

Разработка программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций

Е.Е.Истратова, А.Н. Кожевников, П.В. Ласточкин, Е.В. Глинин

Аннотация — Контроль фактического технического состояния опор воздушных линий электропередачи является актуальной не до конца решенной в настоящий момент задачей. В статье приведены результаты анализа предметной области, на основе которого была выполнена разработка программного обеспечения для мониторинга и контроля за техническим состоянием опор линий электропередачи в процессе их эксплуатации. В ходе выполнения работы был выделен объект исследования, была изучена предметная область, а также наиболее распространенные эксплуатационные дефекты и их влияние на прочность конструкций опор линий электропередачи. Затем был проведен анализ программного обеспечения для проведения прочностных расчетов, определена методика проведения эксперимента и сформулированы цели, задачи, функции программного обеспечения. Разработанное программное обеспечение представляет собой веб-приложение для автоматизации процессов сбора и обработки данных о состоянии опор линий электропередачи. Контроль эксплуатации опор осуществляется посредством анализа и сопоставления полученных спектров собственных колебаний частот опор с их расчетными значениями. Готовый программный продукт может быть использован в учебных и научно-исследовательских целях для проведения мониторинга динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций.

Ключевые слова — программное обеспечение, опоры, динамические характеристики, мониторинг, пространственная решетчатая конструкция, линии электропередач.

I. ВВЕДЕНИЕ

В качестве объекта исследования в рамках реализации работы была рассмотрена металлическая пространственная решетчатая конструкция, представляющая собой скрепленные между собой узловыми соединениями прямолинейные стержни. Наиболее распространенными примерами пространственных решетчатых конструкций являются: мачты, фермы, башни, легкие колонны, опоры линий электропередачи.

В исследовании были рассмотрены опоры линий электропередачи, широко применяемые в качестве поддерживающих конструкций в составе воздушных линий для передачи электрической энергии на большие расстояния.

Актуальность данного направления обусловлена тем, что в настоящее время происходит непрерывный рост городов и предприятий, что способствует увеличению мощности приемников электрической энергии, растет их общее количество и протяженность линий электропередачи. Вместе с этим, изменяются условия эксплуатации и ужесточаются требования к качеству и надежности электроснабжения.

Однако состояние сетей для передачи электрической энергии к промышленным и сельскохозяйственным предприятиям крайне ненадежно ввиду большого числа плановых и внеплановых отключений, которые приводят к значительному увеличению процента износа самих сетей. В статье [1] было отмечено, что около 75% линии электропередачи и подстанций уже выработали свой срок службы, что влечет за собой проблему с надежностью снабжения потребителей электроэнергией. Из-за высокого процентного износа электрооборудования возникают серьезные проблемы в системе электроснабжения страны. Так, до 70 часов в год возрастает перерыв в электроснабжении потребителей и до 25 % увеличивается потеря электроэнергии.

Помимо износа, отсутствие резервирования на магистральных линиях является еще одной проблемой линий электропередачи, что обусловлено как большой протяженностью самих линий, так и значительной металлоемкостью применяемых опор. Поэтому обрыв проводника тока или разрушение отдельной опоры линии электропередачи может привести к прекращению электроснабжения ответственного объекта промышленности или целого города.

Таким образом, контроль состояния линий электропередачи и всех их элементов является актуальной задачей. Для ее реализации целесообразно применение мониторинга, к одному из направлений которого относится мониторинг динамических характеристик опор линий электропередачи для определения их эксплуатационных дефектов. Целью работы являлась разработка программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций. Практическая значимость программного обеспечения

Истратова Евгения Евгеньевна, Новосибирский государственный технический университет, istratova@mail.ru
Кожевников Алексей Николаевич, Новосибирский государственный технический университет, ak-1993@bk.ru
Ласточкин Павел Валерьевич, Новосибирский государственный технический университет, l.pasha.v@gmail.com
Глинин Евгений Вадимович, Новосибирский государственный технический университет, eugeny.glinin@yandex.ru

заключается в том, что оно может быть использовано для автоматизации процессов сбора и обработки данных об эксплуатационных дефектах опор линий электропередачи в режиме реального времени на основе анализа их динамических характеристик.

II. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Линии электропередачи представляют собой сложный конструктивный комплекс, который работает как пространственная сетевая система, состоящая из конструкций опор, соединенных проводами и тросами. Наиболее популярными в энергосистеме являются линии с напряжением величиной 10 кВ, состоящие из проводов; линейных, пространственных или балансирных траверс; анкерных и промежуточных опор; различных заземляющих устройств; изоляторов и другого оборудования, применяемого для защиты от короткого замыкания и перенапряжения.

Период эксплуатации линий электропередачи напрямую зависит от географического района, в котором они расположены, и от характерных для него климатических особенностей. Поэтому климатические характеристики – это основные исходные условия, которые учитываются при проектировании, расчетах и эксплуатации любых линий электропередачи и контактных сетей. В России выделяют три группы климатических факторов, оказывающих негативное влияние на линии электропередачи. К ним относятся характеристики климата, связанные с воздействием критических температур, ветра и гололедных явлений.

В статье [2] приведены результаты анализа данных об аварийных отключениях в сетях электроснабжения на основе исследования параметров потока отказов и среднего времени восстановления. Параметр потока отказов характеризует частоту отказов и равен среднему количеству отказов ремонтируемого изделия в единицу времени. Временем восстановления является среднее время вынужденного простоя для установления и устранения одного отказа. По этим двум показателям был оценен уровень надежности сетей электроснабжения. В результате было установлено, что количество аварийных отключений напрямую зависит от климатических и метеорологических условий.

В литературном источнике [3] описан способ удаления снежно-ледового покрова с проводов высоковольтных линий электропередачи без перерывов в подаче электроэнергии потребителям. Суть способа заключается в пропускании по проводам расщепленной фазы переменного тока с частотой, близкой к механическому резонансу проводов.

Влияние величины ветровой нагрузки значительно. В литературном источнике [4] указано, что более 44% разрушений и повреждений опор линий происходит из-за недостаточности знаний о действиях ветра. Основными причинами аварий при этом являются ошибки при проектировании линий электропередачи, связанные с неверным расчетом величины ветровой нагрузки.

В инструкции по эксплуатации линии опоры

электропередачи конкретно зафиксированы регламентированные интервалы для основных типов инспекций конструкции опор и проводов электросети. Данный регламент включает: визуальный осмотр не реже 1 раза в год, детальную инспекцию 1 раз в 3 года и полноценный осмотр конструкции с подъемом на опору не реже, чем один раз в 6 лет. Внеплановые инспекции проводятся после существенных природных воздействий (ураганные ветра, смерчи, гололед) или на основании опыта эксплуатирующей организации [5].

Таким образом, с точки зрения обслуживания линий электропередачи можно выделить два основных направления, связанных с оценкой состояния линий, проводящих электроэнергию, и контактных опор, представляющих собой металлические пространственные конструкции.

По сравнению с воздушными линиями для передачи электричества, контроль состояния опор линий электропередачи является приоритетным направлением, поскольку выход из строя даже одной опоры может привести к значительному ущербу.

Метод усиления несущих элементов опор для линий электропередачи приведен в статье [6]. В нем применяются стальные стыковые накладки, позволяющие предотвратить выход опоры из строя из-за напряжения нагрузки, а также напряжения, вызванного неблагоприятными погодными условиями.

В исследовании [7] рассматривается возможность применения полимерных композитов с намотанной нитью в качестве траверсы в решетчатых опорах линий электропередачи. Предполагается, что текущая конструкция поперечины должна принять структуру сердечника в качестве усиления конструкции с использованием процесса намотки нити для долгосрочных конструкций. Следовательно, композитная структура может выдерживать экстремальные условия окружающей среды, благодаря процессу намотки нити.

В статье [8] описан опыт защиты фундаментов опор линий электропередачи на севере Тюменской области от обледенения с помощью локальных криосистем. В рамках работы была спроектирована система оперативного контроля температурного режима грунтов свайных фундаментов опор линий электропередачи с помощью сезонно действующих охлаждающих устройств и термостабилизаторов, также были даны рекомендации по эффективному использованию разработанного метода.

Опоры являются важными компонентами в системах электропередачи, поэтому их повреждение и выход из строя во время стихийных бедствий или эксплуатации могут привести к значительным экономическим потерям и существенно затруднить восстановление.

В исследовании [9] показаны результаты анализа сейсмической устойчивости опор линий электропередачи, опирающихся на сваи, которые обычно выполняются без учета влияния взаимодействия грунт-конструкция и усиления колебаний грунта на площадке от конца сваи до поверхности земли. Такой

подход позволяет дать точные результаты оценки характеристик конструкции.

Еще одним примером воздействия на опоры линий электропередачи является действие циклонов. В статье [10] приведены результаты расследования отказов опор линий электропередачи во время циклона Вардах. В итоге были выделены основные уязвимые элементы опор и сформулированы предложения по их укреплению для предотвращения повторения подобных сценариев отказа.

В литературном источнике [11] приведены результаты обследования воздушных линий электропередачи 220 кВ Череповецкой сети ОАО «Вологдэнерго» с использованием специально разработанных «Методических рекомендаций по оценке технического состояния ВЛ 35 – 750 кВ после длительной эксплуатации». В ходе исследования предлагаются два пути решения проблемы дальнейшей безопасной эксплуатации линий электропередачи, а именно: традиционный (восстановление соответствующих зазоров до земли за счет вспучивания проводника или возведения новых опор) и альтернативный (определение скрытого запаса, содержащегося в «Правилах эксплуатации ЛЭП»). В результате авторы сделали выводы о том, что необходимо находить индивидуальные решения проблем, возникающих в воздушных линиях электропередачи после длительной эксплуатации.

В статье [12] перечислены проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов опор линий электропередачи в северных районах Западной Сибири, связанные с экстремальными геологическими и мерзлотными условиями региона, а также факторами (природными и техногенными), их обуславливающими, также обоснована необходимость разработки новых подходов к проектированию и строительству линий электропередачи на севере Западной Сибири и сформулированы рекомендации по снижению аварийности линий электропередачи в регионе.

Для сокращения продолжительности и уменьшения бюджета подобных проектов в исследовании [13] предложен метод применения экономичного проектирования, учитывающий значительные траты времени и материальных ресурсов при строительстве фундаментов опор линий электропередачи.

Таким образом, для осуществления мониторинга состояния указанных металлических пространственных конструкций применяются методы оценки прочности, основанные на тензометрии и определении динамических характеристик опор. Именно поэтому для своевременного выявления эксплуатационных дефектов опор воздушных линий электропередачи необходимо проведение мониторинга их состояния с последующим накоплением и динамическим анализом данных.

III. АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Для осуществления мониторинга состояния опор

воздушной линии электропередачи применяется различное программное обеспечение, которое в рамках выполнения данной работы было классифицировано по функциональному признаку на три группы (рис. 1).

К первой группе относятся программные решения для сбора данных о состоянии опор линии электропередачи. Как правило, данные программы непосредственно связаны с тензометрическими датчиками и мостами, получая от них данные. Примерами программ данной категории служат отдельные разработки, имеющие свидетельства государственной регистрации и выполняющие в основном узкоспециализированные действия по сбору конкретных метрик.

Вторая группа программного обеспечения включает в себя продукты для хранения данных, позволяющие осуществлять их накопление и ранжирование за счет SQL-запросов и встроенных инструментов. Примерами программ, относящихся к данной группе, являются решения, спроектированные на основе различных систем управления базами данных.



Рисунок 1 — Классификация программного обеспечения для мониторинга состояния опор линий электропередачи

В третью группу программ по функциональному признаку можно объединить решения для проведения обработки данных о состоянии опор линии электропередачи. Данный вид программных продуктов может применяться для проведения расчетов, выполнения анализа и прогнозирования определенных характеристик опор. Наиболее распространенными примерами программных решений, относящихся к третьей группе, являются следующие программные комплексы: ANSYS, ZETLAB, FEMAP, COMSOL.

ANSYS — это универсальная программная система, основанная на применении метода конечных элементов. Данный программный продукт довольно популярен у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов, решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций, включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций,

задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики [14].

Основными достоинствами данной программы являются следующие:

1. Большая встроенная библиотека материалов.
2. Многофункциональность при выполнении расчетов.
3. Модульность.

К недостаткам программы относятся следующие:

1. Наличие собственного языка программирования ANSYS Parametric Design Language (APDL).
2. Высокая стоимость лицензии.
3. Высокий порог вхождения.

Программное обеспечение ZETLAB – это виртуальная лаборатория, предоставляющая пользователю мощные средства для визуализации, спектрального анализа, измерения электрических параметров, генерации, записи и воспроизведения сигналов. Программа Тензометр, которая входит в основной пакет, предназначена для проведения всех видов тензометрических измерений с помощью тензометрических датчиков, например, датчиков силы, датчиков крутящего момента, мостовых и полумостовых схем на тензорезисторах [15].

Достоинствами данного программного продукта являются следующие:

1. Возможности настройки измеряемых параметров.
2. Быстродействие при выполнении расчетов.

В качестве основных недостатков можно выделить следующие:

1. Программа может работать только с входными каналами, измеряющими напряжение.
2. Высокая стоимость лицензии.

FEMAP (англ. Finite Element Analysis) — программное решение, которое в качестве процессора использует более двадцати самых распространенных программ расчета, основанных на применении метода конечных элементов. С помощью программного обеспечения FEMAP можно создавать геометрическое представление конструкции или импортировать ее из любого редактора компьютерной графики [16].

Ключевыми достоинствами данной программы являются следующие:

1. Возможность автоматического построения сетки конечных элементов.
2. Высокая производительность.
3. Возможность визуализации рассчитанных данных.

Недостатками программы являются следующие:

1. Высокая стоимость лицензии.
2. Высокий порог вхождения.

Программное обеспечение COMSOL использует математический аппарат, основанный на применении цилиндрических функций Бесселя. Формулы базируются на определении постоянных интегрирования на основе граничных условий. В [17] приводится характеристика данного программного комплекса, как инструмента, который позволяет с высокой точностью моделировать любые, описываемые частными дифференциальными уравнениями,

физические процессы.

Основными достоинствами данной программы являются следующие:

1. Большая встроенная библиотека материалов.
2. Модульность.

К недостаткам программы относятся следующие:

1. Высокая стоимость лицензии.
2. Высокий порог вхождения.

Таким образом, программное обеспечение, относящиеся к третьей группе и ориентированное на обработку экспериментальных данных, то есть проведение расчетов, выполнение операций анализа и прогноза данных, как правило, не обладает средствами для сбора и хранения сырых данных, также они имеют многофункциональные интерфейсы, что требует от пользователей хорошей теоретической подготовки в области моделируемого процесса и затрудняет их использование. Помимо этого, все перечисленные программные продукты имеют лишь платные версии. Исходя из этого, актуальной является разработка программного обеспечения для осуществления мониторинга состояния опор линий электропередачи, предусматривающего хранение и обработку данных, а также обладающего интуитивно понятным интерфейсом.

IV. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РИШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На основании результатов проведенного анализа предметной области были сформулированы цель, задачи, функции проектируемого программного обеспечения, также были определены роли пользователей данного программного решения.

Цель разрабатываемого программного обеспечения заключалась в автоматизации процессов сбора и хранения данных о состоянии опор линий электропередачи.

Для реализации указанной цели были выполнены задачи, связанные с анализом предметной области, изучением программных аналогов для мониторинга динамических характеристик опор линий электропередачи, также планируется выполнение задач, непосредственно связанных с разработкой алгоритма работы программы и на основании него осуществлением ее программной реализации.

Основными функциями программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик металлических пространственных конструкций являются следующие:

- 1) ввод информации о состоянии опор линии электропередачи;
- 2) редактирование информации о состоянии опор линии электропередачи;
- 3) формирование отчетов о состоянии опор линии электропередачи.

Для пользователей программного обеспечения были сформированы следующие роли, функции каждой из которых приведены в табл. 1: администратор; оператор.

Таблица 1. Роли пользователей программного обеспечения и их функции

Роль пользователя	Функции пользователя
Администратор	Администрирование программы. Контроль безопасности программы. Разграничение доступа пользователей. Работа с учетными записями пользователей.
Оператор	Ввод информации об опоре ЛЭП. Формирование отчетов о состоянии опор ЛЭП.

Разработка программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик металлических опор линий электропередачи заключалась в выполнении двух ключевых этапов: проектировании базы данных и создании пользовательского интерфейса.

В рамках выполнения первого этапа была разработана структура базы данных и завершена ее программная реализация. Предварительно был выполнен анализ информационных потоков, согласно которому, разрабатываемое программное обеспечение представляет собой веб-приложение для автоматизации процессов сбора и обработки данных о состоянии опор линий электропередачи. Контроль эксплуатации опор осуществляется посредством анализа и сопоставления полученных спектров собственных колебаний частот опор с их расчетными значениями. Готовый программный продукт может быть использован в учебных и научно-исследовательских целях для проведения мониторинга динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций.

В качестве исходных данных для работы программного обеспечения используется три вида входных информационных потоков. Первый вид данных связан с вводом в программу информации о физических и географических характеристиках опор линий электропередачи, к которым относятся следующие группы параметров:

1) параметры, связанные с географическими особенностями размещения опоры (филиал и наименование сети, координаты опоры);

2) параметры, связанные с физическим описанием опоры (класс напряжения, марка и срок службы опоры, тип грунта, тип фундамента, наличие типовых дефектов опоры);

3) параметры, связанные с используемыми проводами (марка провода, размер габаритного пролета, фактические величины пролетов до и после опоры);

4) параметры, связанные с информацией об изоляционной подвеске (тип и марка изолятора, количество изоляторов, суммарная длина гирлянды).

Второй информационный поток включает ввод в программу данных, получаемых в процессе осуществления эксперимента по сбору динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций, в том числе: спектра собственных колебаний частот и амплитуд частот.

Третий информационный поток связан с внесением

расчетных данных, получаемых в процессе теоретического исследования зависимости спектров собственных колебаний частот от марок опор линий электропередачи.

На основании собранных данных осуществляется визуализация фактического технического состояния как одной опоры линий электропередачи, так и всех опор, относящихся к одной марке; анализ динамики фактического технического состояния опор линий электропередачи.

Таким образом, цель разработки структуры базы данных заключалась в сборе и хранении информации, связанной с визуальным осмотром опор линий электропередачи, проведением натурных испытаний опор и с выполненными теоретическими расчетами. Исходя из этого, основными функциями базы данных являются следующие: внесение, редактирование, вывод информации о состоянии опор на основе их визуального осмотра; внесение, редактирование, вывод информации о состоянии опор на основе их натурных испытаний; внесение, редактирование, вывод информации о состоянии опор на основе проведенных теоретических расчетов по ним.

Для реализации цели и функционала структуры базы данных были определены основные сущности, их атрибуты и домены. На основании анализа исходных данных была спроектирована база данных.

Готовая база данных содержит следующие основные таблицы, которые можно разделить на несколько логически связанных между собой групп:

1) таблицы, содержащие информацию о физических характеристиках исследуемых опор, а также о географических особенностях их размещения;

2) таблицы, в которых хранится информация об используемых проводах;

3) таблицы, включающие информацию об изоляционной подвеске;

4) таблицы, с расчетными и экспериментальными данными.

К первой группе относятся следующие таблицы: filials, nets, number-powerline, type-powerline, powerlines, type-ground, type-base. Таблица filials включает информацию о коде филиала и его наименовании. В таблице nets хранится информация о коде сети, коде филиала и наименовании сети. Таблица number-powerline позволяет сформировать полный идентификатор опоры, по которому можно определить, к какому филиалу и к какой сети она относится. Таблица type-powerline хранит информацию о коде типа опоры и его наименовании. Таблица type-ground содержит информацию о коде типа грунта и его наименовании. В таблице type-base хранится информация о кодах типов фундаментов и их наименованиях.

Таблица powerlines содержит всю информация об опорах, в том числе: номера опор, их марки, типы грунта, типы фундаментов, марки проводов и грозотросов, марки и классы напряжения изоляторов, год запуска опоры в эксплуатацию, информацию о

типовых дефектах опор, значения длин пролетов до и после опоры, координаты опор (широта и долгота), а также информация о статусе опоры (архивная или рабочая).

Ко второй группе относятся следующие таблицы: brand-cables, brand-lightning-cables. Таблица brand-cables отвечает за хранение данных о коде марки провода и его наименовании. В таблице brand-lightning-cables хранится информация о марках и наименованиях грозотросов.

К третьей группе относятся следующие таблицы: type-isolators, brand-isolators. В таблице type-isolators хранятся данные о коде типа изолятора и непосредственно сами наименования изоляторов. Таблица brand-isolators содержит информацию о коде марки изолятора, кодах типов изолятора и наименованиях марок изоляторов, используемых в сети электропередачи.

К последней группе относятся следующие таблицы: brand-powerline, sensors, experiments. Таблица brand-powerline включает в себя информацию о коде марки опоры, код типа опоры, наименовании опоры, а также расчетные значения спектра собственных колебаний частот. Поскольку в данной таблице представлены расчетные величины частот, то их амплитуды имеют максимальные значения, равные 1.

В следующей таблице под названием sensors хранится информация о коде датчика, кодах опор, датах проведения экспериментов с применением указанных датчиков, номерах датчиков и информация о способе размещения датчика на опоре (продольное или поперечное размещение). Таблица experiments включает в себя данные о коде эксперимента, коде датчика, а также значениях тестовых амплитуд и соответствующих им частот.

Таким образом, в результате проектирования была создана база данных, позволяющая хранить и обрабатывать информацию, необходимую для работы программного обеспечения в достаточном объеме.

Контроль технического состояния опор осуществляется на основе расчета коэффициента запаса, который показывает, на сколько значение спектра собственных колебаний частот, полученное экспериментальным путем, отличается от расчетного, то есть нормируемого. В зависимости от значения коэффициента проводится разделение опор на группы. В результате анализа динамических характеристик опор линий электропередач можно сделать вывод об их техническом состоянии в конкретный момент времени. В дальнейшем, изучив динамику изменения данных характеристик, можно спрогнозировать период эксплуатации любой опоры линии электропередачи.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик пространственных решетчатых конструкций является важным и актуальным направлением в инженерной отрасли. Это объясняется тем, что решетчатые

конструкции, такие как: мосты, вышки и другие инженерные сооружения, подвержены воздействию различных факторов окружающей среды. В связи с этим, мониторинг динамических характеристик таких конструкций позволяет выявить и спрогнозировать потенциальные проблемы и риски. Разработка программного обеспечения для мониторинга динамических характеристик решетчатых конструкций позволяет своевременно обнаруживать отклонения от нормы и предотвращать возможные аварийные ситуации. Это способствует повышению безопасности и защите людей, находящихся вблизи данных конструкций.

Программное обеспечение для мониторинга динамических характеристик позволяет в режиме реального времени получать данные о состоянии конструкции и ее поведении при различных условиях. Это позволяет оптимизировать планы обслуживания и проводить ремонтные работы с минимальными простоями и затратами.

Собранные данные о динамических характеристиках решетчатых конструкций могут быть использованы для анализа и прогнозирования их поведения в будущем. Это поможет в разработке более надежных и долговечных конструкций, а также в принятии решений по модернизации и улучшению существующих сооружений.

Разработанное программное обеспечение может быть интегрировано с другими системами управления и мониторинга, такими как: системы автоматизации и диспетчеризации. Программа позволяет визуализировать данные о динамических характеристиках решетчатых конструкций в удобном и понятном виде. Благодаря чему, операторы и инженеры могут легко анализировать информацию и принимать решения на основе надежных данных. Кроме того, можно создавать отчеты о состоянии конструкций, которые могут быть использованы в документации и коммуникации с заинтересованными сторонами.

Программное обеспечение для мониторинга динамических характеристик решетчатых конструкций может интегрироваться с различными датчиками, используемыми для сбора данных о деформациях, вибрации, температуре и других параметрах конструкций. Это позволяет получать непрерывные и точные измерения, которые затем обрабатываются и анализируются программным обеспечением.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Чернов О.И. Современное состояние электрических сетей России и перспективы развития / О.И. Чернов, Е.А. Елисеева // *Academy*. — 2021. — № 7 (70). — С. 20-22.
- [2] Куценко Г.Ф. Основные показатели надежности ЛЭП 6-10 кВ / Г.Ф. Куценко, О.Ю. Пухальская // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. — 2006. — № 6. — С. 20-23.
- [3] Шелковников Н.Д. Способ и устройство автоматизированной защиты ЛЭП от снежно-ледового покрытия / Н.Д. Шелковников, Д.Н. Шелковников // *ОНВ*. — 2011. — № 1 (97). — С. 130-134.
- [4] Горбина Е.В. Уменьшение климатических воздействий на ЛЭП / Е.В. Горбина // *Приоритетные научные направления: от теории к практике*. — 2016. — № 26-1. — С. 177-182.

- [5] Ефимов Е.Н. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110-750 кВ в 1997-2007 гг. / Е.Н. Ефимов, Л.В. Тимашова, Н.В. Ясинская // Энергия единой сети. — 2012. — № 5. — С. 32-41.
- [6] Dhua S.K., Patra B.B., Sarkar P.P. Metallurgical Investigation of a Cracked Splice Plate Used in a Power Transmission Line Tower. *J Fail. Anal. and Preven.* 14, 754–762 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9890-7>.
- [7] Asyraf M.R.M., Ishak M.R., Syamsir A. Filament-wound glass-fibre reinforced polymer composites: Potential applications for cross arm structure in transmission towers. *Polym. Bull.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04114-4>.
- [8] Lyazgin A.L., Lyashenko V.S., Ostroborodov S.V. Experience in the Prevention of Frost Heave of Pile Foundations of Transmission Towers under Northern Conditions. *Power Technology and Engineering* 38, 124–126 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:HYCO.0000036365.64731.4c>.
- [9] Pan H., Li C., Tian L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs. *Bull Earthquake Eng* 19, 4311–4337 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01124-x>.
- [10] Naamith A., Sivasubramanian J., Sakthi G.S. Vulnerable member assessment of power transmission towers collapsed during Vardah cyclone. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 232 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00831-x>.
- [11] Kachanovskaya L.I., Fel'dman M.L., Mishchenko V.V. Estimation of the Technical Condition of Overhead Transmission Lines After 30 Years of Operation. *Power Technology and Engineering* 38, 54–56 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:HYCO.0000029635.51387.f5>.
- [12] Khromyshev N.K., Ol'shanskii V.G., Stolpovskaya E.V. Problems of Design, Construction, and Operation of the Foundations of Transmission Towers in the Northern Regions of Western Siberia. *Power Technol Eng* 49, 150–152 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0589-z>.
- [13] Mozakka I., Zeynalian M., Hashemi M. A feasibility study on construction methods of high voltage transmission towers' foundations. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 21, 41 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00197-4>.
- [14] Безмельницын В.Т. Примеры расчета строительных конструкций с использованием программы FEMAP / В.Т. Безмельницын, А.М. Щербаков // Достижения вузовской науки. — 2014. — № 9. — С. 104-108.
- [15] Лебедев В.Д. Исследование математических подходов к определению частотно-зависимого внутреннего сопротивления провода воздушной линии электропередачи / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Г.А. Филатова // Вестник ИГЭУ. — 2022. — № 3. — С. 24-34.
- [16] Шуин В.А. Моделирование кабельных линий напряжением 6-10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю / В.А. Шуин, Ю.Д. Кутумов, Н.В. Кузьмина // Вестник ИГЭУ. — 2021. — № 5. — С. 30-40.
- [17] Магомедов М.А. Эффективные конструкции поверхностных фундаментов для линий электропередач / М.А. Магомедов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2021. — № 3 (38). — С. 440-445.

печатных работ: 6. Область научных интересов: информационные технологии, информационные сети.

Истратова Евгения Евгеньевна. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления. Количество печатных работ: 121. Область научных интересов: информационные технологии, информационные сети, системы компьютерного зрения. e-mail: istratova@mail.ru (ответственная за переписку).

Кожевников Алексей Николаевич. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Кандидат технических наук, доцент кафедры прочности. Количество печатных работ: 42. Область научных интересов: информационные системы, тензометрия, прочностные расчеты.

Ласточкин Павел Валерьевич. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Аспирант факультета летательных аппаратов. Количество печатных работ: 22. Область научных интересов: информационные системы и технологии, информационные сети.

Глинин Евгений Вадимович. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Магистрант факультета автоматизации и вычислительной техники. Количество

Development of software for monitoring the dynamic characteristics of spatial lattice structures

E.E. Istratova, A.N. Kozhevnikov, P.V. Lastochkin, E.V. Glinin

Abstract — Control of the actual technical condition of overhead power transmission line supports is an urgent task that has not been fully resolved at the moment. The article presents the results of the analysis of the subject area, on the basis of which software was developed for monitoring and controlling the technical condition of power transmission line supports during their operation. In the course of the work, the object of study was identified, the subject area was studied, as well as the most common operational defects and their impact on the strength of structures of power transmission line supports. Then the analysis of the software for carrying out strength calculations was carried out, the methodology for conducting the experiment was determined, and the goals, objectives, and functions of the software were formulated. The developed software is a web application for automating the processes of collecting and processing data on the state of transmission line supports. Control of the operation of supports is carried out by analyzing and comparing the obtained spectra of natural oscillations of the frequencies of the supports with their calculated values. The finished software product can be used for educational and research purposes to monitor the dynamic characteristics of spatial lattice structures.

Keywords — software, supports, dynamic characteristics, monitoring, spatial lattice structure, power lines.

REFERENCES

- [1] Chernov O.I. The current state of electrical networks in Russia and development prospects / O.I. Chernov, E.A. Eliseeva // *Academy*. - 2021. - № 7 (70). - S. 20-22.
- [2] Kutsenko G.F. Main indicators of reliability of power transmission lines 6-10 kV / G.F. Kutsenko, O.Yu. Pukhalskaya // *Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. - 2006. - № 6. - S. 20-23.
- [3] Shelkovnikov N.D. Method and device for automated protection of power lines from snow and ice cover / N.D. Shelkovnikov, D.N. Shelkovnikov // *ONV*. - 2011. - №1 (97). — S. 130-134.
- [4] Gorbina E.V. Reducing climatic impacts on power lines / E.V. Gorbina // *Priority scientific directions: from theory to practice*. - 2016. - №
- [5] Efimov E.N. Causes and nature of damage to components of overhead transmission lines with a voltage of 110-750 kV in 1997-2007. / E.N. Efimov, L.V. Timashova, N.V. Yasinskaya // *Energy of a single network*. - 2012. - № 5. - S. 32-41.
- [6] Dhua S.K., Patra B.B., Sarkar P.P. Metallurgical Investigation of a Cracked Splice Plate Used in a Power Transmission Line Tower. *J Fail. Anal. and Preven.* 14, 754–762 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9890-7>.
- [7] Asyraf M.R.M., Ishak M.R., Syamsir A. Filament-wound glass-fibre reinforced polymer composites: Potential applications for cross arm structure in transmission towers. *Polym. Bull.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04114-4>.
- [8] Lyazgin A.L., Lyashenko V.S., Ostroborodov S.V. Experience in the Prevention of Frost Heave of Pile Foundations of Transmission Towers under Northern Conditions. *Power Technology and Engineering* 38, 124–126 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:HYCO.0000036365.64731.4c>.
- [9] Pan H., Li C., Tian L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs. *Bull Earthquake Eng* 19, 4311–4337 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01124-x>.
- [10] Haamidh A., Sivasubramanian J., Sakthi G.S. Vulnerable member assessment of power transmission towers collapsed during Vardah cyclone. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 232 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00831-x>.
- [11] Kachanovskaya L.I., Fel'dman M.L., Mishchenko V.V. Estimation of the Technical Condition of Overhead Transmission Lines After 30 Years of Operation. *Power Technology and Engineering* 38, 54–56 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:HYCO.0000029635.51387.f5>.
- [12] Khromyshev N.K., Ol'shanskii V.G., Stolpovskaya E.V. Problems of Design, Construction, and Operation of the Foundations of Transmission Towers in the Northern Regions of Western Siberia. *Power Technol Eng* 49, 150–152 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0589-z>.
- [13] Mozakka I., Zeynalian M., Hashemi M. A feasibility study on construction methods of high voltage transmission towers' foundations. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 21, 41 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00197-4>.
- [14] Bezmelnitsyn V.T. Examples of calculation of building structures using the FEMAP program / V.T. Bezmelnitsyn, A.M. Shcherbakov // *Achievements of high school science*. - 2014. - № 9. - S. 104-108.
- [15] Lebedev V.D. Investigation of mathematical approaches to the determination of the frequency-dependent internal resistance of the wire of an overhead power transmission line / V.D. Lebedev, N.V. Kuzmina, G.A. Filatova // *Vestnik ISPU*. - 2022. - № 3. - S. 24-34.
- [16] Shuin V.A. Modeling of cable lines with a voltage of 6-10 kV in the calculation of transient processes in case of ground faults / V.A. Shuin, Yu.D. Kutumov, N.V. Kuzmina // *Vestnik ISPU*. - 2021. - № 5. - S. 30-40.
- [17] Magomedov M.A. Efficient designs of surface foundations for power lines / M.A. Magomedov // *News of universities. Investments. Construction. Real estate*. - 2021. - № 3 (38). — S. 440-445.