

УДК 519.711.3:621.315.1

Математическое моделирование процесса взаимодействия автономного роботизированного комплекса с изморозевыми отложениями на ЛЭП

Кордияк Г.В.¹, Садыков М.Ф.¹

ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический университет»¹

Аннотация: В статье рассматриваются подходы к математическому моделированию локальной автономной системы, предназначенной для удаления гололедно-изморозевых отложений (ГИО) на высоковольтных линиях электропередачи без снятия напряжения. Обосновывается необходимость применения численных методов для расчета механических напряжений в системе «провод – лед – роботизированный комплекс». Предложена общая концепция программно-вычислительного комплекса для симуляции рабочих режимов автономного устройства.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, метод конечных элементов, автономные системы, линии электропередачи, программный комплекс, алгоритмы управления.

1. Введение

Разработка и внедрение локальных автономных систем для очистки высоковольтных линий электропередачи (ВЛ) от гололедно-изморозевых отложений (ГИО) является сложной междисциплинарной задачей. Натурные испытания подобных роботизированных комплексов непосредственно на действующих ЛЭП под напряжением сопряжены с высокими финансовыми затратами и рисками возникновения аварийных ситуаций. В связи с этим первостепенную роль на этапе проектирования играет математическое моделирование физических процессов взаимодействия устройства с обледенелым проводом, а также разработка адекватных численных моделей для программной симуляции.

2. Постановка математической задачи

Процесс удаления изморози автономным устройством представляет собой сложную динамическую задачу механики контактного взаимодействия. Математическая модель системы должна учитывать три основных компонента:

1. Гибкую нить (фазный провод), обладающую собственной массой, натяжением и упруго-деформационными характеристиками.
2. Слой гололедно-изморозевых отложений, характеризующийся переменной плотностью, толщиной и адгезией к поверхности провода.
3. Роботизированный комплекс, представляющий собой сосредоточенную движущуюся массу, оказывающую механическое (вибрационное или фрезерующее) воздействие на лед.

Для описания динамики провода с движущейся по нему массой целесообразно использовать систему дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения колебаний струны с учетом изгибной жесткости). Сила сопротивления, возника-

ющая при разрушении льда, вводится в модель как нелинейная функция, зависящая от скорости движения комплекса и физико-механических свойств отложений.

3. Применение численных методов и комплексов программ

Поскольку аналитическое решение составленной системы дифференциальных уравнений затруднено из-за высокой степени нелинейности граничных условий, для нахождения решения применяются численные методы. Основным инструментом для решения поставленной задачи является метод конечных элементов (МКЭ). Использование современных программных комплексов инженерного анализа (например, ANSYS или COMSOL Multiphysics) позволяет разбить контактную зону «рабочий орган комплекса – лед – провод» на сетку конечных элементов. В рамках программной симуляции решаются следующие задачи:

- определение критических усилий, необходимых для нарушения адгезионной связи изморози с алюминиевой или сталеалюминиевой поверхностью провода;
- расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) самого провода во избежание повреждения его внешних повивов рабочими органами робота;
- оценка влияния ветровой нагрузки на устойчивость комплекса при движении по пролету.

4. Алгоритмическое моделирование системы управления

Помимо механического взаимодействия, критически важным аспектом является моделирование логики автономного управления комплексом. Так как система должна функционировать без участия оператора, разрабатывается алгоритмическая модель принятия решений.

В среде MATLAB/Simulink формируется виртуальная модель подсистемы мониторинга, включающая входные данные с датчиков температуры, влажности и тензодатчиков. Алгоритм, реализующий элементы нечеткой логики (Fuzzy Logic), обрабатывает эти сигналы и выдает управляющие воздействия на тяговые электродвигатели.

Численное моделирование в Simulink позволяет настроить ПИД-регуляторы системы так, чтобы обеспечить плавный пуск и торможение комплекса, исключая раскачивание провода (эффект маятника).

5. Заключение

Таким образом, применение методов математического моделирования и современных программных вычислительных комплексов является обязательным этапом создания локальной автономной системы очистки ЛЭП. Совмещение конечно-элементного анализа (для расчета механической прочности) и алгоритмического моделирования (для настройки системы управления) позволяет виртуально оптимизировать массогабаритные и мощностные характеристики устройства. Разработанные численные модели значительно сокращают сроки проектирования и позволяют создать безопасное устройство для эксплуатации на линиях без снятия рабочего напряжения.

Литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. Москва: Физматлит, 2001. 320 с.

2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 541 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. Москва: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
4. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. Москва: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
5. Смирнов В.А. Моделирование динамики роботизированных систем на гибких направляющих // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. № 8. С. 22-29.

MSC 00A71, 74S05, 93A30

Mathematical Modeling of the Interaction Process Between an Autonomous Robotic Complex and Frost Deposits on Power Transmission Lines

G.V. Kordiyak¹, M.F. Sadykov¹

Kazan State Power Engineering University¹

Abstract: The article considers approaches to the mathematical modeling of a local autonomous system designed to remove ice and frost deposits from high-voltage power transmission lines without de-energizing. The necessity of using numerical methods to calculate mechanical stresses in the "wire – ice – robotic complex" system is substantiated. A general concept of a software and computing complex for simulating the operating modes of the autonomous device is proposed.

Keywords: mathematical modeling, numerical methods, finite element method, autonomous systems, power transmission lines, software complex, control algorithms.