

УДК 629.7.085.2; 004.032.26

**РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ДЛЯ
СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ БУКСИРОВОЧНОЙ ЛЕБЕДКИ
МЯГКОКРЫЛЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Прохорова В.Е., студент гр. СМ7-43М, магистратура 2 курс
Научный руководитель: Калинин А. В., к.т.н, доцент кафедры
«Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Московский государственный технический университет имени Н. Э.
Баумана, г. Москва

Аннотация

В статье рассматривается задача повышения безопасности буксировки мягкокрылых летательных аппаратов (парпланов). Предложена нечеткая система оценки опасности и принятия решения об аварийной обрезке буксировочного троса. Обоснован выбор диагностических параметров: момент на валу лебедки, скорость его изменения, частота вращения вала, корреляция между моментом и скоростью, а также время удержания параметров в критической зоне. Разработана нечеткая модель типа Мамдани, включающая пять входных и две выходные переменные, а также база правил, учитывающая различные аварийные сценарии. Приведены результаты моделирования для пяти характерных режимов работы (нормальный взлет, порыв ветра, обрыв троса, зацеп, рывок), которые подтверждают эффективность предложенного подхода. Система демонстрирует высокую селективность, своевременно идентифицируя опасные ситуации и игнорируя кратковременные возмущения.

Ключевые слова: нечеткая логика, система безопасности, буксировочная лебедка, парплан, аварийная обрезка троса, диагностика, модель Мамдани.

Текст статьи:

Обеспечение безопасности при буксировке мягкокрылых летательных аппаратов (парпланов) является критической задачей, от решения которой зависит жизнь пилота. Существующие механические и электромеханические системы защиты не всегда способны адекватно реагировать на быстроразвивающиеся аварийные ситуации, такие как резкий рывок, зацеп троса или его обрыв. Классические пороговые системы часто дают ложные срабатывания или, напротив, не успевают предотвратить аварию из-за сложности идентификации предостановочного состояния по одному параметру.

Применение методов нечеткой логики открывает перспективы для создания интеллектуальных систем безопасности, способных анализировать совокупность факторов и принимать решения в условиях неопределенности. Целью данной работы является разработка и верификация нечеткой модели оценки уровня опасности и формирования команды на аварийную обрезку троса парпланерной лебедки на основе анализа комплекса диагностических признаков.

1. Параметры системы и критические показатели безопасности

Объектом управления является буксировочная лебедка с электродвигателем мощностью 7,5 кВт (номинальная скорость вращения 1550 об/мин, радиус барабана 0,09 м). Начальная длина троса - 1000 м, масса пилота с парашютом - 130 кг. Номинальная скорость буксировки составляет 6 м/с.

Анализ аварийных режимов позволил выделить пять ключевых параметров, которые легли в основу нечеткой модели:

Текущий момент на валу двигателя ($M_{current}$, Н·м). Интегральный показатель нагрузки на трос. Штатный диапазон - 80-150 Н·м. Критический порог анализа ситуации - 220 Н·м, абсолютный предел для обязательной обрезки - 250 Н·м.

Скорость изменения момента (dM/dt , Н·м/с). Позволяет отличить плавный рост нагрузки от опасного рывка. Критическое значение принято равным 100 Н·м/с[1].

Скорость вращения вала (ω , рад/с). Важна для анализа характера процесса (затягивание, обрыв). Максимальная скорость - 300 рад/с.

Корреляция между моментом и скоростью вращения ($correlation$). Вычисляется методом Пирсона на скользящем окне 0,2 с. Устойчивая отрицательная связь (коэффициент $>0,82$ по модулю) свидетельствует о затягивании или обрыве.

Время удержания в критическом режиме ($t_{critical}$, с). Время, в течение которого параметры превышают 80% от критических значений. Служит для фильтрации кратковременных выбросов. Критическое время удержания - 0,15 с.

2. Нечеткая модель оценки опасности

Выбрана система нечеткого вывода Мамдани[2]. Структура разработанной системы WinchSafetySystem приведена на рисунке 1.

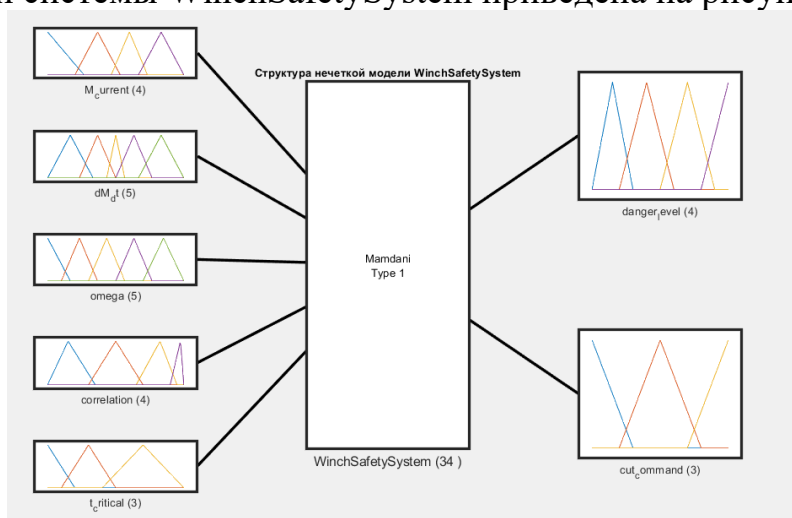


Рисунок 1 - Структура нечеткой системы вывода

Входные переменные лингвистические термы описаны следующими функциями принадлежности[3]:

$M_{current}$ (0 - 300 Н·м): термы «Низкий», «Средний», «Высокий», «Критический».

$\frac{dM}{dt}$ (-150 - 150 Н·м/с): термы «Отрицательная», «Нулевая», «Положительная», «Высокая положительная».

ω (0 - 300 рад/с): термы «Нулевая», «Низкая», «Средняя», «Высокая».

correlation (-1 - 1): термы «Отрицательная», «Нулевая», «Положительная».

$t_{critical}$ (0 - 0,5 с): термы «Малое», «Среднее», «Большое».

Выходными переменными являются:

danger_level (0 - 1): уровень опасности, описываемый термами «Низкий», «Средний», «Высокий», «Критический».

cut_command (0 - 1): команда на обрезку троса с термами «Нет», «Возможно», «Да». Порог принятия решения о срабатывании установлен на уровне 0,6, что соответствует уверенному попаданию в терм «Да».

База правил содержит 28 продукционных правил с операцией И, структурированных по уровням опасности[4].

Анализ поверхностей отклика (рис. 2) подтверждает корректность заложенных правил.

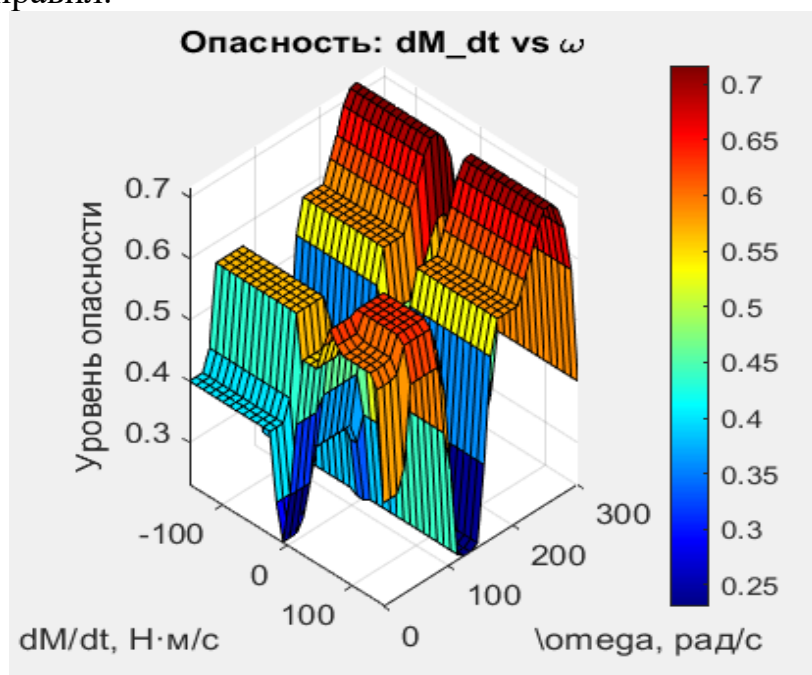


Рисунок 2 - Зависимость уровня опасности от скорости нарастания момента момента и скорости вращения

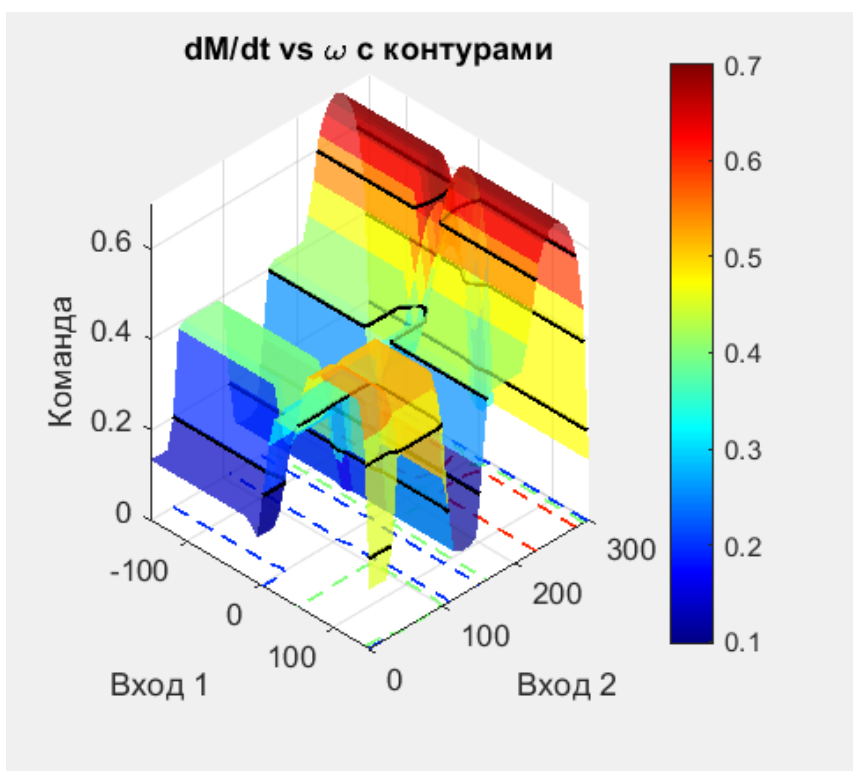


Рисунок 3 - Поверхность отклика для команды обрезки

Как видно из рисунка 3, область принятия решения об обрезке ($\text{cut_command} > 0,6$) находится в зоне высоких скоростей[5].

3. Сценарии моделирования

Для верификации модели было разработано пять тестовых сценариев, имитирующих штатные и аварийные режимы работы[6]. Моделирование выполнялось на интервале 10 секунд с шагом 0,01 с. Для приближения к реальным условиям в сигналы вводился шум (1%) с последующим сглаживанием фильтром Гаусса.

Нормальный взлет и полет: Эталонный режим.

Порыв ветра: Кратковременное увеличение момента (до 168 Н·м) без потери скорости.

Обрыв троса: Мгновенное падение момента до нуля на 4-й секунде при росте скорости.

Зацеп троса: Рост момента до 200 Н·м с 3-й по 4-ю секунду с последующими колебаниями и падением скорости.

Быстрый рост момента (рывок): Экстремально высокая скорость роста момента (185 Н·м/с) с 1,5 по 2,5 секунду.

4. Результаты моделирования и их анализ

Динамика изменения уровня опасности и команды на обрезку для всех сценариев представлена на рисунках 4 и 5.

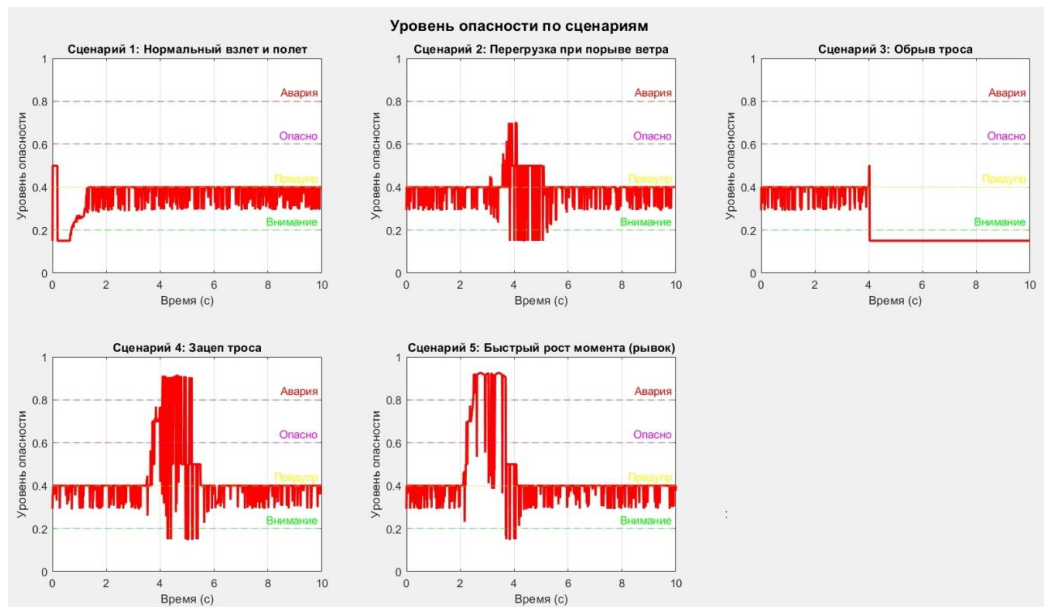


Рисунок 4 - Уровень опасности по сценариям

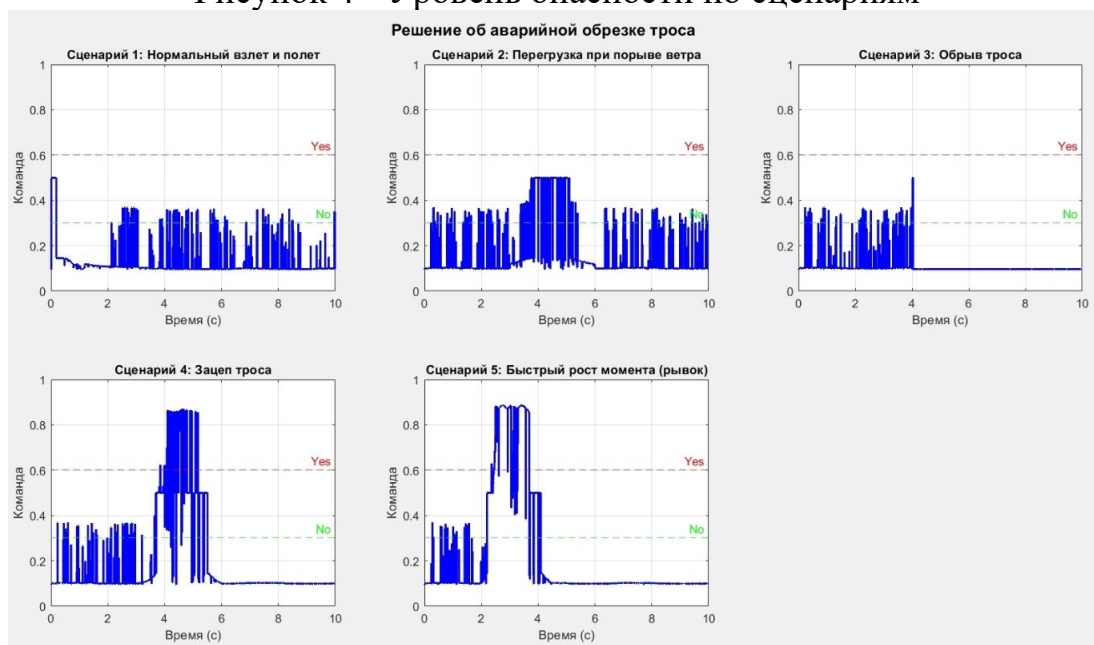


Рисунок 5 - Команда на аварийную обрезку по сценариям

Анализ результатов показал следующее:

Сценарии 1 и 2 (штатные): Уровень опасности не превышает средних значений, команда на обрезку отсутствует. Система правильно фильтрует кратковременный порыв ветра, так как отсутствуют такие признаки, как отрицательная корреляция и критическое время удержания.

Сценарий 3 (обрыв троса): Несмотря на аварийность события, система не выдает команду на обрезку (уровень опасности $< 0,1$). Это логично, так как трос уже оборван, и вмешательство механизма обрезки не требуется и может привести к повреждению лебедки.

Сценарий 4 (зацеп): Система идентифицирует опасность на 4-й секунде. Команда на обрезку формируется еще до достижения абсолютного критического момента (220 Н·м) благодаря совокупности признаков: высокий

момент, низкая скорость, отрицательная корреляция и время удержания более 0,15 с.

Сценарий 5 (рывок): Зафиксирована наиболее быстрая реакция. Экстремальная скорость роста момента (185 Н·м/с) активирует правила критической опасности, и система формирует команду на обрезку практически мгновенно, что предотвращает развитие аварии.

Заключение

В ходе исследования разработана нечеткая система оценки опасности для буксировочной лебедки пароплана. Обоснованный выбор диагностических признаков и разработанная база правил (28 правил) позволяют системе эффективно различать штатные и аварийные режимы работы.

Моделирование на пяти характерных сценариях подтвердило высокую селективность и чувствительность системы:

Система своевременно формирует команду на обрезку при зацепах и резких рывках, опережая достижение критических значений момента.

Обеспечивается надежная фильтрация кратковременных возмущений (порывов ветра) за счет контроля времени удержания.

Исключены ложные срабатывания при уже произошедшем обрыве троса.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения нечеткой логики в системах активной безопасности буксировочных комплексов. Разработанная модель может служить основой для создания промышленного образца системы управления аварийной обрезкой троса.

Список литературы:

1. Müller M., Ali A., Tareilus A. Modelling and simulation of a paraglider flight //Proceedings of The 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2016, The 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS 2016. – 2018. – Т. 142. – С. 327-333.
2. Iancu I. A Mamdani type fuzzy logic controller //Fuzzy logic-controls, concepts, theories and applications. – 2012. – Т. 15. – №. 2. – С. 325-350.
3. Голосовский М. С. и др. Алгоритм настройки системы нечёткого логического вывода типа Мамдани //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 19-29.
4. Gürgen S., Ada M. Risk assessment to improve reliability in towing system of tugboats using fuzzy based FMEA //Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development. – 2025. – Т. 76. – №. 4. – С. 1-24.
5. Babuška R. Fuzzy modeling for control. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 12.
6. Sargent R. G. Verification and validation of simulation models //Proceedings of the 2010 winter simulation conference. – IEEE, 2010. – С. 166-183.