

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет»

На правах рукописи

Попова Валерия Сергеевна

**Разработка и исследование методики синтеза нечёткого  
логического регулятора по прямым показателям качества.**

Направление подготовки  
27.04.04 «Управление в технических системах»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2017



Работа выполнена в ФГОУ ВО «Комсомольский - на - Амуре  
государственный технический университет»

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор  
Соловьёв Вячеслав Алексеевич

Рецензент

Главный инженер ООО «Одиссей-ДВ»  
кандидат технических наук  
Бакаев Виктор Викторович

Защита состоится 15 июня 2017 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 104/3.

Автореферат разослан 11.06.2017

Секретарь ГЭК

С.И.Сухоруков

2017

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность.**

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.

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.

**Объект исследования.** Линия электропередач

**Предмет исследования.** Идентификация процесса образования льда

**Цель работы.** Разработка и исследование методики синтеза нечёткого логического регулятора по прямым показателям качества.

Для достижения поставленной цели в работе определены и решены следующие задачи исследования:

- Рассмотреть физические основы ледообразования на проводах ЛЭП;
- Рассмотреть системы мониторинга интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередач;
- Проанализировать существующие методы мониторинга и прогнозирования гололедообразования;
- Разработать систему нечёткой идентификации процесса ледообразования;
- Исследовать полученную систему нечёткой идентификации на адекватность;
- Проанализировать результаты исследования системы нечёткой идентификации.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проводились с использованием математического аппарата современной теории автоматического управления, теории нечетких множеств, основных положений нечеткого управления, методов математического моделирования.

При проведении этапов синтеза и моделирования использовался прикладной математический пакет MatLab. Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследований подтверждается согласованностью результатов выходов нечёткого идентификатора с экспертными данными.

**Научная новизна работы.** В результате выполнения исследований получены следующие новые результаты:

- Разработана система нечёткой идентификации процесса ледообразования с использованием прикладного математического пакета MatLab;

### **Практическая ценность работы.**

Реализация нечёткого прогнозирующего модуля позволит резко снизить энергетические затраты на удаление льда с проводов ЛЭП.

**Достоверность результатов работы.** Полученные в ходе работы результаты базируются на всестороннем анализе выполненных экспериментов в среде MatLab. В ходе работы использовались аналитические и экспериментальные методы проверки достоверности результатов.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, двух глав, заключения и приложения, содержащих 110 страниц основного текста, 6 таблиц, 116 рисунков, и списка литературы из 25 наименований.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

- Попова В.С. Разработка прогнозирующего модуля образования льда/ В.С.Попова, М.М.Попов // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы докладов 46-й научно-технической конференции, Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУВО «КНАГТУ», 2016, С.250-251

- Попова В.С. Параметрический анализ прогнозирующей системы образования гололёда// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы докладов 47-й научно-технической конференции, Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУВО «КНАГТУ», 2017, С.149-150

- Сухоруков С.И. Оценка параметров разрушения ледяного покрова на проводах ЛЭП по результатам численного эксперимента/ С.И.Сухоруков, В.А.Соловьёв, С.П.Чёрный, В.С. Попова // Учёные записки КНАГТУ № I-1(25), Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУВО «КНАГТУ», 2016

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, определяются цели и задачи.

**Первая глава** рассматриваются физические основы ледообразования на провода ЛЭП

Ледообразование на проводах ЛЭП происходит вследствие двух принципиально различных процессов: сублимации пара и кристаллизации (замерзания) находящейся в воздухе воды в виде переохлажденных капель. По виду процесса осуществляют и название льда.

В естественных условиях сублимационное обледенение предметов происходит при двух внешних условиях: - при отсутствии видимых элементов конденсации и - при наличии переохлажденного тумана или облака.

На упругость водяного пара у поверхности кристалла оказывает влияние капельная взвесь.

Возникновению сублимационного льда в переохлажденном тумане благоприятствуют низкие отрицательные температуры, слабые ветры и малые размеры переохлажденных капель. При этих условиях капли испаряются вблизи кристалла, вызывая тем самым его дальнейший сублимационный рост.

Водный лед образуется в результате кристаллизации переохлажденной воды. При этом основную массу его формируют переохлажденные капли дождя, мороси и тумана. Существование переохлажденных капель неразрывно связывается с природой жидкости и ее фазовыми превращениями.

Влияние скорости, с которой переохлажденные капли приближаются к предмету можно свести к следующему. Чем сильнее ветер, тем больше капель осаждается на предмет в единицу времени и, следовательно, тем интенсивней происходит процесс отложения льда. При этом, зависимость

интенсивности развития обледенения от скорости ветра, как показывают исследования гололедных станций – прямолинейная.

Таблица 1.1 – Виды обледенения

Группа	Процесс образования	Подгруппа	Условие протекания процесса	Вид обледенения
1	Сублимация водяного пара	а	Возгонка пара в лед	Иней
		б	Возгонка пара в лед при тумане	Кристаллическая изморозь
2	Кристаллизация переохлажденной воды	а	Замерзание капель тумана	Зернистая изморозь
		б	Замерзание капель мороси и дождя	Гололед
3	Кристаллизация непереохлажденной воды	а	Замерзание дождевой или талой воды	Замершая вода
		б	Замерзание мокрого снега	Замершее отложение снега (наледь)

От температуры окружающей среды, градиента ее изменения, естественно при наличии других сопутствующих факторов, зависит образуемый вид обледенения.

Необходимо отметить, что от температуры воздуха зависит и водность тумана, которая также оказывает влияние на диапазон температур, при которых образуется гололед.

Интенсивность обледенения зависит от относительной влажности воздуха.

Важным фактором, оказывающим влияние на образование обледенения проводов, является облачность, а также ее вид и плотность. Наряду с облачностью при образовании выше отмеченных видов обледенения, большое влияние оказывают туманы и осадки.

Следующим фактором, оказывающим большое влияние на характер и интенсивность обледенения проводов, является ветер. Наблюдениями установлено, что при прочих равных условиях интенсивность обледенения оказывается тем больше, чем больше скорость ветра и чем более близок к 90° угол встречи его с плоскостью предмета, подвергающегося обледенению.

Качественными характеристиками можно описать связь возникающего обледенения с рельефом местности. При этом к основным физико-географическим факторам рельефа относят абсолютную и относительную высоту, форму рельефа и экспозицию склонов по отношению к ветру при процессе обледенения. Кроме того, на условия обледенения будут оказывать влияние микроклиматических свойств места.

**Вторая глава** Проводится разработка и исследование методики синтеза нечёткого логического регулятора по прямым показателям качества.

Таблица 2.1 - Зависимость (%) интенсивности стекловидно-слоистого гололёда от температуры воздуха

Температура		Интенсивность, мм		
от	до	Слабая (6-8)	Умеренная (9-16)	Сильная (>17)
0	-1	18	47	35
-2	-3	24	57	19
-4	-5	33	67	0
-6	-7	0	100	0

В качестве алгоритма нечеткого логического вывода выберем алгоритм Сугено, как наиболее интуитивно доступный для составления базы правил. При разработке прогнозирующего модуля будем учитывать 2 основных входных параметра, которые представлены в таблице: температура воздуха и интенсивность отложений льда (в мм). В качестве выходных параметров используем интенсивность лёдообразования (в %).

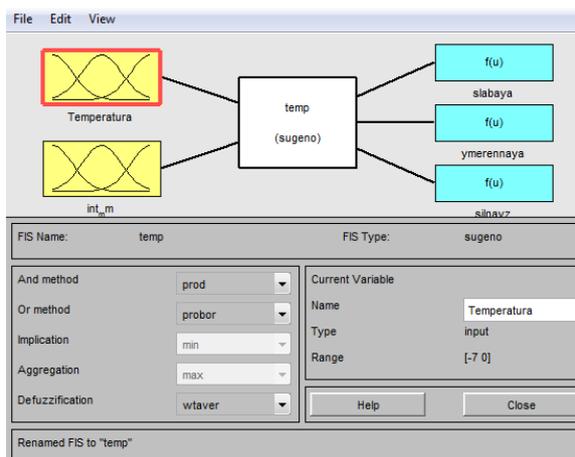


Рисунок 1-а – Функциональная схема полученного нечёткого прогнозирующего модуля

Диапазон значений входной переменной «температура»:  $-7 \dots 0$  °С. Переменная содержит 4 нечетких термина, описывающих диапазоны температур, при которых происходит образование гололёда. Каждый терм соответствует температурному диапазону таблицы 1.

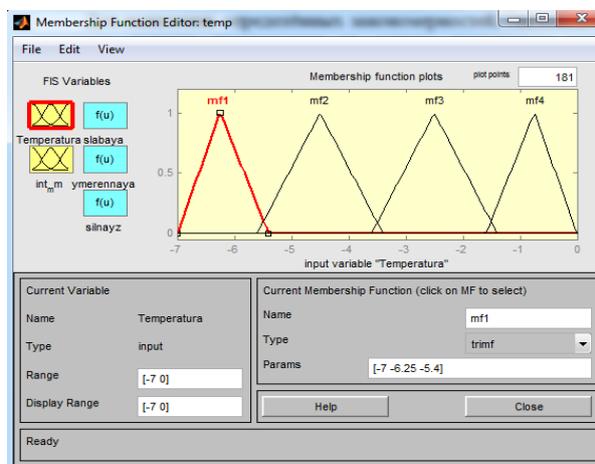


Рисунок 2 – Распределение нечётких термов первой входной переменной

Диапазон значений второй входной переменной – 6...30 мм.

Входная переменная «интенсивность (в мм)» содержит три термина, описывающие слабую (6-8), умеренную (9-16) и сильную (>17) интенсивность гололедообразования.

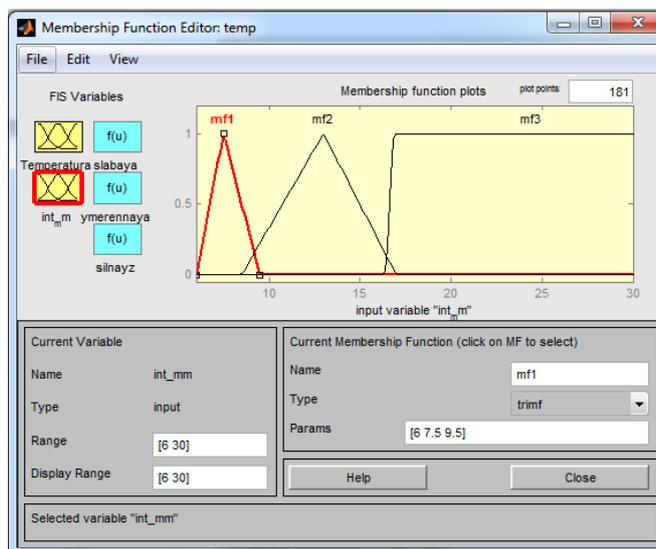


Рисунок 3 – Распределение нечётких термов второй входной переменной

Каждая из трех выходных переменных содержит по четыре нечетких термина, значения которых соответствуют таблице 2.1.

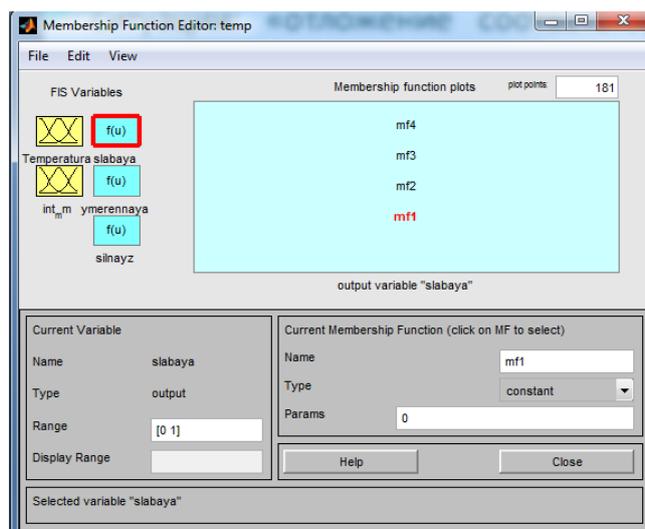


Рисунок 4 – Распределение нечётких термов первой выходной переменной

1. If (Temperatura is mf1) and (int\_mm is mf1) then (slabaya is mf1) (1)
2. If (Temperatura is mf2) and (int\_mm is mf1) then (slabaya is mf2) (1)
3. If (Temperatura is mf3) and (int\_mm is mf1) then (slabaya is mf3) (1)
4. If (Temperatura is mf4) and (int\_mm is mf1) then (slabaya is mf4) (1)
5. If (Temperatura is mf1) and (int\_mm is mf2) then (ymerennaya is mf1) (1)
6. If (Temperatura is mf2) and (int\_mm is mf2) then (ymerennaya is mf2) (1)
7. If (Temperatura is mf3) and (int\_mm is mf2) then (ymerennaya is mf3) (1)
8. If (Temperatura is mf4) and (int\_mm is mf2) then (ymerennaya is mf4) (1)
9. If (Temperatura is mf1) and (int\_mm is mf3) then (silnayz is mf1) (1)
10. If (Temperatura is mf2) and (int\_mm is mf3) then (silnayz is mf2) (1)
11. If (Temperatura is mf3) and (int\_mm is mf3) then (silnayz is mf3) (1)
12. If (Temperatura is mf4) and (int\_mm is mf3) then (silnayz is mf4) (1)

Рисунок 5 - База правил полученного нечеткого прогнозирующего модуля, связывающая набор входных и выходных параметров.

Здесь правило номер 1: Если входная переменная «температура» равна mf1 (-7 ... -5.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf1(6...9,5), то первая выходная переменная равна mf1(0).

Правило номер 2: Если входная переменная «температура» равна mf2 (-5.6 ... -3.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf1 (6...9,5), то первая выходная переменная равна mf2(33).

Правило номер 3: Если входная переменная «температура» равна mf3 (-3.6 ... -1.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf1 (6...9,5), то первая выходная переменная равна mf3 (24).

Правило номер 4: Если входная переменная «температура» равна mf4 (-1.6 ... 0) и входная переменная «интенсивность» равна mf1 (6...9,5), то первая выходная переменная равна mf4 (18).

Правило номер 5: Если входная переменная «температура» равна mf1 (-7 ... -5.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf2 (8,5...17), то вторая выходная переменная равна mf1 (100).

Правило номер 6: Если входная переменная «температура» равна mf2 (-5.6 ... -3.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf2 (8,5...17), то вторая выходная переменная равна mf2 (67).

Правило номер 7: Если входная переменная «температура» равна mf3 (-3.6 ... -1.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf2 (8,5...17), то вторая выходная переменная равна mf3 (57).

Правило номер 8: Если входная переменная «температура» равна mf4 (-1.6 ... 0) и входная переменная «интенсивность» равна mf2 (8,5...17), то вторая выходная переменная равна mf4 (47).

Правило номер 9: Если входная переменная «температура» равна mf1 (-7 ... -5.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf3 (17...30), то третья выходная переменная равна mf1 (0).

Правило номер 10: Если входная переменная «температура» равна mf2 (-5.6 ... -3.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf3 (17...30), то третья выходная переменная равна mf2 (0).

Правило номер 11: Если входная переменная «температура» равна mf3 (-3.6 ... -1.4) и входная переменная «интенсивность» равна mf3 (17...30), то третья выходная переменная равна mf3 (19).

Правило номер 12: Если входная переменная «температура» равна mf3 (-1.6 ... 0) и входная переменная «интенсивность» равна mf3 (17...30), то третья выходная переменная равна mf4 (35).

**В заключении** вынесены основные выводы по работе.

## ВЫВОДЫ

Для повышения эффективности удаления гололёда с проводов ЛЭП целесообразно использовать автоматизированные системы;

- Автоматизированная система удаления должна содержать прогнозирующий модуль, который позволит осуществлять процесс удаления льда не по конечному результату, когда слой льда на проводах достигнет критического значения, а с упреждением;

- Отсутствие однозначных аналитических связей между измеряемыми параметрами (температура, скорость ветра, направление ветра, влажность, осадки и т.д.) и физическими параметрами гололёда (масса, толщина, скорость образования) ориентирует на применение приёмов искусственного интеллекта при построении блоков прогнозирующего модуля;

- На основании отрывочных статистических данных между базовыми параметрами, влияющими на образование гололёда и характеристиками гололёдного образования предложено использовать нечёткий идентификатор, описывающий процесс взаимосвязи между параметрами и характеристиками;

- На основании результатов исследования доказано, что такой подход приемлем, реализация данного идентификатора обладает небольшой алгоритмической сложностью:

Оптимальное количество термов входной переменной: 3-5.

Оптимальное перекрытие термов между собой: 40-50 %

База правил составляется в соответствии с исходными экспертными данными.