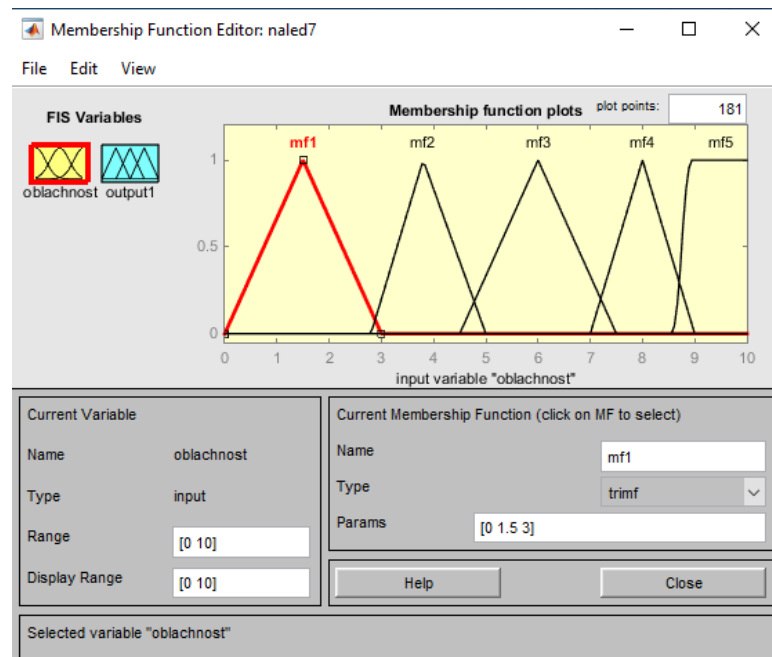


Рис. 53 – Распределение нечётких термов входной переменной «Облачность» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller7».

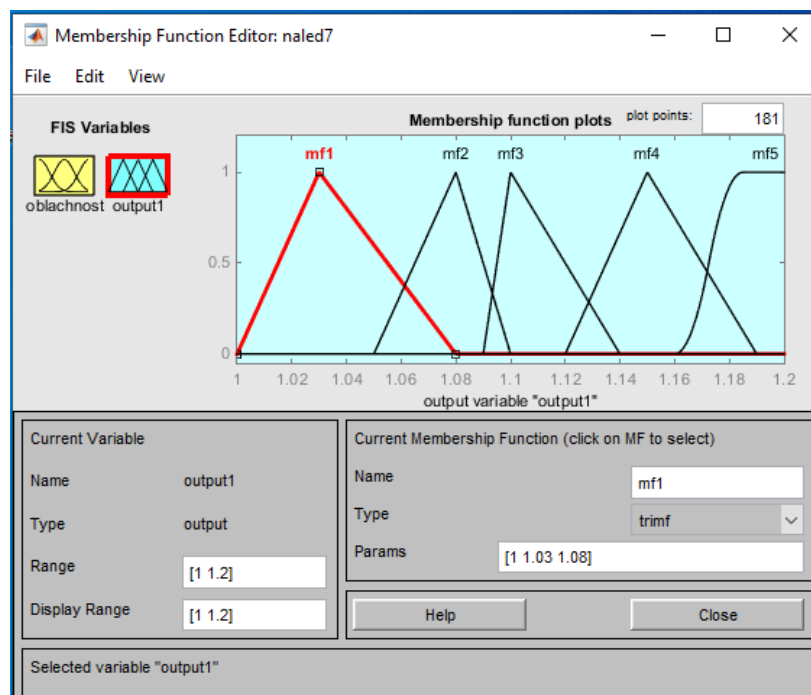


Рис. 54 – Распределение нечётких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller7».

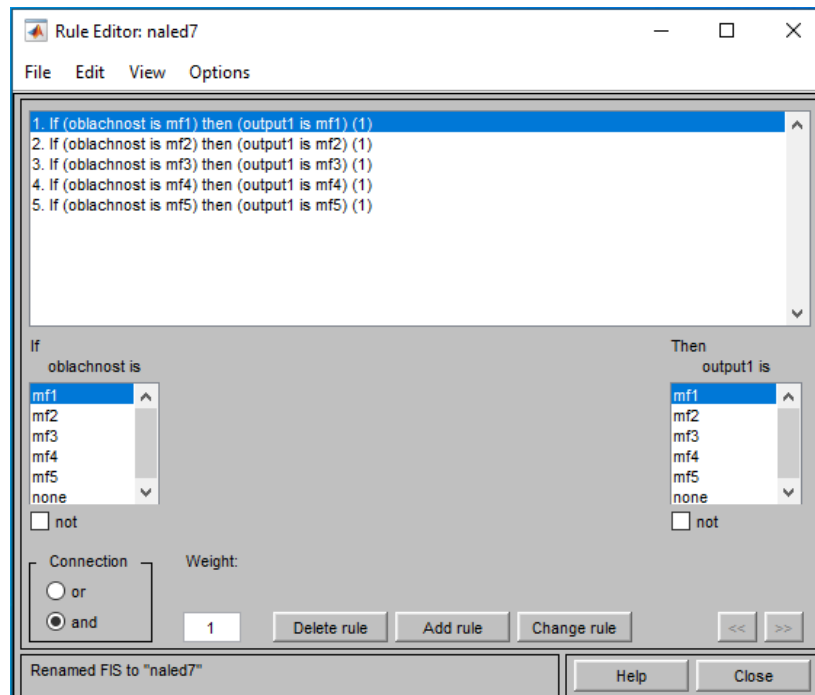


Рис. 55 – База правил нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller7».

Влияние облачности представим в виде нечеткого идентификатора, настроенного на основании статистических данных.

Влияние осадков представим в виде блоков Subsystem2 и Subsystem3. Всего в статистических данных присутствует 2 вида осадков: снег и туман. Поэтому создадим часть модели, в которой блок Subsystem2 будет отвечать за параметр «снег», а блок Subsystem3 будет отвечать за параметр «туман».

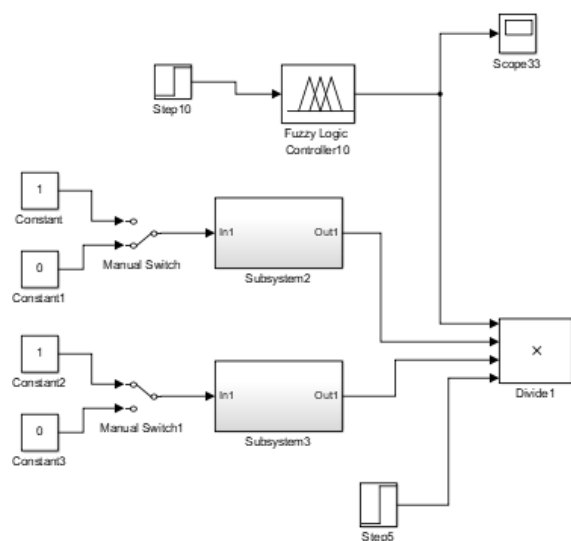


Рис. 56 – Фрагмент модели, отвечающий за влияние осадков

Фрагмент модели, представленный на рисунке 56, работает следующим образом: Если снег идет, то коэффициент к влажности воздуха принимается равным 1,2. Если нет, то равным 1. Если есть туман, то коэффициент к влажности воздуха принимается равным 1,1. Если нет, то равным 1.

Значение данного блока умножается с блоком идентификатора, отвечающим за облачность, и умножается на входной параметр влажности воздуха.

Таким образом, на основании вышеизложенного, результирующая система прогнозирования гололёдообразования может быть представлена в виде, показанном на рисунке 57.

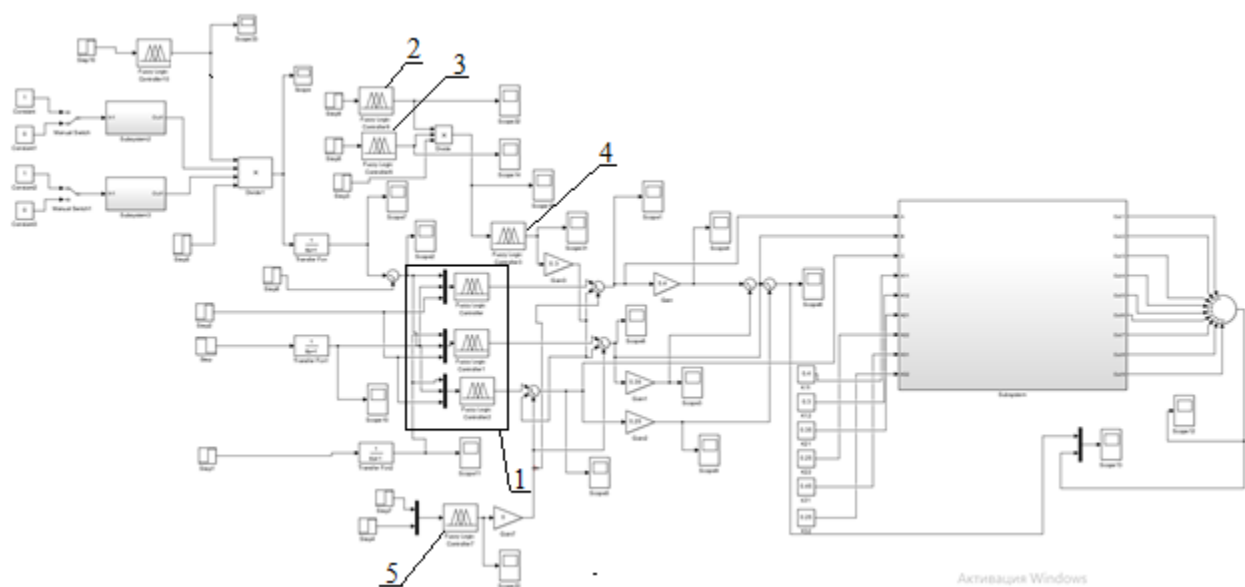


Рис. 57 – Модель прогнозирования гололёдообразования, в котором цифрой 1 обозначена Fuzzy logic controller, Fuzzy logic controller1, Fuzzy logic controller2, цифрой 2 обозначен Fuzzy logic controller8 (отвечает за влияние на скорость ветра облачности и удаленности от лесополосы), цифрой 3 обозначен Fuzzy 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)

4 Исследование модели системы прогнозирования гололёдообразования

Для оценки работоспособности разработанной системы прогнозирования проведем исследование поведения ее в различных динамических режимах. С этой

целью на соответствующие входы системы будем подавать линейно изменяющиеся сигналы в реальном диапазоне изменения этих параметров. При этом для оценки реакции системы прогнозирования на изменение соответствующего сигнала будем менять темп нарастания сигнала. Исследование начнем с анализа влияния базовых параметров гололедообразования.

Для апробирования системы прогнозирования гололёдообразования подадим 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.

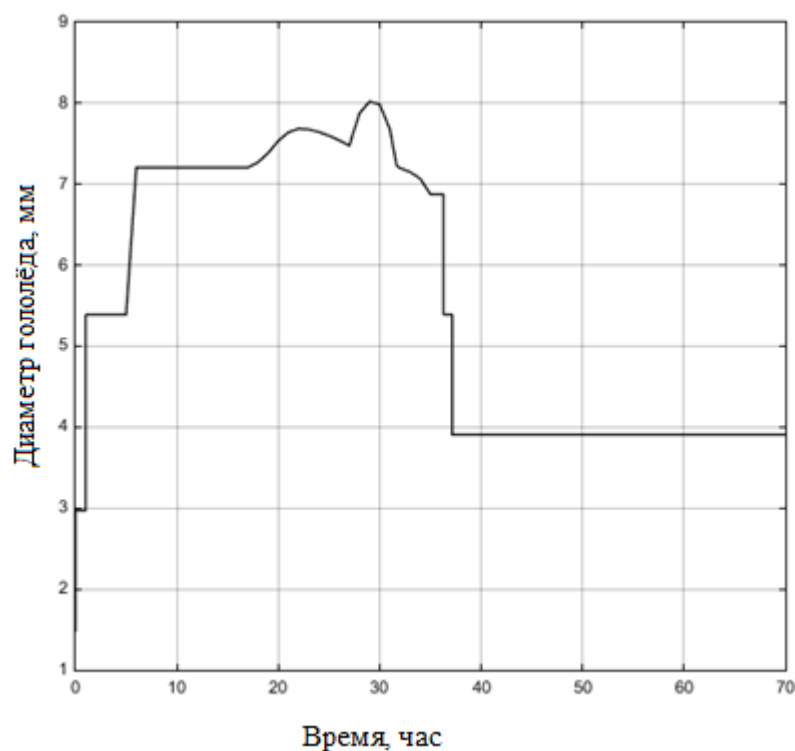


Рис. 58 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при температуре от -20 до -27 °C

Результат моделирования, изображенный на рисунке 58, 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 °C, скорость нарастания гололёда = 1,45 мм/час, влажность = 78%, направление ветра = 150 град. Эта

точка ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Братолюбовка, параметры которой приведены в таблице 13.

Таблица 13

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 58

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$	Осадки
-20,3	1	173	84	8	6	1,33	0,2	989,1	8,1	1,3	нет

Как видно из таблицы 13, 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%.

Изменим параметр температуры – установим его изменение от -20 до -33 °С с темпом 2 градуса за 10 часов. На рисунке 59 видно, что при увеличении разброса температуры график в начале меняет форму, незначительно изменяя переходные уровни, однако в целом основные значения остаются почти без изменений. Максимальное значение диаметра гололёда немного изменяется и составляет 7,8 мм, а также смещается на отметку 15 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -23 °С, скорость нарастания гололёда = 0,9 мм/час, влажность = 73%, направление ветра = 75 град. Эта точка ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Братолюбовка, параметры которой приведены в таблице 14.

Таблица 14

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 59

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$	Осадки
-22,3	2	105	79	8	9	0,89	0,1	994,3	8	0,0	нет

Как видно из таблицы 14, диаметр отложения согласно статистическим данным – 8 мм, согласно моделированию – 8 мм. Результат моделирования, изображенный на рисунке 59 показывает результат модели в 7,8 мм, что является отклонением от статистических данных примерно в 2,5%.

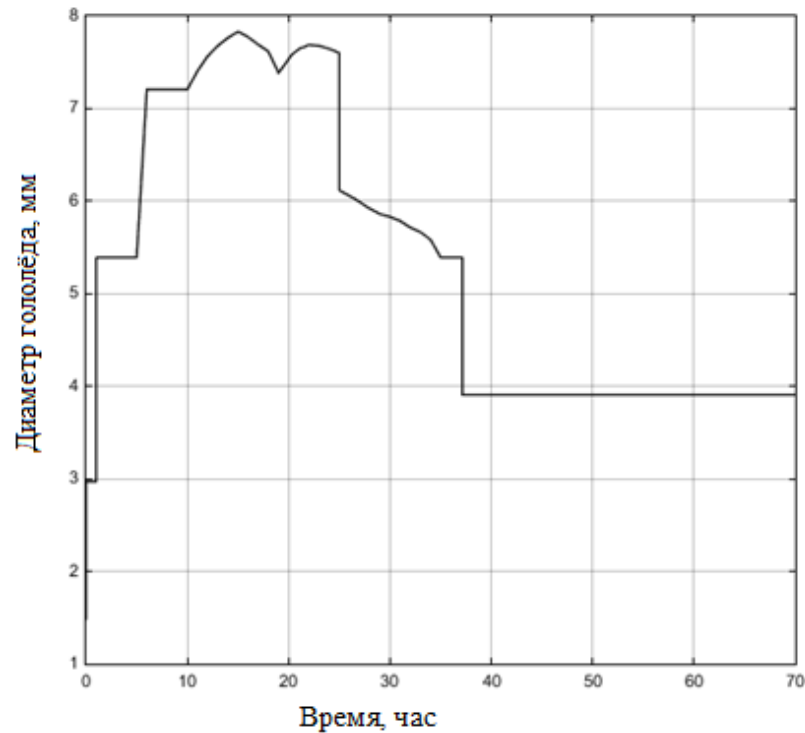


Рис. 59 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при температуре от -20 до -33 °C

Расширим диапазон температур: возьмём значения от -5 до -30 °C с темпом 3 градуса за 10 часов.

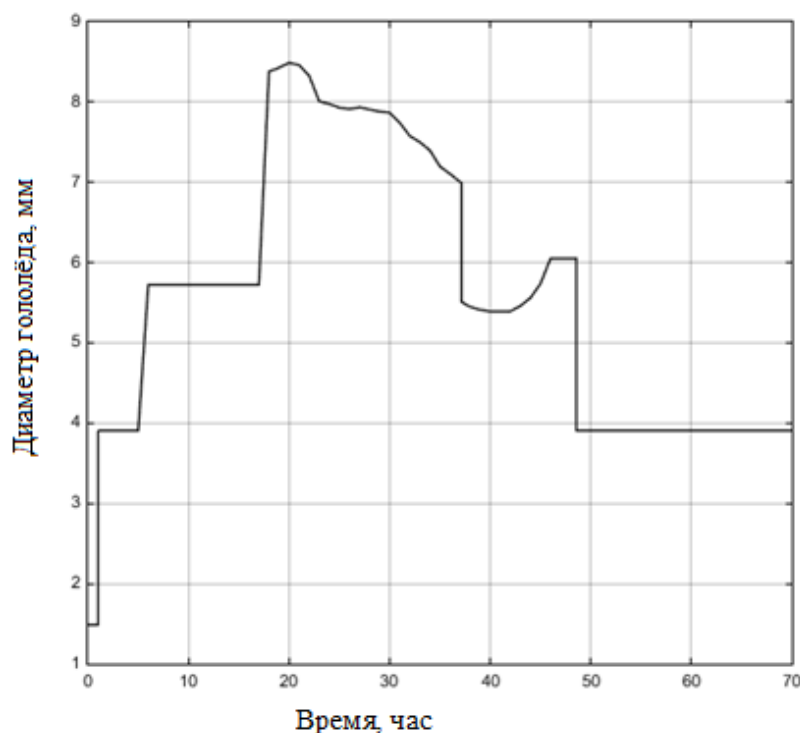


Рис. 60 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при температуре от -5 до -30 °С

При более широком диапазоне температур форма графика, а также уровни перехода изменяются сильнее, однако установившееся значение на всех трёх графиках одинаково. Но в последнем случае с самым широким диапазоном изменения выход графика на установившееся значение занимает больше времени, чем в двух предыдущих случаях. Максимальное значение составляет 8,5 мм и соответствует времени в 20 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -13 °С, скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 74%, направление ветра = 100 град. Эта точка не имеет близких значений со статистическими данными, поэтому нет возможности подсчитать процент отклонения.

Проанализируем изменение влажности воздуха. Зафиксируем температуру на диапазоне от -5 до -30 °С с темпом 3 градуса за 10 часов. Диапазон изменения влажности возьмём от 70 до 95 % с темпом 4 % за 10 часов.

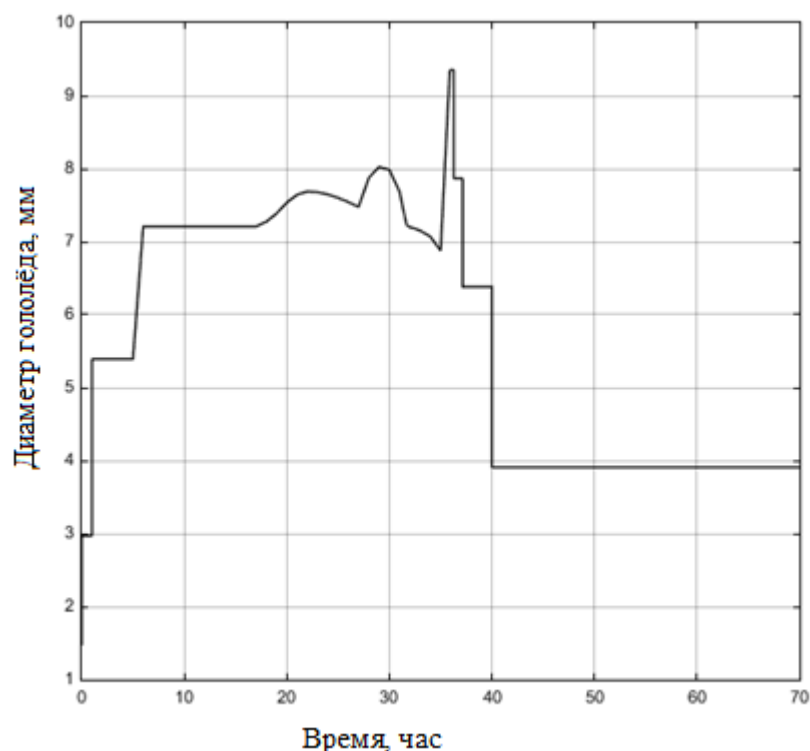


Рис. 61 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при влажности воздуха от 70 до 95 %

Как видно на рисунке 61 при уменьшении диапазона изменения влажности время до выхода графика на установившееся значение сократилось. Форма начала графика и уровни переходов изменились значительно, что говорит о сильном влиянии влажности воздуха на диаметр гололёда. Выходная величина «диаметр гололеда» в ходе изменения входных параметров претерпевает изменения достигая максимального значения примерно через 36 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -18 °С, скорость нарастания гололёда = 1,7 мм/час, влажность = 86%, направление ветра = 180 град. Эта точка ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Братолюбовка, параметры которой приведены в таблице 15.

Как видно из таблицы 15, диаметр отложения согласно статистическим данным – 9 мм, согласно моделированию – 9,1 мм. Результат моделирования, изображенный на рисунке 61, показывает результат модели в 9,4 мм, что является отклонением от статистических данных примерно в 4,4%.

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 61

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-20,3	1	173	84	9	6	1,33	0,2	989,1	9,1	1,1

Сузим диапазон изменения влажности ещё и возьмём от 70 до 85 % с темпом 3% за 10 часов. Как видно на рисунке 62, время выхода к установившемуся значению уменьшилось ещё сильнее. Вид графика и уровни переходов практически не изменились. Разница между диапазонами незначительна. Максимальное значение диаметра гололёда изменяется и составляет 8 мм, а также смещается на отметку 30 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -16 °С, скорость нарастания гололёда = 1,45 мм/час, влажность = 80%, направление ветра = 150 град. Эта точка ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Елабуга параметры которой приведены в таблице 16.

Таблица 16

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 62

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-15,8	1	150	99	8	6	1,33	0	1011,4	7,1	11,3

Как видно из таблицы 16, диаметр отложения согласно статистическим данным – 8 мм, согласно моделированию – 7,1 мм. Результат моделирования, изображенный на рисунке 62, показывает результат модели в 8 мм, что является отклонением от статистических данных примерно в 0%.

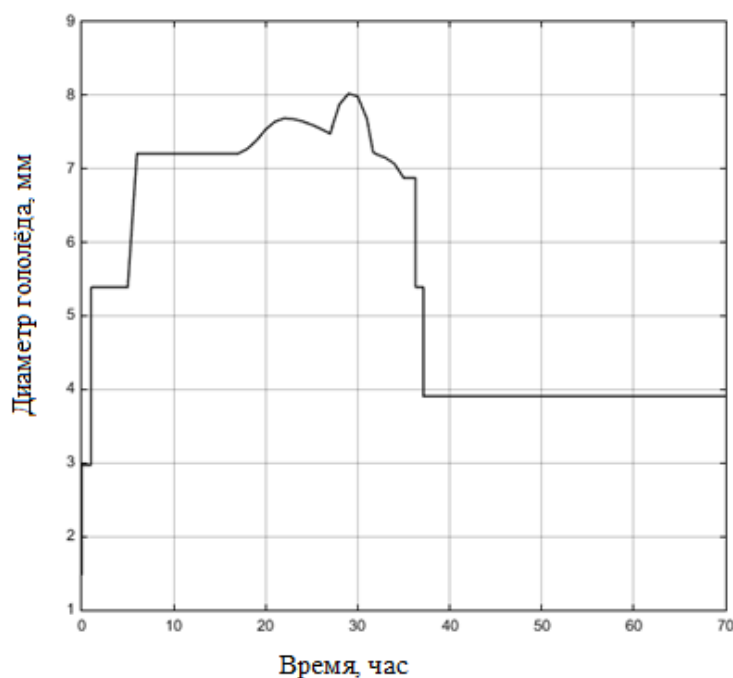


Рис. 62 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при влажности воздуха от 70 до 85 %

Установим диапазон изменения влажности воздуха от 60 до 95% с темпом 5 % за 14 часов и будем изменять диапазон направления скорости ветра. Установим диапазон изменения от 0 до 200 град темпом изменения 35 град. за 10 часов.

Как видно на рисунке 63, при уменьшении диапазона изменения направления ветра вид графика изменился с момента, в котором на графике с диапазоном от 0 до 350 начиналось установившееся значение. При диапазоне направления скорости ветра от 0 до 200 установившееся значение держится незначительный промежуток времени, после чего уходит на другой уровень.

Максимальное значение диаметра гололёда – 8,4 мм также, как и в предыдущем случае на отметке 30 часов. В данной точке параметры входных переменных: температура = -16 °С, скорость нарастания гололёда = 1,45 мм/час, влажность = 80%, направление ветра = 90 град. Эта точка не имеет близких значений со статистическими данными, поэтому нет возможности подсчитать процент отклонения.

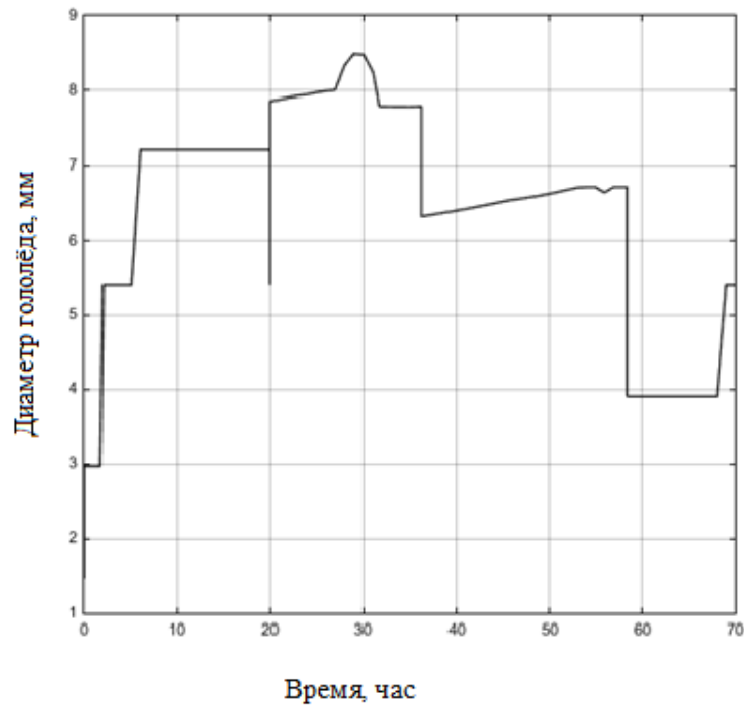


Рис. 63 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при

Уменьшим диапазон изменения направления скорости ветра ещё раз: от 0 до 100 град с темпом 20 град за 13 часов.

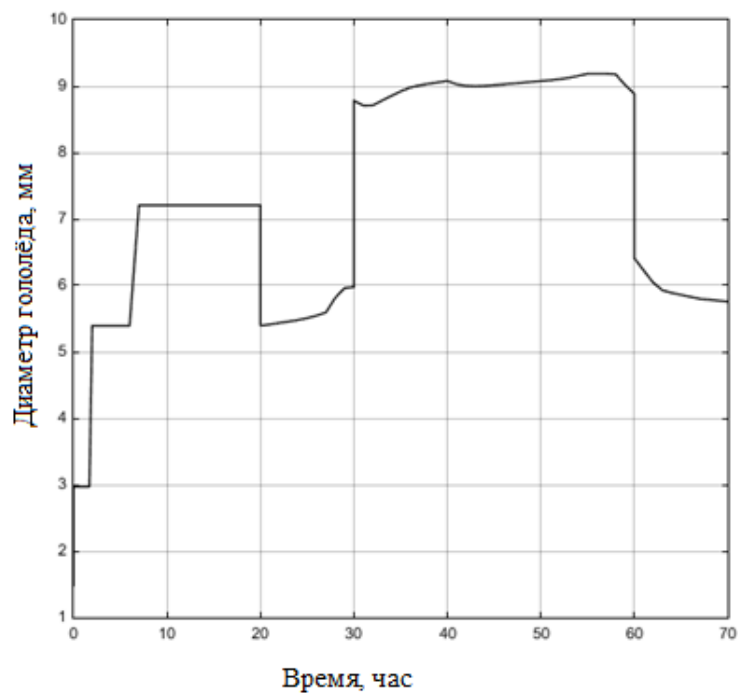


Рис. 64 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при направлении скорости ветра от 0 до 100 град.

Как видно на рисунке 64 – при сужении диапазона график не успевает выйти на установившееся значение. Вид самого графика тоже значительно изменился. Максимум находится на отметке около 9,2 мм. и 57 часов. В данной точке параметры входных

переменных: температура = -25°C , скорость нарастания гололёда = 2,4 мм/час, влажность = 87%, направление ветра = 85 град. Эта точка не имеет близких значений со статистическими данными, поэтому нет возможности подсчитать процент отклонения.

Установим значения основных параметров в следующих пределах: изменение температуры в рамках линейной функции: от -5 до -30°C с темпом 3 градуса 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.

При указанных фиксированных параметрах исследуем влияние блока возмущения на систему.

Установим скорость ветра на уровень 4 м/с. При условии, что станция находится на открытой местности и не на возвышенности.

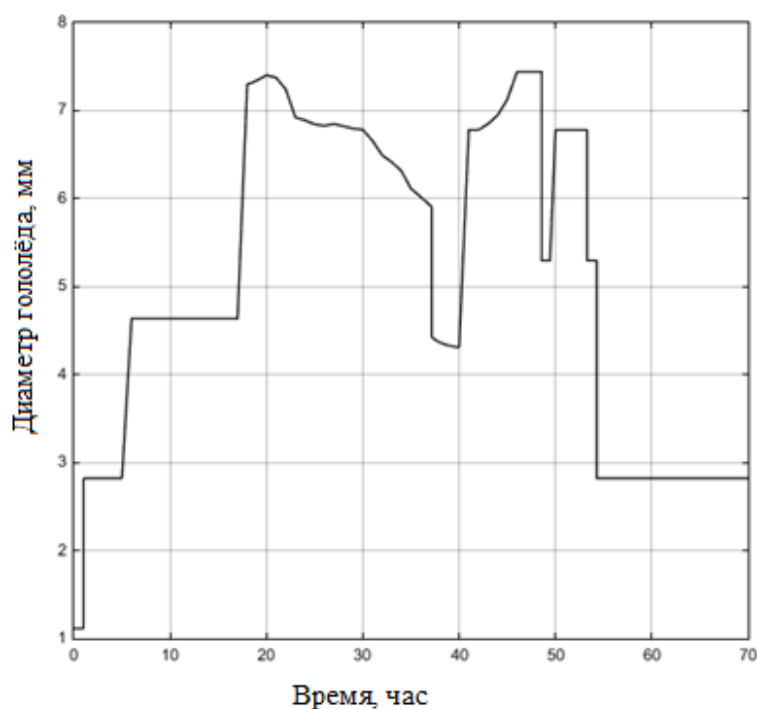


Рис. 65 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при скорости ветра 4 м/с

Как видно на рисунке 65, при высокой скорости ветра на открытой равнинной местности диаметр гололёда 2 раза достигал максимального значения в 7,5 мм. На отметке в 20 часов и на отрезке с 45 до 49 часов. Точка, находящаяся на отметке в 20 часов, имеет следующие значения остальных параметров: температура = -12°C , скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 77%, направление ветра = 100

град. Данная точка не имеет аналогов среди статистических данных. На отрезке с 45 до 49 часов входные параметры: температура = -21 - -22°C, скорость нарастания гололёда = 2 - 2,1 мм/час, влажность = 92 - 93%, направление ветра = 225 - 240 град. Эти уровни ближе всего к точке в статистических данных по метеостанции Елабуга параметры которой приведены в таблице 17.

Как видно из таблицы 17, диаметр отложения согласно статистическим данным – 8 мм, согласно моделированию – 8,5 мм. Результат моделирования, изображенный на рисунке 65, показывает результат модели в 7,5 мм, что является отклонением от статистических данных примерно в 6,25%. Расхождение с изначальным моделированием можно объяснить расхождением во входных данных.

Таблица 17

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 65

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-13,1	1	330	85	5	2	2,50	0,36	993,9	5,3	6,0

Установим скорость ветра на уровень 1 м/с. При условии, что станция находится на открытой местности и на высоте 50 метров над уровнем моря.

Как видно на рисунке 66, снижение скорости ветра при условии расположения ЛЭП на открытой равнинной местности приводит к снижению образования гололёдообразования.

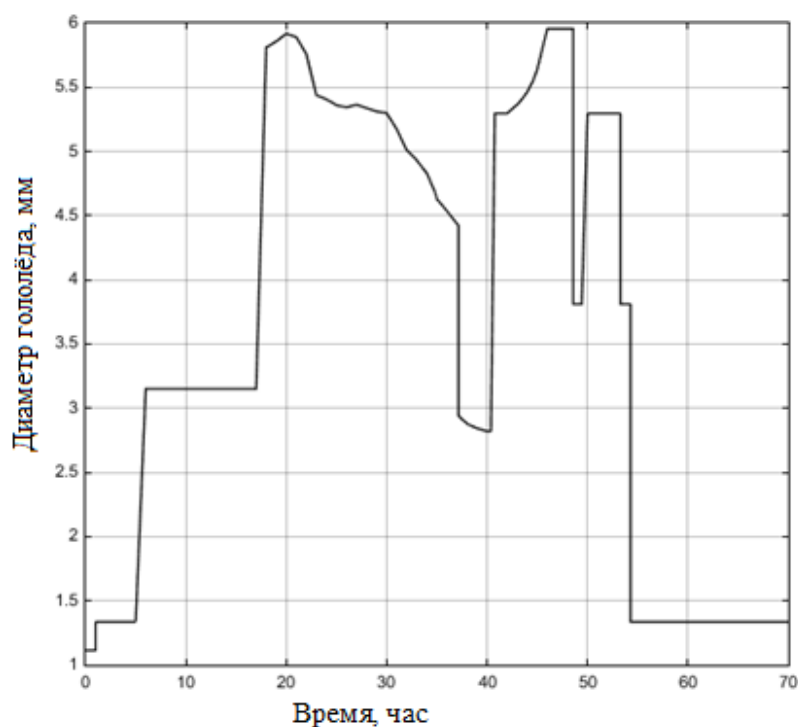


Рис. 66 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при скорости ветра 1 м/с

Максимальные значения составляют 5,9 мм. и находятся на тех же часовых отметках, что и на предыдущем графике. Точки входных переменных также будут находиться на тех же значениях, что и в предыдущем случае. Наиболее подходящие статистические данные приведены в таблице 18. Диаметр отложения из статистической базы равен 6 мм, диаметр согласно первоначальному моделированию равен 6,6 мм, диаметр согласно рисунка 66 равен 5,9. Отклонение от статистических данных составляет 1,67%. Отклонение от первоначального моделирования составляет 10,6%, что обусловлено расхождением во входных данных.

Таблица 18

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с рисунка 66

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-21,9	1	260	84	6	3	2	0,16	1009,3	6,6	10,0

Установим скорость ветра на уровень 4 м/с. При условии, что станция находится в лесистой местности и на высоте 50 метров над уровнем моря.

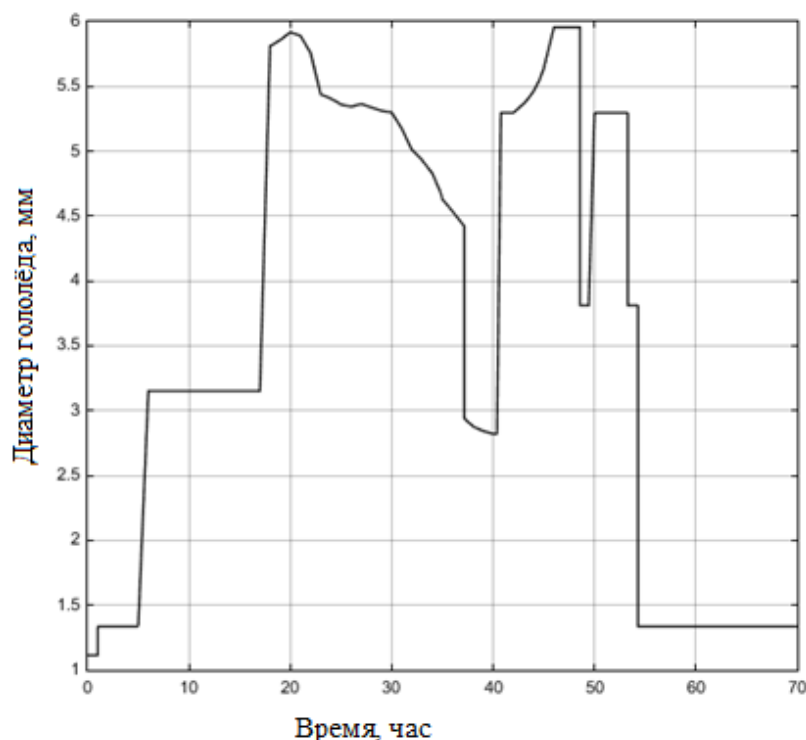


Рис. 67 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при скорости ветра 4 м/с

Как видно по рисунку 67, нахождение ЛЭП в лесном массиве значительно снижает вероятность нарастания гололёда. График практически идентичен рисунку 66, так как коррекция на скорость ветра снижает её практически до значения предыдущего случая.

Установим скорость ветра на уровень 2 м/с. При условии, что станция находится на открытой местности и на высоте 300 метров над уровнем моря.

Максимальные значения изменяются количественно и равны 7,3 мм, но не смещаются по шкале времени.

Как видно из рисунка 68, увеличение высоты над уровнем моря значительно влияет на скорость ветра, которая, в свою очередь, достаточно сильно влияет на диаметр гололёдообразования. Форма графика на рисунке 68 практически идентична графику на рисунке 65, что говорит о том, что при нахождении станции на значительной возвышенности, модель отрабатывает так, как если бы скорость ветра была установлена в размере 4 м/с.

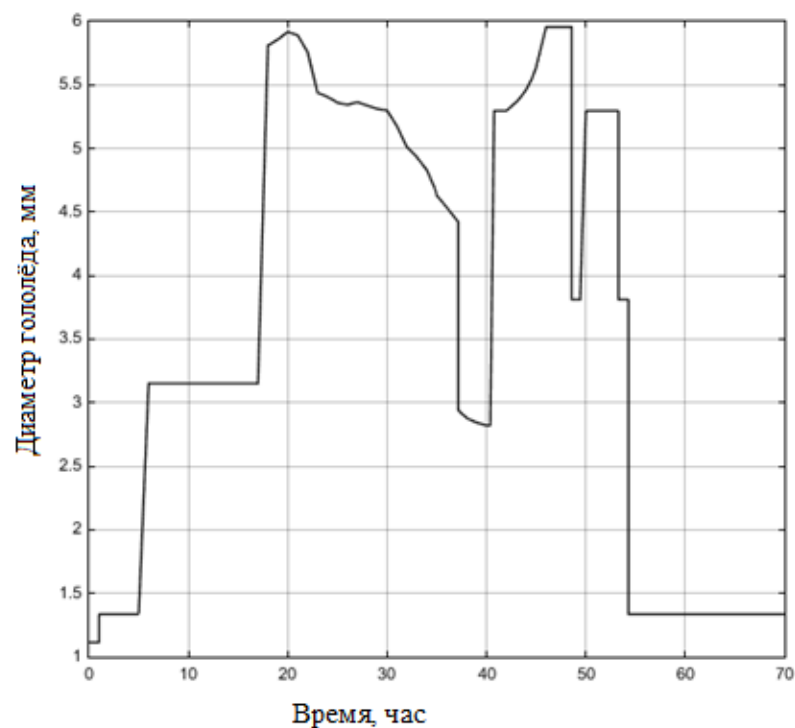


Рис. 68 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при скорости ветра 2 м/с

Подадим на вход по температуре сигнал произвольного вида с рисунка 69. Скорость ветра зафиксируем на отметке 2м/с. Все остальные параметры оставим без изменений.

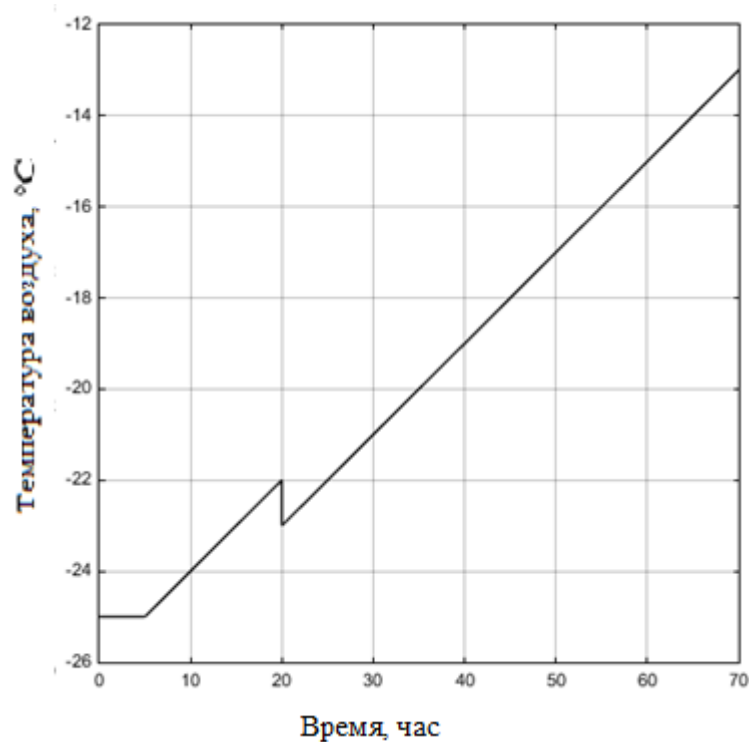


Рис. 69 - График входной переменной «температура» произвольной формы

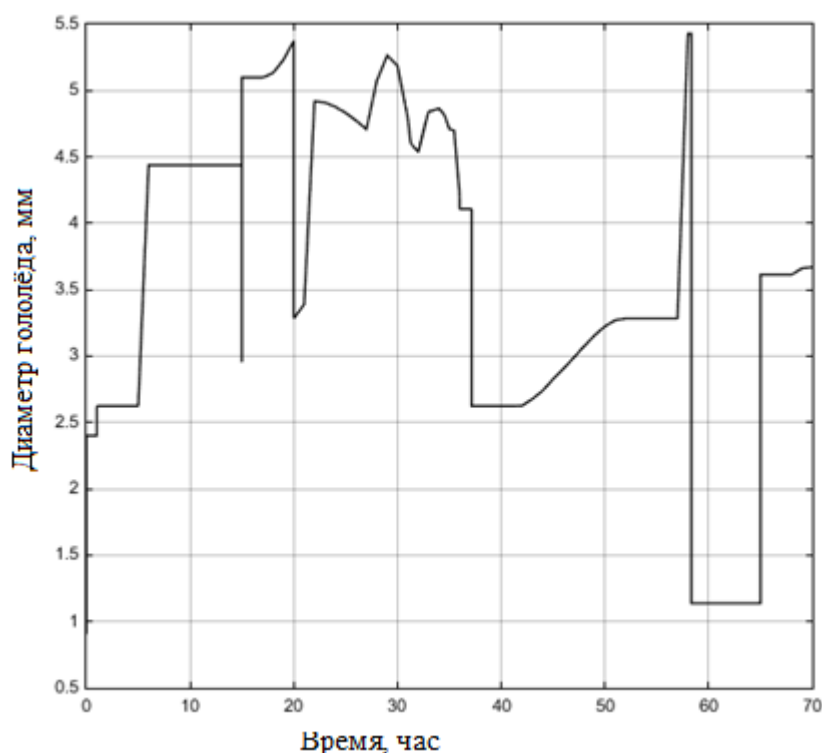


Рис. 70 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход температуры произвольной формы с рисунка 69

Как видно из рисунка 70, максимальное значение в 5,4 мм достигается на отметке в 58 часов. Параметры входных переменных: температура = -15°C , скорость нарастания гололёда = 2,4 мм/час, влажность = 92%, направление ветра = 290 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 19. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 8 %. Расхождение может быть обусловлено не точным совпадением входных данных.

Таблица 19

Параметры из статистической базы, наиболее близкие к точке максимума с рисунка 70

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-13,10	1	330	85	5	2	2,50	0,36	993,9	5,3	6,0

Подадим на вход по температуре сигнал произвольного вида с рисунка 71. Все остальные параметры оставим без изменений.

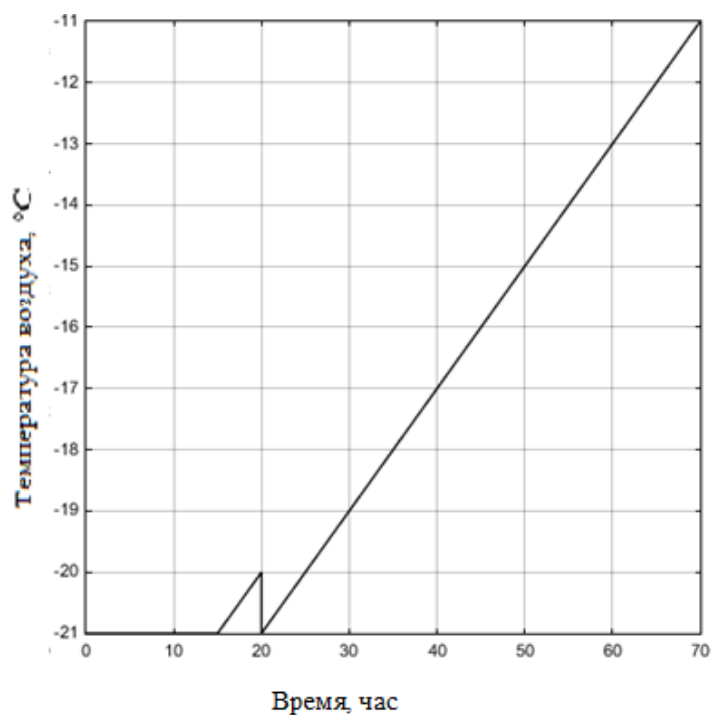


Рис. 71 - График входной переменной «температура» произвольной формы

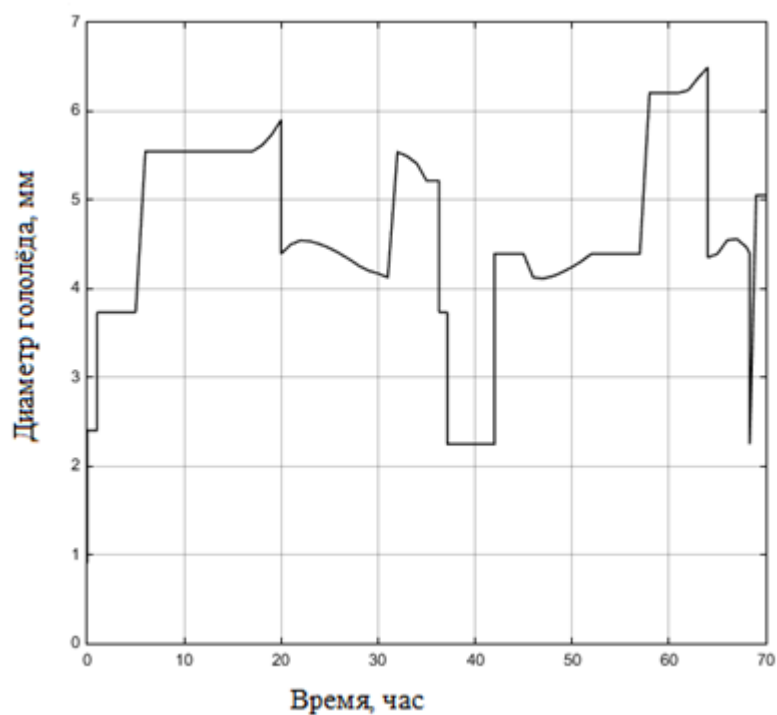


Рис. 72 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход температуры произвольной формы с рисунка 71

Как видно из рисунка 72, максимальное значение в 6,5 м/с достигается на отметке в 64 часа. Параметры входных переменных: температура = -12°C, скорость нарастания гололёда = 2,7 мм/час, влажность = 94%, направление ветра = 320 град. Близкую по

параметрам точку в статистических данных найти не удалось, соответственно невозможно и высчитать процент отклонения.

Подадим на вход по температуре сигнал произвольного вида с рисунка 73. Все остальные параметры оставим без изменений.

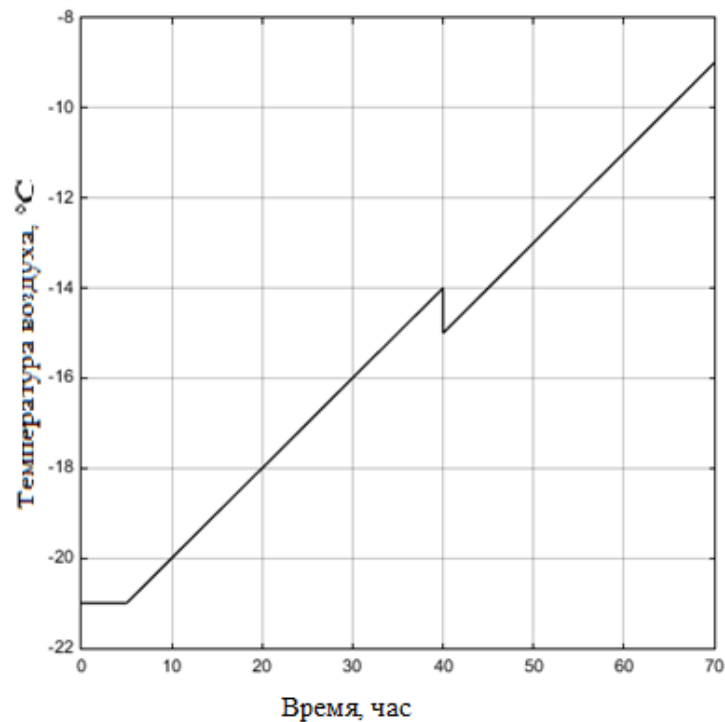


Рис. 73 - График входной переменной «температура» произвольной формы

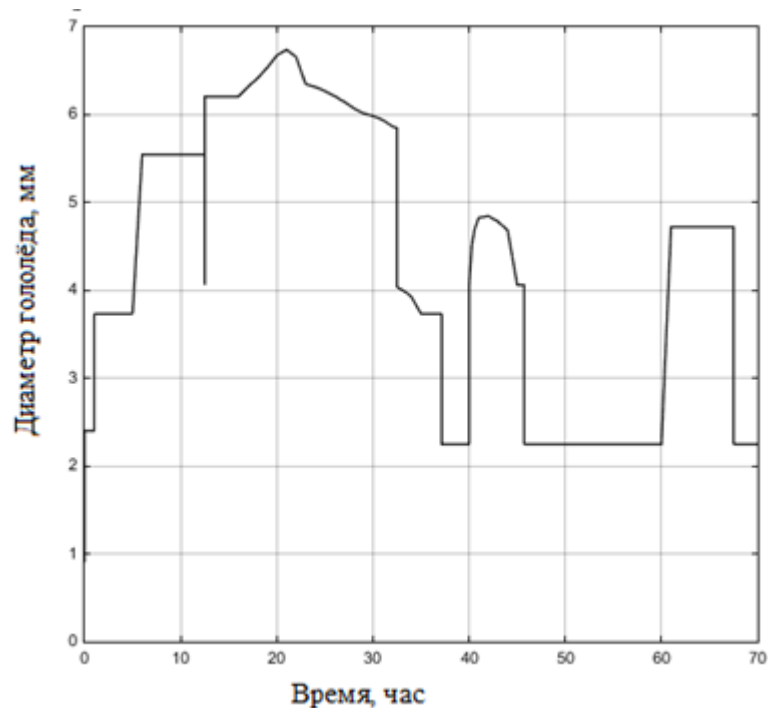


Рис. 74 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход температуры произвольной формы с рисунка 73

Как видно из рисунка 74, максимальное значение в 6,7 м/с достигается на отметке в 21 час. Параметры входных переменных: температура = -17,8°C, скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 75%, направление ветра = 100 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 20. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 4,3 %.

Таблица 20

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с рисунка 74

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-14,7	2	60	89	7	6	1,17	0,2	1011,4	7,2	2,9

Подадим на вход по влажности сигнал произвольного вида с рисунка 75. Температуру вернем к первоначальным значениям. Все остальные параметры оставим без изменений.

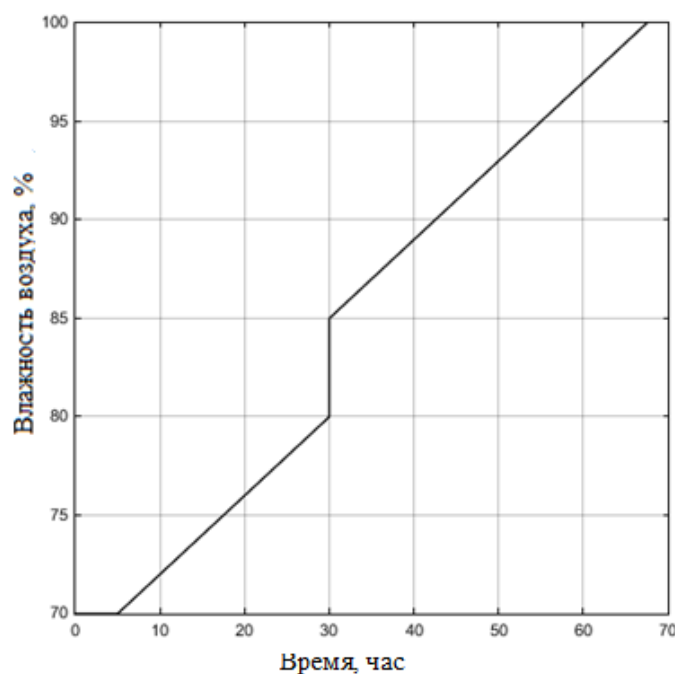


Рис. 75 - График входной переменной «влажность» произвольной формы

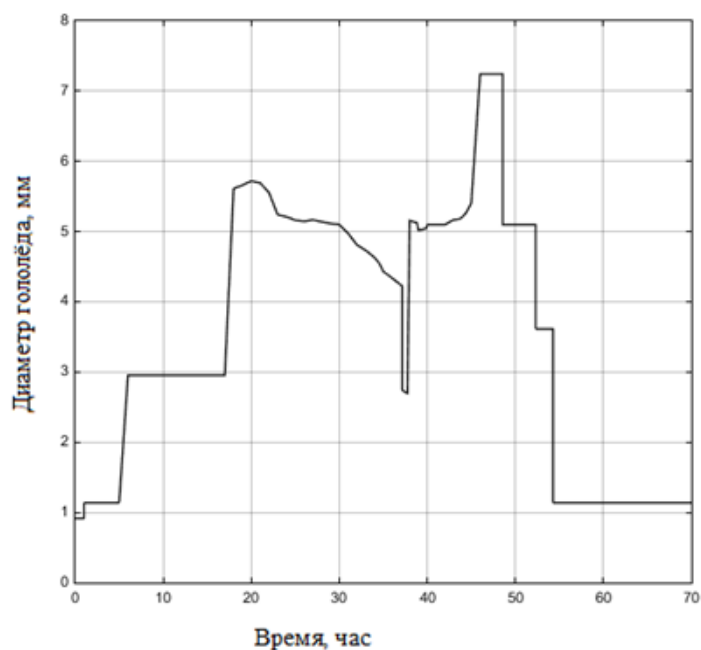


Рис. 76 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход влажности произвольной формы с рисунка 75

На рисунке 76 показано, что максимальное значение в 7,3 м/с достигается на отрезке в 45-49 часов. Параметры входных переменных: температура = -21 - -22°C, скорость нарастания гололёда = 2 - 2,1 мм/час, влажность = 92 - 93%, направление ветра = 225 - 240 град. Близкую по параметрам точку в статистических данных найти не удалось, соответственно невозможно и высчитать процент отклонения.

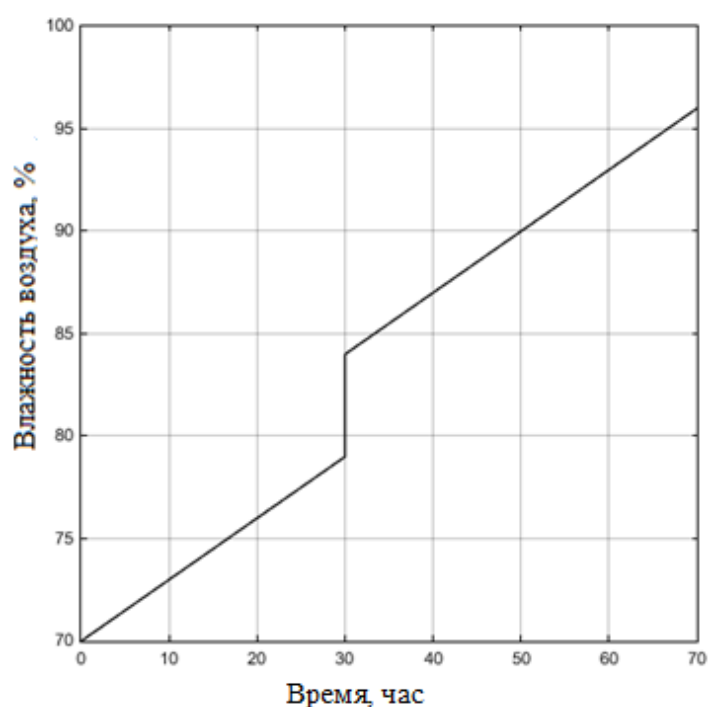


Рис. 77 - График входной переменной «влажность» произвольной формы

Подадим на вход по влажности сигнал произвольного вида с рисунка 77. Все остальные параметры оставим без изменений.

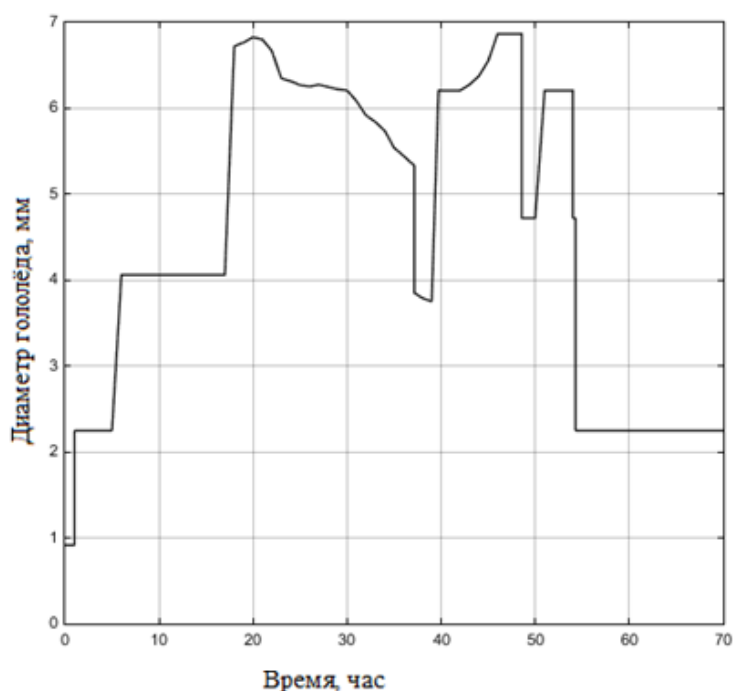


Рис. 78 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход влажности произвольной формы с рисунка 77

На рисунке 78 показано, что максимальное значение в 6,8 м/с достигается на отрезке в 45-49 часов, как и в предыдущем случае. Параметры входных переменных также совпадают с параметрами предыдущего случая, соответственно и близкую по параметрам точку в статистических данных найти не удалось.

Подадим на вход по влажности сигнал произвольного вида с рисунка 79. Все остальные параметры оставим без изменений.

Как видно на рисунке 80, максимальное значение в 6,8 м/с достигается на отметке в 20 часов. Параметры входных переменных: температура = -13°C, скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 75%, направление ветра = 100 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 21. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 13,3 %. Существенное расхождение может быть обусловлено меньшим приближением входных данных к статистическим.

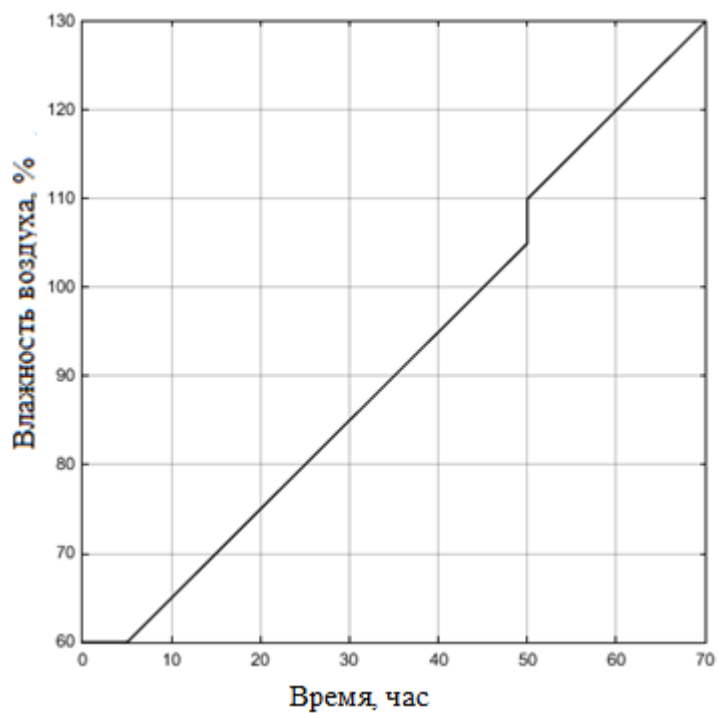


Рис. 79 - График входной переменной «влажность» произвольной формы

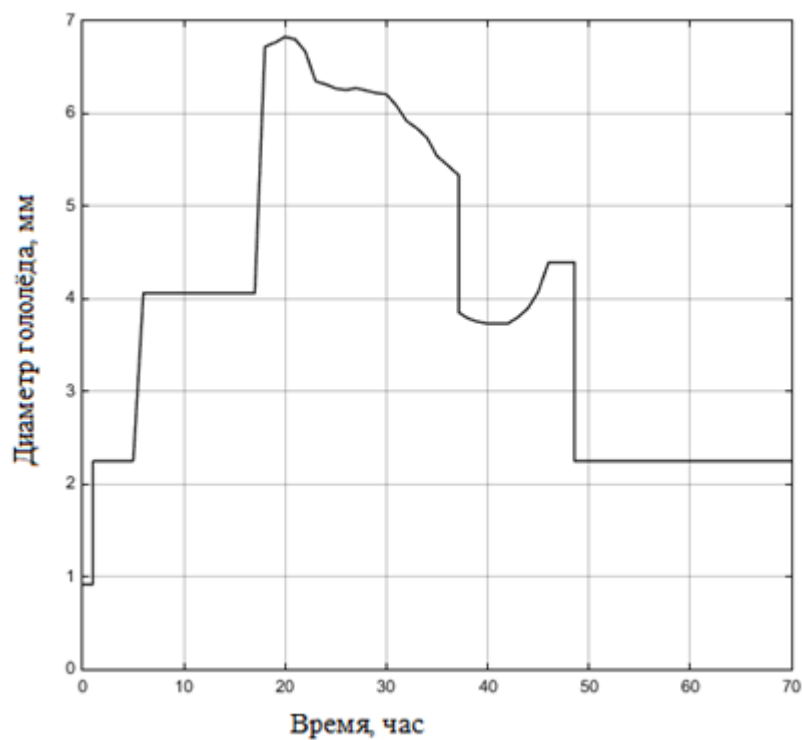


Рис. 80 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход влажности произвольной формы с рисунка 79

Таблица 21

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с
рисунка 80

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-14,7	2	60	89	7	6	1,17	0,2	1011,4	7,2	2,9

Подадим на вход по направлению ветра сигнал произвольного вида с рисунка 81. Влажность вернем к первоначальным значениям. Все остальные параметры оставим без изменений.

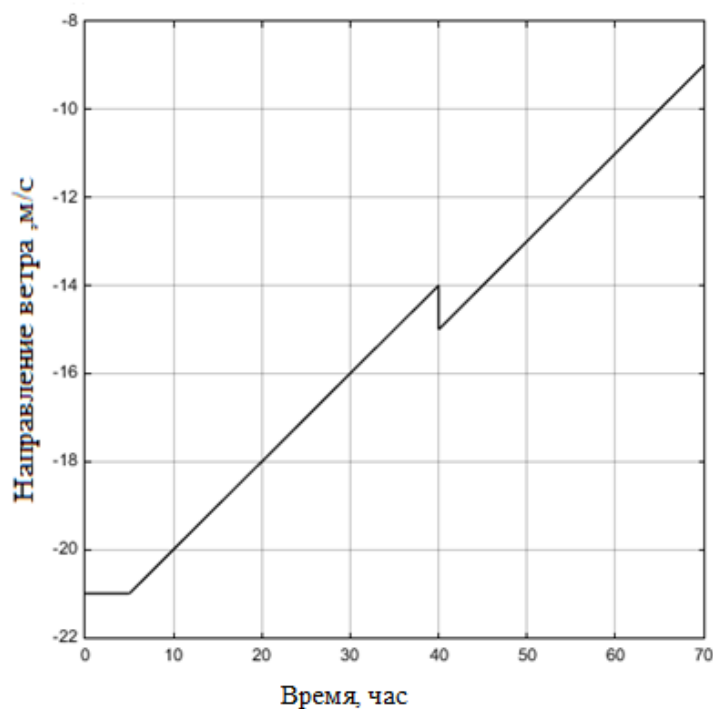


Рис. 81 - График входной переменной «направление скорости ветра»
произвольной формы

На рисунке 77 показано, что максимальное значение в 6,2 м/с достигается на отметке в 23 часа. Параметры входных переменных: температура = -14°C, скорость нарастания гололёда = 1,2 мм/час, влажность = 77%, направление ветра = 115 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 21. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 3,33 %.

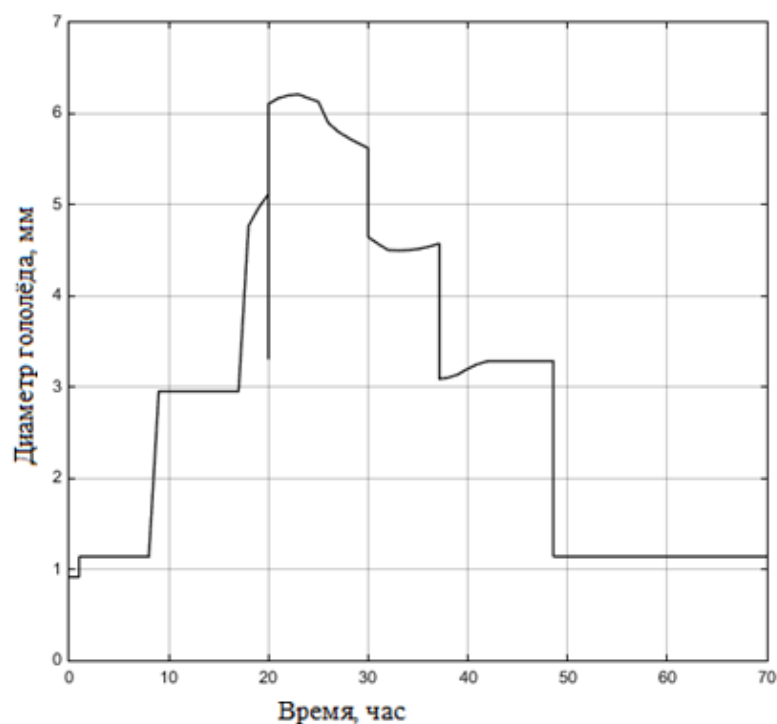


Рис. 82 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход направления скорости ветра с рисунка 81

Подадим на вход по направлению ветра сигнал произвольного вида с рисунка 83. Все остальные параметры оставим без изменений.

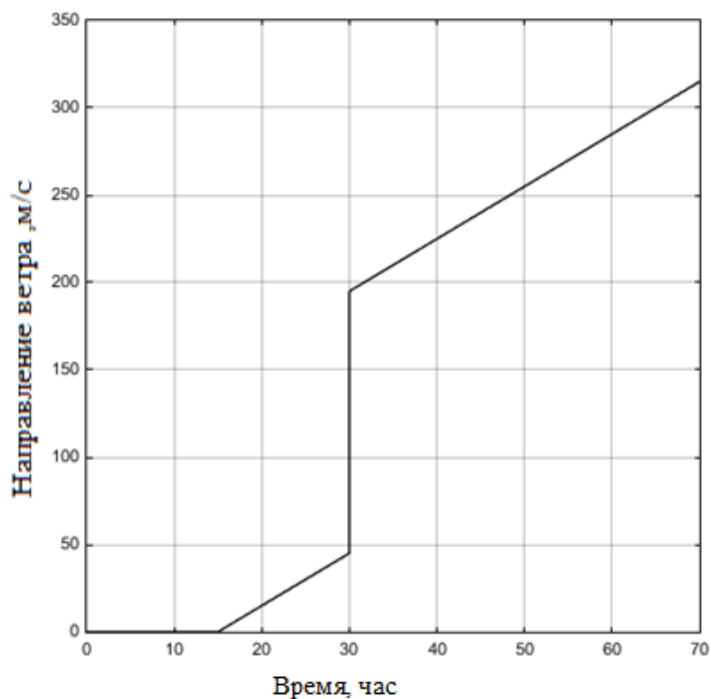


Рис. 83 - График входной переменной «направление скорости ветра» произвольной формы

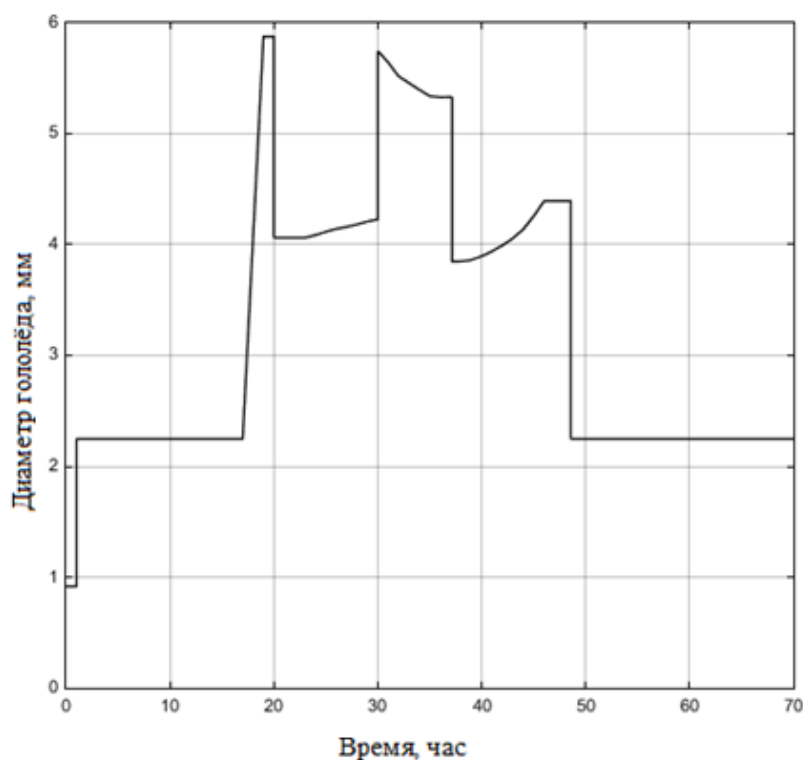


Рис. 84 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход направления скорости ветра с рисунка 83

На рисунке 84 показано, что максимальное значение в 5,9 м/с достигается на отметке в 20 часов. Параметры входных переменных: температура = -13°C, скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 75%, направление ветра = 20 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 21. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 1,67 %.

Таблица 21

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с рисунка 84

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-13,6	2	10	90	6	8	0,75	0,22	1017,4	5,7	5,0

Подадим на вход по направлению ветра сигнал произвольного вида с рисунка 85. Все остальные параметры оставим без изменений.

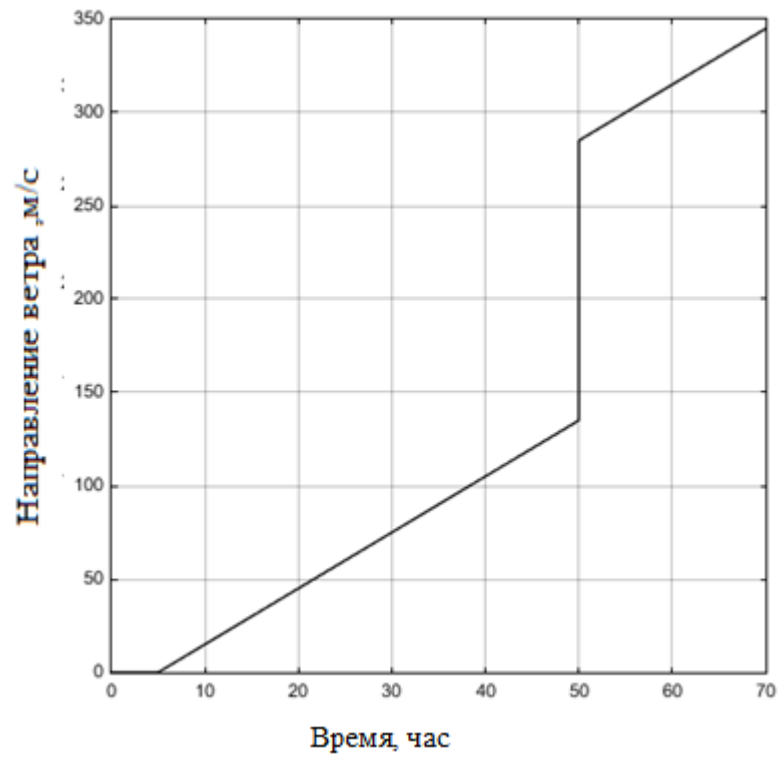


Рис. 85 - График входной переменной «направление скорости ветра» произвольной формы

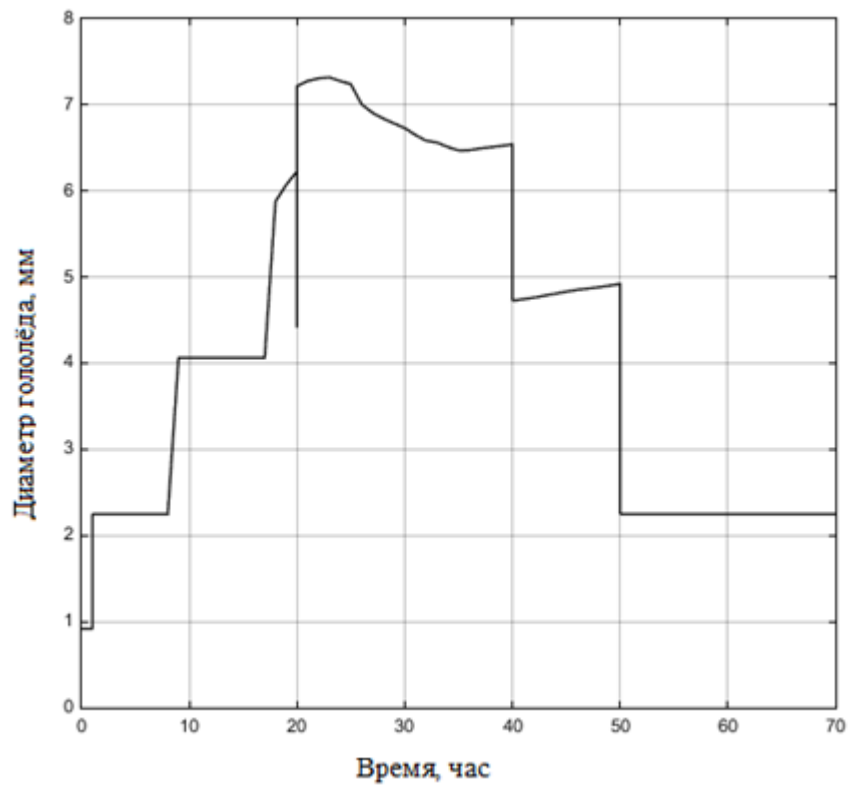


Рис. 86 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход направления скорости ветра с рисунка 85

На рисунке 84 показано, что максимальное значение в 7,2 м/с достигается на отметке в 23 часа. Параметры входных переменных: температура = -14°C, скорость нарастания гололёда = 1,2 мм/час, влажность = 77%, направление ветра = 60 град. Точка находится близко к статистическим данным, представленным в таблице 22. Разница между результатом моделирования и статистическими данными составляет 2,85 %.

Таблица 22

Параметры из статистической базы, наиболее близкие, к точке максимума с рисунка 87

t_{nach}	v_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-14,7	2	60	89	7	6	1,17	0,2	1011,4	7,2	2,9

Подадим на вход по направлению ветра, температуре и влажности сигналы произвольного вида, изображенные на рисунках 69, 75 и 81 соответственно. Все остальные параметры оставим без изменений.

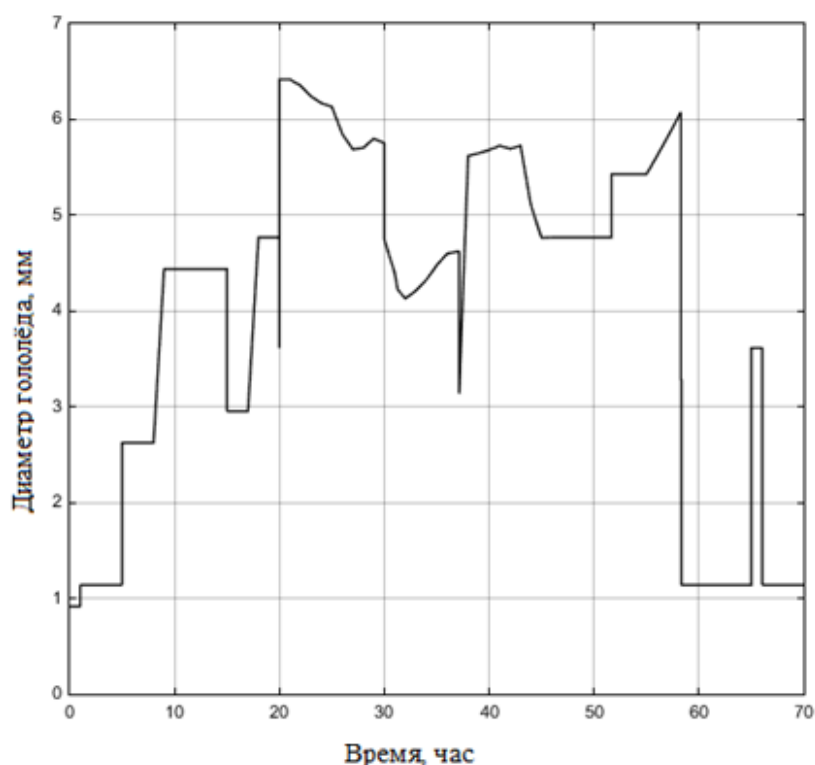


Рис. 87 - График выходной переменной «Диаметр гололёда» при подаче на вход влажности, температуры и направлению скорости ветра произвольной формы

На рисунке 87 показано, что максимальное значение в 6,4 м/с достигается на отметке в 20 часов. Параметры входных переменных: температура = -16 - -24°C,

скорость нарастания гололёда = 1,1 мм/час, влажность = 68%, направление ветра = 50 град.

Несмотря на широкий диапазон температур, точку с параметром влажности в 68 % и направление ветра в 50 град. В статистических данных подобрать не удалось.

Возьмем для проверки корректности работы системы 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 [].

Внесем в модель данные с рисунка 88 и выведем график выходной переменной. Приведем результат моделирования на рисунке 89.

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	1025.7
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	3	2	1000 м слаб. переохл. морось (гололёд) {дождь}	10/10 100 м [St]	-0.4	-0.8	97	-4	-4	по сезону	1027.1
03 18.11	3	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	3	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. 88 - Метеоданные за период с 16 по 19 ноября 2018 г. в городе Ставрополь

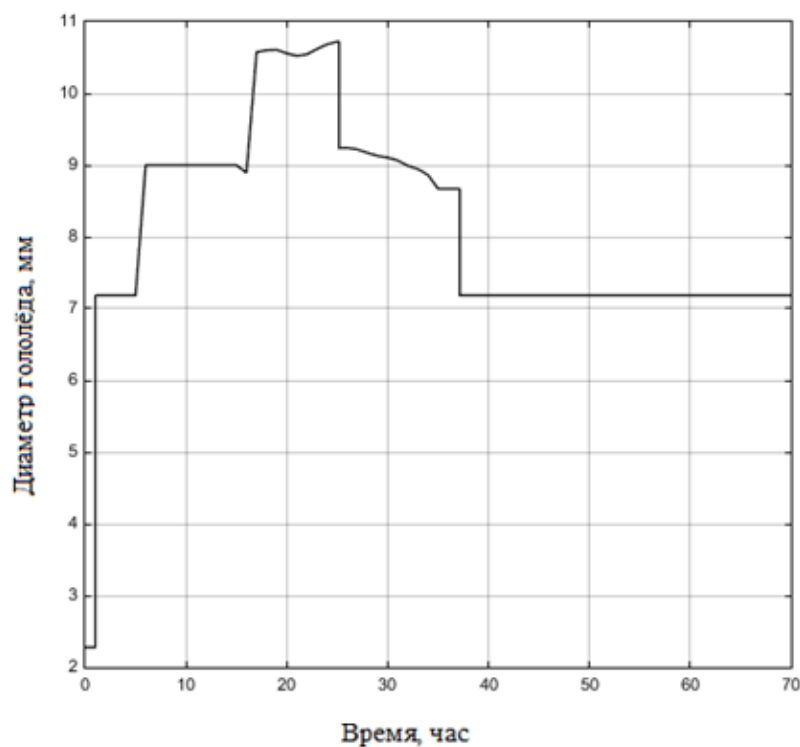


Рис. 89 – Результат моделирования при исходных данных, приведённых на рисунке 63.

Как видно из рисунка 89, результат моделирования системы при использовании реальных данных адекватен. Максимальное значение достигает 10,5 мм, что соответствует предельным нагрузкам, приводящим к обрушениям ЛЭП.

Выводы по главе:

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.

Оценка данной системы, при использовании реальных статистических данных за 2018 г. показали работоспособность системы и подтверждение того, что протекание процесса в течение 20 часов привело к разрушениям на ЛЭП.

Заключение

На основании анализа существующих систем мониторинга и прогнозирования гололёдообразования на проводах линий электропередач выявлено, что не существует однозначного решения по разработке системного подхода к созданию предупредительной и исполнительной составляющей системы управления борьбы с гололедом. Имеющиеся сведения в литературе говорят о том, что единого математического описания, учитывающего наибольшее количество факторов, влияющих на процесс гололедообразования не существует. Все имеющиеся решения по системам мониторинга гололедообразования относятся к автономным объектам, не могут быть распространены на распределенный объект, которым является линия электропередач.

В силу того, что ряд факторов, влияющих на процесс гололедообразования, описывается не количественными, а качественными показателями, то для учета этих факторов должна быть разработана система с элементами искусственного интеллекта, использующая нечеткую логику и позволяющая обрабатывать эти показатели.

Данную систему предложено настраивать с помощью обработки статистического массива данных. предложен подход, опирающийся на математические методы для обработки статистических данных, снижающий временные ресурсы для выявления рабочих областей нечеткого идентификатора. 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.

В работе рассмотрен один из возможных вариантов построения системы прогнозирования на основе нечёткого подхода.

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 гололёдообразования при вариации входных параметров, а также позволяет оценить влияние каждого из входных параметров на скорость изменения гололёдообразования и на размер выходной величины.

Список сокращений и условных обозначений

S - Шифр вида отложения (13 – кристаллическая изморось, 14 – зернистая изморось, 16 – гололёд);

T_{nach} - Время начала нарастания отложения, час;

$Pr1$ - Продолжительность стадии нарастания, час;

$Pr2$ - Продолжительность случая нарастания отложения, час;

t_{nach} - Температура воздуха в начале нарастания отложения, °C;

N_{nach} - Направление ветра в начале нарастания отложения, град;

v_{nach} - Скорость ветра в начале нарастания отложения, м/с;

t_{max} - Температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, °C;

N_{max} - Направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, град;

v_{max} - Скорость ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с;

D - Диаметр отложения, мм;

L - Толщина отложения, мм;

Day – Дата начала случая отложения;

t_{pp} - Температура поверхности почвы, °C;

t_{tr} - Температура точки росы, °C;

H - Относительная влажность воздуха, %;

D_n – Дефицит насыщения, гПа;

P_s - Атмосферное давление на уровне станции, мм рт. ст.;

P_{ym} - Атмосферное давление на уровне моря, мм рт. ст.;

O_O – Облачность (Общее количество облаков), в баллах;

O_N - Облачность (Количество облаков нижнего яруса), в баллах;

$OCc-Cs$ – Облачность формы Cc- Cs, в баллах;

$OAc-As$ - Облачность формы Ac-As, в баллах;

$OCu-Cb$ - Облачность формы Cu-Cb, в баллах;

$OSt-Sc$ - Облачность формы St-Sc, в баллах;

$OFr-nb$ - Облачность формы Fr-nb, в баллах;

W – Погода в срок наблюдения;

w_w – Погода в последний час наблюдения.

v_{sn} – Скорость стадии нарастания, мм/час

D_m - Диаметр отложения согласно моделирования в программном комплексе MathLab, мм;

$\Delta\%$ - Процент отклонения смоделированного диаметра от статистического, %

K_v – Коэффициент к возмущающему воздействию

Список литературы

1. Опыт эксплуатации ЛЭП 330-500 кВ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий. Распределенная система автоматического наблюдения за гололедом. // Информационно-аналитический журнал ЭнергоINFO. URL: www.energo-info.ru/images/pdf/mes4/15.pdf (дата обращения 25.10.2011).
2. Самарин, А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП / А. Самарин, В. Масалов // Control Engineering Россия. – 2013. – №3. – С. 88-94.
3. Шевченко, Н.Ю. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в камышинских электрических сетях / Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева, Н.П. Хромов, А.Г. Сошинов // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 127-132.
4. Закинян, Р.Г. К теории обледенения самолетов / Р.Г. Закинян // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 9. – С. 29-36.
5. Кузнецов, А. Л. Борьба с обледенением стационарных газотурбинных установок / А. Л. Кузнецов, Л. А. Кузнецов. – Л. : Недра, 1980. – 120 с.
6. Мазин, И.П. Физические основы обледенения самолетов / И.П. Мазин. – М. : Гидрометеиздат, 1957. – 120 с.
7. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередач и в контактных сетях: дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
8. Словигов С.В. Совершенствование противообледенительной системы воздухозаборного очистительного устройства газотурбинной установки типа ПС-90, эксплуатируемой в наземных условиях: дис. канд. техн. наук. – Пермь, 2008. – 192 с.
9. Хромов Н.П. Информационно-измерительная система определения параметров гололедно-ветровых ситуаций: автореф. дис. канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 11 с.
10. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок: автореф. дис. доктора техн. наук. – Москва, 2011. – 36 с.
11. Сацук Е.И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дис. доктора техн. наук. – Новочеркасск, 2011. – 314 с.
12. Ярославский Д.А. Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода: дис. .канд. техн. наук. – Казань, 2017. – 135 с.
13. <http://method.meteorf.ru/methods/avia/ice/ice>. (дата обращения 29.12.2019) Методический кабинет гидрометцентра России - <http://method.meteorf.ru/> (дата обращения 29.12.2019)

- 14.8http://www.rusnauka.com/4._SVMN_2007/Tecnic/19701.doc.htm (дата обращения 29.12.2019) Архив научных публикаций - <http://www.rusnauka.com/> (дата обращения 29.12.2019)
15. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев, К.Е. Костин // Ученые записки КнАГТУ – Комсомольск-на-Амуре, 2015. № 3. – С. 18-25.
16. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуальной системы борьбы с гололедом на проводах ЛЭП / С.И. Сухоруков // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 15-23 января 2015 г. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 249-253.
17. Сухоруков, С.И. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный // Электротехнические системы и комплексы № 1, 2014 – Магнитогорск, 2014 - С. 14-17
18. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм : Учебное пособие для вузов /А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1983. – 464 с.
19. Пат. 91230 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для перемещения по проводу линии электропередачи средства для удаления льда с провода (варианты) / Быстров И.В., Быстров Ю.В., Галеев Л.Р., Петаев В.В., Петаев В.В. ; заявитель и патентообладатель Быстров И.В., Быстров Ю.В., Галеев Л.Р., Петаев В.В., Петаев В.В. – № 2009126163/22; заявл. 07.07.2009; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3 (II ч.). – 2 с. : ил.
20. Самарин, А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП / А. Самарин, В. Масалов // Control Engineering Россия. – 2013. – №3. – С. 88-94.
21. Сухоруков, С.И. К вопросу разработки математической модели вынужденных колебаний обледеневшего провода под действием периодически возникающей силы Ампера / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.А. Орлов // Математическое моделирование физических и информационных процессов: сборник материалов Всероссийской заочной научно-практической конференции, Биробиджан, 25 декабря 2012 г. – Биробиджан, 2013. – С. 77-82.
22. Сухоруков, С.И. К вопросу определения текущей частоты импульсов при удалении гололеда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – Магнитогорск, 2014. № 2, Том 1. – С. 10-13.
23. Выпрямители для плавки гололёда на линиях электропередач серии В-ТППД климатического исполнения У1 // Открытое Акционерное Общество

- «Электровыпрямитель». URL: <http://elvpr.ru/preobraztechnic/gololed/V-TPPD-14k-U1.php> (дата обращения 03.07.2015).
24. Выпрямители для плавки гололёда на линиях электропередач серии В-ТППД климатического исполнения УЗ// Открытое Акционерное Общество «Электровыпрямитель». URL: <http://elvpr.ru/preobraztechnic/gololed/V-TPPD-14k.php> (дата обращения 03.07.2015).
 25. Хромов Н.П. Экстремальные гололедно-ветровые ситуации на высоковольтных линиях электропередачи. // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: Тезисы докладов Всероссийской конференции, г. Камышин, 24-27 апреля 2002 г. - С.43.
 26. Минуллин, Р. Г. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием [Текст] / Р. Г. Минуллин, Д. Ф. Губаев. – Казань.: КГЭУ, 2010. – 208 с.
 27. Способ обнаружения гололеда на линиях электропередачи [Текст] / Р. Г. Минуллин [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2006. – № 3. – С. 46-50.
 28. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах / Г. В. Бялобжеский [и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 112 с.
 29. Веселов, Е. П. Метеорологические условия образования и прогноз гололедицы: метод. письмо / Е. П. Веселов, Л. М. Рудаков. – М.: Гидрометеиздат, 1971. – 16 с.
 30. Прогнозирование зимней скользкости автомобильных дорог / Леонович И. И., Богданович С. В., Жилинский В. И. – М.: Вестник БНТУ, № 1, 2007. – 50 с.
 31. 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 (с. 7-13). - Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т / Уфа: УГАТУ, 2011.– 267 с.
 32. Отчет о НИР: 1.1.1.2: Разработка проекта технологии подготовки прогностической карты особых явлений погоды для полетов авиации на нижних уровнях (заключительный). № гос. Регистрации 01.2.007 06153, М., 2007, 112 с.
 33. Отчет о НИР: 1.1.1.7: Совершенствование методов и технологий прогнозов по аэродрому и на воздушных трассах (заключительный). № гос. регистрации 01.02.007 06153, М., 2007, 97 с.
 34. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации (ред. Абрамович К.Г., Васильев А.А.), 1985, Л., Гидрометеиздат, 301 с.
 35. Rauber R.M., Ramamurthy M.K., Tokay A. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St.–Valentine’s day ice storm // Weather and Forecasting. – 1994. – Vol. 9. – P. 183-208.
 36. Иванова А. Р., 2009: Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов. Метеорология и гидрология, 2009, № 6, с. 33 - 46.
 37. Thompson G., Brintjes R.T., Brown B.G., Hage F., 1997: Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part 1: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program. Weather and Forecasting, v. 12, pp. 848-889.

38. Инструкция гидрометеорологическим станциям (АМСГ, постам) по информации об опасных гидрометеорологических явлениях. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 15 с.
39. Overland J. E. Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures / J. E. Overland // *Weather and Climate*. – 1990. – No 5. – P. 62–77.
40. Overland J. E. Prediction of vessel icing / J. E. Overland, C. H. Pease, R. W. Preisendorfer, A. L. Comiskey // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. – 1986. – No 25. – P. 1793–1806.
41. Методические указания по прогнозу обледенения судов. Проект ГУГМС ЛГМИ, Л. 1975. 43 с.
42. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, часть. III. Служба морских гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 143 с.
43. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Служба метеорологических прогнозов. Части III, IV, V, VI, М. Гидрометеиздат. 1978. 55с.
44. Сборник карт и описаний типовых атмосферных процессов, обуславливающих возникновение на акватории северной части Тихого океана опасных и особо опасных для мореплавания и рыболовства гидрометеорологических явлений. // Приморское управление гидрометеослужбы. М.: Гидрометеиздат. 1983. 95 с.
45. Шехман А.И. Гидрометеорологические условия обледенения судов. М. НИАК, вып. 45. 1967 С. 51-64.
46. Абрамович К.Г. Прогноз обледенения самолетов. Л.: Гидрометеиздат. - 1979.-С. 25.
47. Бялобжеский Г.В., Дербенева М.М. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах.- М.: Транспорт, 1975.
48. Расников В.П. Оценка состояния проезжей части дороги в зимний период. - Автомоб. дороги, 1975, № 9.
49. Расников В.П., Антоненко Л.В.. О сроках ликвидации зимней скользкости. - Автомоб. дороги, 1984, № II.
50. Бучнев В.А. Автоматизация прогнозирования опасных явлений погоды / В. А. Бучнев, С.П. Бочкин // Совершенствование наземного обеспечения авиации: Межвузовский сборник научно-методических трудов. Часть 2. Воронеж: ВВАИИ, 2000, с. 174-178.
51. Cortinas J. A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America // *Mon. Weather Rev.* – 2000. – Vol. 128. – P. 3574–3588.
52. Бучнев В.А. География и регион. Наблюдения, анализ и прогноз метеорологических условий/ В.А. Бучнев, А.В. Смирнов // Материалы Международной научно-практической конференции (30.09-4.10.2002 г, г. Пермь) / Пермский университет. — Пермь, 2002. С. 88-91.
53. Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Субъективный и объективный анализ атмосферных фронтов. 1. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // *Метеорология и гидрология*. – 1998. – № 7. – С. 19–30.
54. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // *Метеорология и гидрология*. – 2000. – № 7. – С. 5–16.
55. Качурин Л.Г. Обледенение судов: Учебное пособие / Л.Г. Качурин, И.А. Смирнов, ЛИ. Гашин. Л.: ЛПИ, 1980. - 56 с.

56. Клинов Ф.Я. Нижний слой атмосферы в условиях опасных явлений погоды / Ф.Я. Клинов. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. 256 с.
57. Кобышева Н.В. Климатологическая обработка метеорологической информации: Учебное пособие / Н.В. Кобышева, Г.Я. Наровлянский. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. 296 с.
58. Мартинов М.И. Краткосрочный прогноз метеорологических условий обледенения самолётов на земле и ВПП в аэропорту София / М.И. Мартинов, Н.Д. Богачёв, А.Г. Богачёв // Метеорология и гидрология. 1983. - № 7. - С. 54-60.
59. Михайлов А.В. Об учёте температурного фактора в вопросах прогнозирования и ликвидации гололёда на автомобильных дорогах / А.В. Михайлов // Повышение эксплуатационных качеств автомобильных дорог: Сб. науч. тр. / ГипродорНИИ. 1983. - Вып. 40. - С. 67-80.
60. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. Л.: Гидрометеиздат, 1985.-302 с.
61. Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A. Freezing precipitation in Russia and the Ukraine // Adv. Geosci. – 2007. – Vol. 10. – P. 25–29.
62. Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A. Freezing precipitation in Russia and the Ukraine: conditions of formation and an approach to probabilistic forecasting // EGU General assembly, Vienna, 02-07 April 2006. – P. 288.
63. Бычкова В.И., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю. Прогноз низовой метели с помощью выходной продукции численной модели атмосферы. Метеорология и гидрология, 2018. N1. 15-27
64. И.М.Губенко, К.Г. Рубинштейн. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево - дождевых облаков. Метеорология и Гидрология, 2017, N2, 5-17.
65. Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г., Гибридный метод прогноза порывов ветра, Оптика атмосферы, 2018, N 10.
66. К.Г.Рубинштейн, Г.В.Елисеев, Р.Ю.Игнатов, М.В.Ширяев. Первые оценки качества работы системы раннего предупреждения о метеорологических угрозах для Мурманской области. Арктика, Экология и Экономика, 2014, 77-85.
- 67.К.Г.Рубинштейн, Р.Ю.Игнатов, Ю.И. Юсупов, Д.Е. Титов Прогноз гололедно – изморозевых отложений на проводах ВЛ с использованием тепло-балансного метода прогнозов / Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Титов Д.Е. / ООО «Научно-Производственный Центр «Мэп Мейкер».
68. Analysis of application of models to assess parameters of ice formation on overhead electric power lines / Titov D.E., Ugarov G.G., Ustinov A.A.// Power Technology and Engineering: Volume 51, Issue 2 (2017), Page 240-246.
69. Monitoring the Intensity of Ice Formation on Overhead Electric Power Lines and Contact Networks/D. E. Titov, G. G. Ugarov, A. G. Soshinov//Power Technology and Engineering: Volume 49, Issue 1 (2015), Page 78-82.
70. ARTHUR T. DEGAETANO, BRIAN N. BELCHER, AND PAMELA L. SPIER Ashkan Zarnani, Petr Musilek, Xiaoyu Shi, Xiaodi Ke, Hua He, Russell Greiner. Learning to predict ice accretion on electric power lines. Journal Engineering

Applications of Artificial Intelligence archive, April 2012. Volume 25. Issue 3. P. 609-617.

71. Crevier, L.-P., and Delage Y. METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada, November 2001. Journal of applied meteorology. Vol. 40. P. 2026-2037.
72. Shao1 J., Laux1 S J, Trainor1 B J & R E W Pettifer2 1 Vaisala Ltd, Vaisala House, 349 Bristol Road, Birmingham B5 7SW, UK 2 Scientific and Technical Management Ltd., The Croft, 22, Vyne Road, Sherborne St John RG24 9HX, UK
73. DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L. Short-term ice accretion forecasts for electric utilities using the weather research and forecasting model and a modified precipitation-type algorithm. Weather and Forecasting, 2008. Vol. 23. P. 878–853.
74. G. Thompson, et al. Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Predict Ground / Structural Icing, IWAIS XIII, Andematt, September 8 to 11, 2009, 2-10
75. B. Egil K. Nygaard, Evaluation of icing simulations for the “COST727 icing test sites” in Europe. IWAIS XIII, Andematt, September 8 to 11, 2009, 11-16
76. Сухоруков, С. И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьёв, К. Е. Костин // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3(41). – С. 148-158.
77. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В. Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.
78. Бургсдорф, В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды ГГО. – 1947. – Вып. 3. – С. 3-12.
79. Буков, В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н. Буков - М.: Наука, 1987. - 232 с.
80. Ноткин, Б.С., Степанюк, В.В., Змеу, К.В., Метод синтеза оптимальных нейросетевых регуляторов // Сборник докладов конференции "Молодежь и научно-технический прогресс". Часть 1. Владивосток: ДВГТУ, 2004. -с. 232-234
81. Дьяков, А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 161 с.
82. Засыпкин, А. С. Интегральная оценка эффективности схем плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 42-45.
83. А.с. 909739 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с проводов линий электропередачи / И.Р. Пекарь, И.Г. Голикова, В.А. Бочаров (СССР). – № 2961501/24-07 ; заявл. 15.07.1980; опубл. 28.02.1982, Бюл. № 8. – 3 с.
84. А.с. 936149 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / Ф.Х. Усманов, В.Ю. Кабашов, Р.З. Шайхитдинов (СССР). – № 2929276/24-07 ; заявл. 23.05.1980; опубл. 15.06.1982, Бюл. № 22. – 3 с.
85. А.с. 957332 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / В.Ю. Кабашов (СССР). – № 3215097/24-07 ; заявл. 04.12.1980; опубл. 07.09.1982, Бюл. № 33. – 4 с.
86. Алмаев, М.А. Электромеханическое вибрационное устройство очистки линий электропередачи от гололедных отложений / М.А. Алмаев, А.В. Трофимов // Сборник научно-исследовательских работ аспирантов финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности.

- г. Новочеркасск, октябрь 2010 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.(НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2010. – С. 3-5.
- 87.Титов Д.Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередач и в контактных сетях: Диссертация на соискание учёной степени кандидата наук/ Д.Е.Титов. : 2014 - 150 с.
 - 88.Титов, Д.Е. Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / Д.Е. Титов // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 31-34.
 - 89.Елизарьев, А.Ю. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей [Текст] / А.Ю. Елизарьев, А.Р.Валеев // Вестник УГАТУ. –Т. 19, № 4 (70). – 2015. – С. 59 – 65.
 - 90.Елизарьев, А.Ю. Вопросы гололедообразования на территории РБ / А.Ю. Елизарьев, А.И. Семендяев // Электротехнические комплексы и системы. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 7 –10.
 - 91.Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В.Е. Бучинский. – Л. : Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.
 - 92.Килин П.М. Статистические методы обработки данных. /П. М. Килин, Н. И. Чекмарева. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. — 128 с.
 - 93.Громыко Г. Л. Теория статистики. Практикум. — 3-е изд., доп. и перераб. — М.: Ин-фра-М, 2010. — 205 с.
 - 94.Назаров М. Г. Статистика. Учебно-практическое пособие. — М.: КНОРУС, 2010. — 480 с.
 - 95.Октябрьский П. Я. Статистика: учеб. — М: ТК Велби, Изд. Проспект, 2010. — 328 с.
 - 96.Елисеева И.И. Статистика: учебник / И. И. Елисеева; под ред. И. И. Елисеевой. — Москва: Проспект, 2011. — 448 с.
 - 97.Минашкин В.Г. Статистика: учебник / В. Г. Минашкин; под ред. В.Г, Минашкина. — М.: ТК Вел-би, Изд-во Проспект, 2006. — 272 с.
 - 98.Статистика. Учебник. Под ред В. С. Мхитаряна. — М.: Экономистъ, 2011. — 671 с.
 - 99.Экономическая статистика: учебник / под ред. Ю. Н. Иванова. — М.: ИНФРА-М, 2006. —736 с.
 100. V. S. Popova, V. A. Solovyev, Opportunity Analysis of Mathematic Description for Ice-Accretion / V. S. Popova ; Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) 2020.
 101. В. А. Соловьев, А. Г. Владыко, В. И. Суздорф, С. П. Черный, Нечёткое управление системами автоматизированного электропривода / В. А. Соловьев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2001. – С. 79-80.
 102. Соловьев, В. А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества / В. А. Соловьев, А. В. Кончин // Сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – С. 55-59.

103. В.С.Попова, В.А. Соловьев, Разработка и исследование методики синтеза нечёткого идентификатора по прямым показателям, В.С.Попова / Ученые записки № I-1 (33) 2017 г. С. 20-27
104. В.С.Попова, В.А. Соловьев Алгоритмические и управленческие задачи модуля прогнозирования процесса гололёдообразования, В.С.Попова / Научно-техническое творчество аспирантов и студентов – Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 09-20 апреля 2018 г. С. 422-424
105. Кудинов, Ю.И. Нечёткие системы управления //Техническая кибернетика. – 1990. – № 5. – С.196–201.
106. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин – М.: Наука, 1990. – 272с.
107. Соловьев, В.А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества/ В.А. Соловьев, А.В. Кончин //Сб. научн. трудов междунар. науч.-т. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре. – 2003. – 55 – 59.
108. Соловьев, В.А. Программа оптимизации распределения функций принадлежности нечёткого регулятора при заданных показателях качества системы управления. / В.А. Соловьев, А.С. Гудим, С.П.Черный // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612124.
109. Н.В.Зубова, В.Д.Рудых, Поиск оптимальных функций принадлежности нечетких множеств для оптимизации систем управления ветроэнергетической установкой, Н.В.Зубова / Технологии и технические средства механизированного производ-ства продукции растениеводства и животноводства 2018 С. 51-55
110. Д.И. Батищев, Генетические алгоритмы решения экстремальных задач/ Д.И. Батищев; Нижегородский госуниверситет. — Нижний Новгород: 1995.с. — 62с.
111. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы/ Под ред. В.М. Курейчика. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 320 с. — ISBN 5-9221-0510-8.
112. В.Т.Поляк Введение в оптимизацию / В.Т. Поляк. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 384 с.
113. А.В.Лисин, Алгоритм имитации отжига для задач непрерывной оптимизации / А.В.Лисин // Ползуновский вестник. – 2014. – No 4. – с. 175-179.
114. Н. S., Rad, C. A Lucas, Recommender System based in Invasive Weed Optimization Algorithm // IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007). –2007. –P. 4297-4304.
115. A. Kaveh, T. Bakhshpoori, M. Ashoory, An efficient optimization procedure based on cuckoo search algorithm for practical design of steel structures // International Journal of Optimization in Civil Engineering.–2012.–No 2. –P. 1-14.
116. X.-S. Yang, Firefly Algorithm, Stochastic Test Func-tions and Design Optimization // International Journal of Bio-Inspired Computation.–2010. –No 2. –P. 78-84.
117. С.Д. Штовба, Муравьиные алгоритмы // Ехро-nenta Pro. 2003. No 4. С. 70-75.
118. А. Левитин, Алгоритмы: введение в разработку и анализ // М.:Вильямс, 2006. –575 с.

119. Е. А. Боронихина, Муравьиный алгоритм для решения задачи коммивояжера -Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем». Томск, 2014 г.
120. V. S. Popova, V. A. Solovyev, Opportunity Analysis of Mathematic Description for Ice-Accretion / V. S. Popova ; Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) 2020.
121. В. А. Соловьев, А. Г. Владыко, В. И. Суздорф, С. П. Черный, Нечёткое управление системами автоматизированного электропривода / В. А. Соловьев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2001. – С. 79-80.
122. Соловьев, В. А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества / В. А. Соловьев, А. В. Кончин // Сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – С. 55-59.
123. В.С.Попова, В.А.Соловьев, Разработка и исследование методики синтеза нечёткого идентификатора по прямым показателям, В.С.Попова / Ученые записки № I-1 (33) 2017 г. С. 20-27
124. В.С.Попова, В.А.Соловьев Алгоритмические и управленческие задачи модуля прогнозирования процесса гололёдообразования, В.С.Попова / Научно-техническое творчество аспирантов и студентов – Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 09-20 апреля 2018 г. С. 422-424
125. Кудинов, Ю.И. Нечёткие системы управления //Техническая кибернетика. – 1990. – № 5. – С.196–201.
126. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин – М.: Наука, 1990. – 272с.
127. Соловьев, В.А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества/ В.А. Соловьев, А.В. Кончин //Сб. научн. трудов междунар. науч.-т. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре. – 2003. – 55 – 59.
128. Соловьев, В.А. Программа оптимизации распределения функций принадлежности нечёткого регулятора при заданных показателях качества системы управления. / В.А. Соловьев, А.С. Гудим, С.П.Черный // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612124.
129. Н.В.Зубова, В.Д.Рудых, Поиск оптимальных функций принадлежности нечетких множеств для оптимизации систем управления ветроэнергетической установкой, Н.В.Зубова / Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства 2018 С. 51-55
130. V. S. Popova, V. A. Solovyev, 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); 08.12.2020, Scopus.

131. В.Т. Поляк Введение в оптимизацию / В.Т. Поляк. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 384 с.
132. Н. S., Rad, C. A Lucas, Recommender System based in Invasive Weed Optimization Algorithm // IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007). –2007. –Р. 4297-4304.
133. A. Kaveh, T. Bakhshpoori, M. Ashoory, An efficient optimization procedure based on cuckoo search algorithm for practical design of steel structures // International Journal of Optimization in Civil Engineering.–2012.–No 2. –Р. 1-14.
134. Мартинов М.И. Краткосрочный прогноз метеорологических условий обледенения самолётов на земле и ВПП в аэропорту София / М.И. Мартинов, Н.Д. Богачёв, А.Г. Богачёв // Метеорология и гидрология. 1983. - № 7. - С. 54-60.
135. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. Л.: Гидрометеиздат, 1985.-302 с.
136. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев, К.Е. Костин // Ученые записки КнАГТУ – Комсомольск-на-Амуре, 2015. № 3. – С. 18-25.
137. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуальной системы борьбы с гололедом на проводах ЛЭП / С.И. Сухоруков // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 15-23 января 2015 г. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 249-253.
138. Килин П.М. Статистические методы обработки данных. /П. М. Килин, Н. И. Чекмарева. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. — 128 с.
139. Громыко Г. Л. Теория статистики. Практикум. — 3-е изд., доп. и перераб. — М.: Ин-фра-М, 2010. — 205 с.
140. <https://newstracker.ru/news/incident/19-11-2018/pochti-100-obryvov-linij-elektroperedachi-proizoshlo-v-stavropole-v-vyходnye>
141. <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=34949&bday=16&fday=18&month=11&ayear=2018&bot=2>

Приложение 1

Текст программы, реализующей муравьиный алгоритм в программном комплексе MatLab:

```
%муравьиный алгоритм (берем температуру и влажность для станции Братолюбовка
% при диаметре отложения в 5 мм.)
tic
%clearvars -except cities
clearvars
% -----ИТЕРАЦИИ-----
% кол-во итераций ( поколений )
age = 2000;
% кол-во муравьев в поколении
countage = 26;
% кол-во городов
n = 26;
% -----ПАРМЕТРЫ-----
% альфа - коэффициент запаха, при 0 будем ориентироваться только на
% кратчайший путь
a = 1;
% бета - коэффициент расстояния, при 0 будем
% ориентироваться только на оставляемый запах
b = 2;
% коэффициент обновления, глобальное
e = 0.1;
% коэффициент обновления, локальное
p = 0.1;
% количество выпускаемых феромонов
Q = 1;
% баланс между лучшим городом и как в AS
q = 0.9;
% начальный феромон
ph = Q/(n*2000);
% -----ПАМЯТЬ-----
% матрица расстояний
dist = zeros(n,n);
% матрица обратных расстояний
returndist = zeros(n,n);
% матрица маршрута муравьев в одном поколении
ROUTEant = zeros(countage,n);
% вектор расстояний муравьев в одном поколении
DISTant = zeros(countage,1);
% вектор лучших дистанций на каждой итерации
bestDistVec = zeros(age,1);
```

```

% лучший начальный маршрут
bestDIST = inf;
% оптимальные маршруты
ROUTE = zeros(1,n+1);
% перестановка городов без повторений ( для выхода муравьев )
RANDperm = randperm(n);
% матрица вероятностей
P = zeros(1,n);
% максимальное значение вероятности
val = zeros(1);
% присваиваем номер города
getcity = zeros(1);
% индекс максимального значения вероятности
indexP = zeros(1);
% максимальное
minDISTiteration = zeros(1);
% генерация городов (x,y)
cities = [-27.5 275; -22.8 352; -27.2 258; -24.7 326; -26.7 107; -19.6 0;
          -22 108; -14 0; -30.6 246; -18.2 169; -12.4 322; -12.3 226; -27.6 298;
          -13.4 99; -34.4 276; -31.8 0; -28 225; -15.4 315; -18 135; -19.6 311;
          -30.9 108; -13.3 292; -16.5 67; -15.5 202; -12.3 292; -4.9 0];
% матрица начальных феромонов
tao = ph*(ones(n,n));
tao(logical(eye(size(tao)))) = 0;
% создаем матрицу расстояний и матрицу обратных расстояний
for i = 1:n
    for j = 1:n

        % dist ( расстояния )
        dist(i,j) = sqrt((cities(i,1) - cities(j,1))^2 + ...
            (cities(i,2) - cities(j,2))^2);

        % nn ( обратные расстояния )
        if i ~= j
            returndist(i,j) = 1/sqrt((cities(i,1) - cities(j,1))^2 + ...
                (cities(i,2) - cities(j,2))^2);
        end

    end
end
end

```

```

% итерации
for iteration = 1:age
    % муравьи ( одно поколение)
    for k = 1:countage
        % ***** НАЧАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ МУРАВЬЕВ *****
        % выбирайте какой нужно
        % каждый муравей располагается случайно
        % ROUTEant(k,1) = randi([1 n]);
        % с каждого города выходит один муравей ( без совпадений ), кол-во
        % городов и кол-во муравьев в поколении должны быть равны
        ROUTEant(k,1) = RANDperm(k);
        % с конкретного города выходят все муравьи в данном случа с 1-ого
        % ROUTEant(k,1) = 1;
        % тут маршрут первому поколению задаем либо произвольный, либо с каждого
        % города разный, либо с одного города все, а следующее поколение выходит по
        % концам первых
        % if iteration == 1
        %     ROUTEant(k,1) = randi([1 n]);
        %     ROUTEant(k,1) = RANDperm(k);
        % % ROUTEant(k,1) = 1;
        % else
        %     ROUTEant(k,1) = lastROUTEant(k);
        % end
        % *****
        % путь каждого муравья, начиная со второго, так как первый выбран
        for s = 2:n
            % получаем индекс выбранного города
            ir = ROUTEant(k,s-1);
            % вероятность посещения городов ( числитель ) , в числителе у нас
            % следующее: tao^a*(1/S)^b
            % 1/S -это returndist.
            % поскольку данное значение будет повторяться (кол-во муравьев * на
            % колонию * кол-во городов) раз, то еще один цикл писать не выгодно,
            % скорость работы при таких вычислениях падает. Поэтому написал в
            % этом моменте векторно. На обычном языке будет так: |
            %     for c = 1:n
            %         P(1,c) = tao(ir,c).^a * returndist(ir,c).^b;
            %     end

```

```

P = tao(ir,:).^a .* returndist(ir,:).^b;
% получили числители (в формуле вероятности перехода к k-ому городу)
% для n городов, однако в некоторых мы уже побывали, нужно исключить
% их
% проставляем нули в числитель туда, где уже были, чтобы
% вероятность перехода была 0, следовательно в сумме знаменателя
% формулы данный город учитываться не будет
P(ROUTEant(k,1:s-1)) = 0;
% смотрим в какой город осуществляется переход
RANDONE = rand;
if RANDONE <= q
    [val, getcity] = max(P);
else
    % получаем вероятности перехода ( сумма строк должна быть = 1 )
    P = P ./ sum(P);
    getcity = find(cumsum(P) >= RANDONE, 1, 'first');
end
% присваиваем s-ый город в путь k-ому муравью
ROUTEant(k,s) = getcity;
end
% получаем маршрут k-ого муравья
ROUTE = [ROUTEant(k,1:end),ROUTEant(k,1)];
% сброс длины
S = 0;
% вычисляем маршрут k-ого муравья
for i = 1:n
    S = S + dist(ROUTE(i),ROUTE(i+1));
end
% путь k-ого муравья, массив дистанций k-ых муравьев age-ого поколения
DISTant(k) = S;
% присваиваем лучший маршрут и S
if DISTant(k) < bestDIST
    bestDIST = DISTant(k);
    bestROUTE = ROUTEant(k,[1:end,1]);
    iter = iterration;
end
% вектор "последних" городов k-ых муравьев ( выбирается для старта
% муравьев нового поколения с тех городов, где закончили путь
% предыдущее поколение)
% lastROUTEant = ROUTEant(1:end,end);
% локальное обновление феромона, после каждого муравья
for tL = 1:n

```

```

        xL = ROUTE(tL);
        yL = ROUTE(tL+1);
        % считаем новый феромон
        tao(xL,yL) = (1-p)*tao(xL,yL) + p*ph;
        tao(yL,xL) = (1-p)*tao(yL,xL) + p*ph;
    end
end
% -----ГЛОБАЛЬНОЕ ОБНОВЛЕНИЕ-----
% Испаряем феромоны "старого" пути e - коэффициент испарения
tao(tao < 2.5000000000000000e-150) = 2.5000000000000000e-150;
    % для каждого города
    for t = 1:n...
end
% строим графику
citiesOP(:,[1,2]) = cities(bestROUTE(:),[1,2]);
%plot([citiesOP(:,1);citiesOP(1,1)],[citiesOP(:,2);citiesOP(1,2)],'.r-')
disp (num2str(bestDIST))
%msgbox ('Выполнено!')
%clearvars -except cities bestDIST bestROUTE iter
toc
tic
%clearvars -except cities
%clearvars
% -----ИТЕРАЦИИ-----
% кол-во итераций ( поколений )
age1 = 2000;
% кол-во муравьев в поколении
countage1 = 20;
% кол-во городов
n1 = 20;
% -----ПАРМЕТРЫ-----
% альфа - коэффициент запаха, при 0 будем ориентироваться только на
% кратчайший путь
a1 = 1;
% бета - коэффициент расстояния, при 0 будем
% ориентироваться только на оставляемый запах
b1 = 2;
% коэффициент обновления, глобальное
e1 = 0.1;

```

```

% коэффициент обновления, локальное
p1 = 0.1;
% количество выпускаемых феромонов
Q1 = 1;
% баланс между лучшим городом и как в AS
q1 = 0.9;
% начальный феромон
ph1 = Q1/(n1*2000);
% -----ПАМЯТЬ-----
% матрица расстояний
dist1 = zeros(n1,n1);
% матрица обратных расстояний
returndist1 = zeros(n1,n1);
% матрица маршрута муравьев в одном поколении
ROUTEant1 = zeros(countagel,n1);
% вектор расстояний муравьев в одном поколении
DISTant1 = zeros(countagel,1);
% вектор лучших дистанций на каждой итерации
bestDistVec1 = zeros(agel,1);
% лучший начальный маршрут
bestDIST1 = inf;
% оптимальные маршруты
ROUTE1 = zeros(1,n1+1);
% перестановка городов без повторений ( для выхода муравьев )
RANDperm1 = randperm(n1);
% матрица вероятностей
P1 = zeros(1,n1);
% максимальное значение вероятности
vall = zeros(1);
% присваиваем номер города
getc1y1 = zeros(1);
% индекс максимального значения вероятности
indexP1 = zeros(1);
% максимальное
minDISTiteration1 = zeros(1);
% -----
% генерация городов (x,y)
cities1 = [-17.7 35; -24.8 28; -13.1 51; -20.6 60; -11.9 60; -26.8 0;
           -8.8 30; -3.6 15; -27.8 175; -22.6 40; -12.1 60; -27.2 30; -13.1 10;
           -21.6 60; -22.3 40; 0.1 340; -4.5 10; -21.9 20; -10.1 30; -15.2 360];
% матрица начальных феромонов
taol = ph1*(ones(n1,n1));

```

```

taol(logical(eye(size(taol)))) = 0;
% создаем матрицу расстояний и матрицу обратных расстояний
for il = 1:n1
    for j1 = 1:n1
        % dist ( расстояния )
        dist1(il,j1) = sqrt((cities1(il,1) - cities1(j1,1))^2 + ...
            (cities1(il,2) - cities1(j1,2))^2);
        % nn ( обратные расстояния )
        if il ~= j1
            returndist1(il,j1) = 1/sqrt((cities1(il,1) - cities1(j1,1))^2
                + ...|(cities1(il,2) - cities1(j1,2))^2);
        end
    end
end
% итерации
for iteration1 = 1:agel
    % муравьи ( одно поколение )
    for k1 = 1:countagel
        % ***** НАЧАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ МУРАВЬЕВ *****
        % с каждого города выходит один муравей ( без совпадений ), кол-во
        % городов и кол-во муравьев в поколении должны быть равны
        ROUTEant1(k1,1) = RANDperm1(k1);
        % путь каждого муравья, начиная со второго, так как первый выбран
        for s1 = 2:n1
            % получаем индекс выбранного города
            irl = ROUTEant1(k1,s1-1);
            P1 = taol(irl,:).^a1 .* returndist1(irl,:).^b1;
            P1(ROUTEant1(k1,1:s1-1)) = 0;
            % смотрим в какой город осуществляется переход
            RANDONE1 = rand;
            if RANDONE1 <= q1
                [vall, getcity1] = max(P1);
            else
                % получаем вероятности перехода ( сумма строк должна быть = 1 )
                P1 = P1 ./ sum(P1);
                getcity1 = find(cumsum(P1) >= RANDONE1, 1, 'first');
            end
            % присваиваем s-ый город в путь k-ому муравью
            ROUTEant1(k1,s1) = getcity1;
        end
    end
end

```

```

% получаем маршрут k-ого муравья
ROUTE1 = [ROUTEant1(k1,1:end),ROUTEant1(k1,1)];
% сброс длины
S1 = 0;
% вычисляем маршрут k-ого муравья
for il = 1:n1
    S1 = S1 + dist1(ROUTE1(il),ROUTE1(il+1));
end
% путь k-ого муравья, массив дистанций k-ых муравьев age-ого поколения
DISTant1(k1) = S1;
% присваиваем лучший маршрут и S
if DISTant1(k1) < bestDIST1
    bestDIST1 = DISTant1(k1);
    bestROUTE1 = ROUTEant1(k1,[1:end,1]);
    iter1 = iterration1;
end
% вектор "последних" городов k-ых муравьев
% муравьев нового поколения с тех городов, где закончили путь
% предыдущее поколение
% локальное обновление феромона, после каждого муравья
for tL1 = 1:n1
    xL1 = ROUTE1(tL1);
    yL1 = ROUTE1(tL1+1);
    % считаем новый феромон
    taol(xL1,yL1) = (1-p1)*taol(xL1,yL1) + p1*ph1;
    taol(yL1,xL1) = (1-p1)*taol(yL1,xL1) + p1*ph1;
end
end
% -----ГЛОБАЛЬНОЕ ОБНОВЛЕНИЕ-----
% Испаряем феромоны "старого" пути e - коэффициент испарения
taol(taol < 2.5000000000000000e-150) = 2.5000000000000000e-150;
% для каждого города
for t1 = 1:n1
    xG1 = bestROUTE1(t1);
    yG1 = bestROUTE1(t1+1);
    % считаем новый феромон
    taol(xG1,yG1) = taol(xG1,yG1) + e1*(Q1/bestDIST1);
    taol(yG1,xG1) = taol(yG1,xG1) + e1*(Q1/bestDIST1);
end
end

% строим графики
citiesOP1(:,[1,2]) = cities1(bestROUTE1(:),[1,2]);
plot([citiesOP(:,1);citiesOP(1,1)],[citiesOP(:,2);citiesOP(1,2)],
[citiesOP1(:,1);citiesOP1(1,1)],[citiesOP1(:,2);citiesOP1(1,2)],'.r-')
disp (num2str(bestDIST1))
msgbox ('Выполнено!')
clearvars -except cities bestDIST bestROUTE iter
toc

```

