

Система оценки надежности воздушных линий электропередачи

А. Ю. Чегодаева

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

StarkovaAY@mpei.ru

Аннотация. С 2018 года в России реализуется переход от системы планово-предупредительного вида организации ремонта к риск-ориентированному подходу. Для проведения оценок технического состояния в настоящий момент используется количественная интегральная величина – индекс технического состояния. Использование исключительно индекса технического состояния не всегда позволяет ранжировать элементы технологического оборудования по степени необходимости ремонта и последствий отказа. Система оценки надежности воздушных линий электропередачи позволит уточнить результаты расчета надежности при использовании индекса технического состояния, выявить в системе узлы, прежде всего нуждающиеся в осуществлении технического воздействия, что позволит оптимизировать затраты электросетевых компаний на ремонт оборудования. В то же время программный комплекс позволит вести базу данных состояния электросетевого оборудования, что впоследствии позволит прогнозировать техническое состояние воздушных линий на ее основе.

Ключевые слова: надежность; воздушные линии электропередачи; индекс технического состояния; цифровой двойник; ремонтные программы

I. ВВЕДЕНИЕ

В 2020 году на первой международной инженерно-технологической конференции «EnergyNet.CON 2020», посвященной проблемам цифровой трансформации энергетики, были названы ключевые направления цифровизации электроэнергетики, одним из которых является оптимальное и эффективное использование существующей сетевой инфраструктуры и генерации. К технологиям такого типа можно отнести новые алгоритмы контроля состояния элементов энергосистемы и прогнозирования вероятности отказа этих элементов на основании их фактического технического состояния.

С 2018 года в России реализуется переход от системы планово-предупредительного вида организации ремонта на объектах электросетевого хозяйства к организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учетом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков), так называемому риск-ориентированному подходу.

Для проведения оценки технического состояния в настоящий момент используется количественная интегральная величина, характеризующая техническое состояние оборудования и соответствующий уровень технического риска, – индекс технического состояния (далее ИТС), введенный постановлением Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2016 года №1401 [1].

В действующей методике оценки состояния технологического оборудования с использованием ИТС [2] было принято допущение, что рассматривается наиболее пессимистический сценарий, при котором ухудшение технического состояния и, соответственно, вероятность отказа развиваются стремительно и линейно.

По состоянию на 2021 год, в зоне ответственности ПАО «Россети» находится 2,4 млн км линий электропередачи [3]. При этом сроки эксплуатации большинства воздушных линий электропередачи (ВЛ) составляют 40–50 лет и более [4], соответственно, при исследовании этих объектов при помощи ИТС абсолютное большинство будет требовать усиленного контроля технического состояния и немедленного технического перевооружения. Данные по степени физического износа ВЛ за 2017 год позволяют отметить, что как минимум 49,6% ВЛ напряжением 110 кВ и 44,2% ВЛ напряжением 220 кВ и выше имеют ИТС меньше 70%, т.е. их состояние является удовлетворительным, неудовлетворительным или критическим, и требуют осуществления технического воздействия разной степени: от усиленного контроля технического состояния до немедленного технического перевооружения.

В условиях ограниченности бюджета и с учетом зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации одновременно вывести в ремонт большое количество линий не представляется возможным. То есть, из всего объема линий, ИТС которых находится в диапазонах, предполагающих дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение и реконструкцию, необходимо определить элементы, которые являются наиболее подверженными внешним факторам и в первую очередь нуждаются в осуществлении технического воздействия.

Для возможности определения приоритетности проведения ремонтов и для прогнозирования отключений ВЛ вследствие механических нагрузок разработан расчетный комплекс «Система оценки надежности воздушных линий электропередачи».

II. ПО «СИСТЕМА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ»

Разработанный расчетный комплекс включает в себя ПО для планшетных компьютеров «Система оценки надежности» (далее ПО «СОН») и 3D-модель опоры ВЛ.

A. ПО «СОН»

Приложение для планшетных компьютеров позволяет оптимизировать и автоматизировать процесс сбора и обработки результатов осмотра воздушных линий.

Алгоритм работы программы разработан на основе методики [2] и состоит из следующих пунктов:

1. Ввод пользователем данных о состоянии элемента ВЛ по результатам осмотра.
2. Присваивание каждому параметру состояния ВЛ балльной оценки от 0 до 4 в соответствии с выбранным пользователем вариантом состояния.
3. Выбор балльной оценки каждой группы параметров технического состояния (ОГП).
4. Расчет ИТС по формуле (1):

$$\text{ИТС} = 100 \cdot \sum_i \frac{KB_i \cdot \text{ОГП}_i}{4}, \quad (1)$$

где: KB_i – значение весового коэффициента для i -й группы параметров технического состояния в соответствии с приложением 6 [2]; ОГП_i – балльная оценка для i -й группы параметров технического состояния.

5. Вывод результатов расчета ИТС, степени рекомендованных технических воздействий в файл и на экран.

Зафиксированные дефекты и ИТС сохраняются в Excel-файле в памяти планшетного компьютера. Выгрузка данных из планшетного компьютера на стационарный компьютер производится с помощью USB-провода, вследствие чего формируется электронный листок осмотра ВЛ с указанием даты и времени проведения осмотра, ФИО и должности работника, проводившего осмотр.

Также при выгрузке данных формируется файл с перечнем обнаруженных дефектов ВЛ, который используется при формировании 3D-модели конкретной опоры для проведения дальнейших расчетов, и составления ранжированных по степени необходимости ремонта списков объектов.

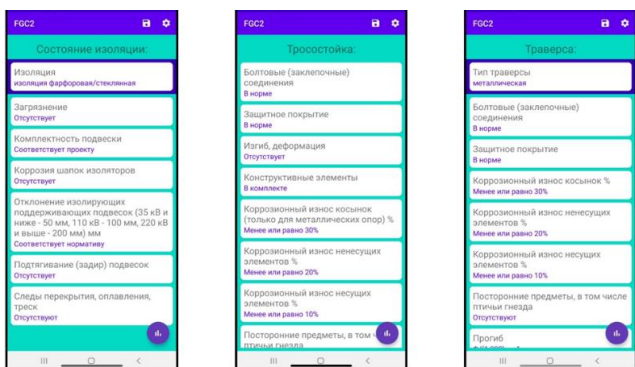


Рис. 1. Интерфейс приложения для планшетного компьютера

Интерфейс приложения представлен на рис. 1. Преимущество приложений для планшетных компьютеров относительно бумажного сбора информации или использования программ для ПК состоит, прежде всего, в удобстве ввода и обработки информации, возможности ведения базы данных, сокращении бумажного документооборота, мобильности в использовании.

В. Создание 3D-модели

Создание 3D-модели опоры ВЛ и синхронизация представления этой модели с реальным листком осмотра позволит и провести расчеты механической прочности для дальнейшего определения наиболее нуждающегося в ремонте элемента, и заложить базу для создания цифрового двойника ВЛ.

Поскольку именно анкерные опоры испытывают наибольшие нагрузки, за основу при разработке модели была взята анкерно-угловая опора У110-2, являющаяся типичным представителем серий опор, широко применяемых с середины 70-х по настоящее время. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Разработка модели проводилась с использованием систем трехмерного моделирования «Компас-3D» и «NX».

Цифровой двойник опоры ВЛ должен отображать ее возможные состояния, следовательно, необходимо моделирование дефектов опоры, которые могут привести к деформации или разрушению опоры и в дальнейшем будут необходимы при расчете механической прочности.

3D-модель опоры представляет собой сборочный чертеж, в котором некоторые из деталей имеют несколько вариаций: исходная и имеющая различные дефекты. При формировании актуальной расчетной модели возможен выбор конкретных дефектов из заранее созданной библиотеки.

Возможности созданной 3D-модели позволяют при дальнейшем развитии расширять и углублять библиотеку дефектов, добавляя новые их примеры, редактировать саму модель при необходимости, создавать на основе имеющихся наработок библиотеку моделей опор ВЛ различных типов.

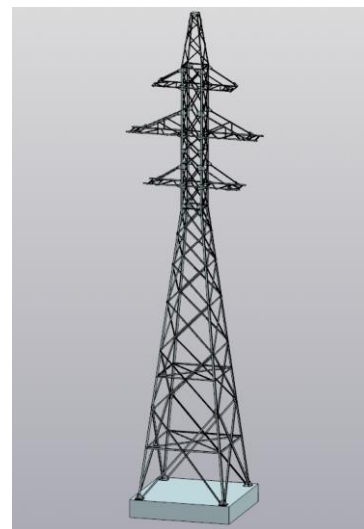


Рис. 2. 3D-модель опоры

Модель позволяет проводить расчеты механической прочности на основе конечно-элементарного анализа в системе АРМ-FEM – интегрированного в «Компас-3D» инструмента для прочностного анализа твердых тел.

С. Алгоритм работы с расчетным комплексом

1. Осуществляется осмотр ВЛ, во время которого в ПО «СОН» путем заполнения специализированной формы отмечаются обнаруженные дефекты.
2. Производится расчет ИТС, значение которого сохраняется в памяти ПО «СОН».
3. Данные из ПО «СОН» передаются на стационарный компьютер, при этом формируются листки осмотра ВЛ и файлы, содержащие информацию об обнаруженных дефектах для создания 3D-модели реальной опоры. Также результаты осмотра и расчета ИТС выгружаются в базу данных для сбора и последующей обработки статистического материала.
4. Исходные файлы для 3D-модели позволяют сформировать модель опоры ВЛ с учетом обнаруженных дефектов и провести расчеты механической прочности в ПО «Компас-3D» с учетом реальных метеорологических условий.
5. На основании значения ИТС и результатов проведенных расчетов формируется ранжированный список элементов ВЛ, требующих осуществления технического воздействия.

III. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ

В настоящее время, как упоминалось ранее, в рамках реализации риск-ориентированного подхода используется ИТС, и существует две возможных ситуации, в которых требуются дополнительные инструменты для оценки степени необходимости осуществления технического воздействия.

Первый вариант: в рамках одной группы значений ИТС (к примеру, критическое состояние) находятся m объектов, при этом в настоящий момент существует возможность реконструировать только n объектов (m больше n), и нужно определить, какие именно объекты оптимально вывести в ремонт.

Второй вариант: в рамках одной группы значений ИТС (к примеру, удовлетворительное состояние) находятся также m объектов, при этом у n объектов имеются дефекты, влияющие на механическую прочность объекта и, в общем, при определенных неблагоприятных погодных условиях эти дефекты могут привести к выходу объекта из строя, однако используя только и исключительно такой параметр как ИТС отследить такие ситуации является проблематичным.

В обоих случаях возможно сравнение результатов расчета механической прочности объектов при прогнозируемом погодном воздействии и, соответственно, выбор оптимального варианта для осуществления ремонта. Для этого проводится прочностной анализ 3D-моделей опор ВЛ при определенных метеорологических условиях. Пример деформированной конфигурации полноразмерной модели опоры без дефектов с распределением напряжений (красный цвет – наиболее значительные) представлен на рис. 3.

Таким образом, возможно определение предельного состояния для каждой опоры при учете ее фактического технического состояния и ранжирование опор в порядке

приоритетности осуществления ремонта в зависимости от метеорологических условий в каждом регионе.

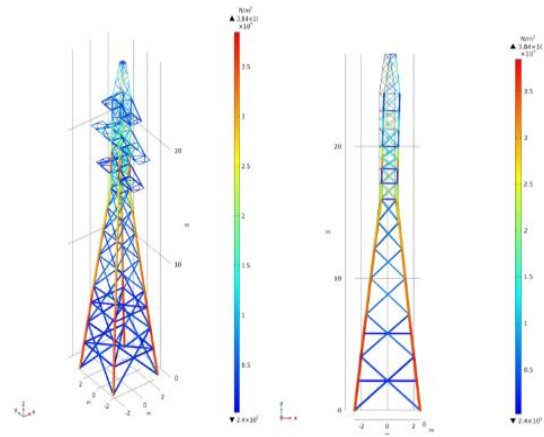


Рис. 3. Результат прочностного анализа

Предлагаемый подход к оценке надежности и определению наиболее уязвимых объектов сети имеет ряд преимуществ:

- Универсальность применения при условии создания достаточной для определенной операционной зоны библиотеки моделей опор;
- Удобство формирования исходных данных: для использования созданного расчетного комплекса не требуется проводить длительное и масштабное обучение сотрудников, поскольку персонал продолжает работать с привычными типовыми формами сбора данных;
- Наглядность представления и интерпретации результатов.

Предлагаемый к использованию в сетевых компаниях комплекс является дополнением к методике [2] и также может применяться в различных методиках по оценке рисков отключения ВЛ.

Стоит отметить, что при внедрении «Системы оценки надежности воздушных линий электропередачи» будет требовать изменения методика [5].

Прогноз вероятности отказа сегмента линии электропередачи (ЛЭП) на прогнозный период 5 лет по методике [5] описывается функцией $p_{\phi}(t)$ по формуле (2):

$$p_{\phi}(t) = (1 - y_{\lambda}(t)) \cdot k_{\lambda}, \quad (2)$$

где: $y_{\lambda}(t)$ – прогноз изменения ИТС сегмента ЛЭП; k_{λ} – коэффициент отношения величины ИТС сегмента ЛЭП до и после последнего технического воздействия или в предыдущем и текущем календарном году.

Однако при расчете данной функциональной зависимости не была учтена вероятность наступления неблагоприятных метеорологических условий, которые могут привести к выходу ВЛ из строя, и вероятность отказа сегмента ЛЭП прогнозируется как линейная функция от значения ИТС.

При появлении возможности определения предельных механических нагрузок и при учете метеорологических прогнозов (краткосрочных и статистически сформированных на основе особенностей микроклимата конкретного региона и территории) возможно дополнение прогноза вероятности отказа

сегмента ЛЭП на краткосрочный период и описания его функцией $p_{\phi}(t)$ по формуле (3):

$$p_{\phi}(t) = \max \left\{ (1 - y_{\lambda}(t)) \cdot k_{\pi}; p_{\text{п.пред}} \right\}, \quad (3)$$

где: $p_{\text{п.пред}}$ – вероятность наступления неблагоприятных метеорологических условий, при которых возможен выход сегмента ЛЭП из работы.

Таким образом, внедрение разработанного расчетного комплекса «Система оценки надежности воздушных линий электропередачи» позволит дополнительно ранжировать опоры по степени необходимости осуществления ремонта, но потребует некоторых изменений в действующих методиках оценки технического состояния оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 ноября 2017 года №2664-р. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/30360/>.
- [2] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26 июля 2017 года №676. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456088008>.
- [3] Сайт организации ПАО «Россети», [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosseti.ru/>
- [4] Каверина Р., Коган Ф., Яковлев Л. Повышение надежности воздушных линий 35-750 кВ. Общие вопросы состояния ВЛ // Новости ЭлектроТехники, 2007, № 4(46). [Электронный ресурс]. URL: <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/11.php>.
- [5] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 19 февраля 2019 года №123, [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542643279#64U0IK>.