УДК 622.621.311.21

Каранчуков Александр Николаевич, студент
(ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск)
Aleksandr N. Karanchukov, student
(SUSU, Chelyabinsk)

Королёв Кирилл Евгеньевич, студент
(ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск)
Kirill E. Korolev, student
(SUSU, Chelyabinsk)

Научный руководитель
Сидоров Александр Иванович, д.т.н., профессор кафедры БЖД
Scientific advisor
Aleksandr I. Sidorov, Dr. Sci (Eng.), Professor of Life Safety Department

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПАДЕНИИ ФАЗНОГО ПРОВОДА НА ЗЕМЛЮ

PHYSICAL MODEL FOR STUDYING TRANSIENT RESISTANCE WHEN A PHASE WIRE FAILS TO EARTH

Аннотация. Переходное сопротивление определяет ток замыкания на землю, вероятность возникновения опасных шаговых напряжений, а также чувствительность и селективность работы релейной защиты. Однако практика показывает, что значение переходного сопротивления не является постоянной величиной — оно кардинально меняется в зависимости от типа грунта, его влажности, усилия прижатия провода и его положения на поверхности. Неучет этих особенностей приводит к созданию реальной угрозы поражения электрическим током людей и животных, оказавшихся в зоне растекания тока, а также возникновению пожаров.

Annotation. The contact resistance determines the ground fault current, the likelihood of dangerous step voltages occurring, as well as the sensitivity and selectivity of the relay protection system. However, practice shows that the value of contact resistance is not a constant — it changes dramatically depending on the type of soil, its moisture content, the pressure applied to the wire, and its position on the surface. Failure to take these factors into account creates a real threat of electric shock to people and animals that find themselves in the area where the current spreads, as well as the risk of fires.

Аварийный режим, возникающий при падении оборванного провода на поверхность грунта, характеризуется протеканием тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). При этом в месте контакта провода с грунтом образуется так называемое переходное сопротивление величина, которого в значительной степени определяет ток замыкания, уровень перенапряжений в линии, причины возникновения пожара, а также степень опасности

поражения электрическим током людей и животных, оказавшихся в зоне растекания тока.

Основной причиной повреждаемости проводов является их обрыв от воздействия ветровых и гололёдно-ветровых нагрузок (64 %), а также от перегорания проводов при их схлёстывании, перегорания из-за высоких электрических нагрузок происходят значительно реже.

Анализ аварийных отключений ВЛ 6-10 кВ, проведённый за период пятилетней эксплуатации в Башкирской энергосистеме [1], выявил причины возникновения обрывов проводов ВЛ 6-10 кВ (таблица 1).

Таблица 1 - Причины возникновения обрывов проводов 6-10 кВ

Причина	Количество отключений	
	абс.	%
Ветровые нагрузки	91	38,9
Гололёдно-ветровые нагрузки	94	40,2
Низкие отрицательные температуры воздуха	40	17,0
Падение деревьев на провода	2	0,9
Строительно монтажные дефекты	5	2,1
Заводской брак	2	0,9
Всего	234	100

Для экспериментального изучения динамики обрыва проводов воздушных линий электропередачи и характера их падения на землю был разработан и изготовлен лабораторный стенд, представляющий собой масштабную модель двухопорной системы ВЛ-6 кВ. Масштаб модели (1:50) выбран исходя из необходимости размещения стенда в лабораторном помещении, обеспечения наглядности процессов и возможности многократного повторения экспериментов при различных начальных условиях.

Основные задачи, решаемые с помощью стенда:

- Визуализация процесса падения провода при его обрыве в разных точках пролёта.
- Оценка радиуса опасной зоны для людей и техники при обрыве провода ВЛ-6 кВ.
- Изучение влияния натяжения провода, высоты подвеса и расстояния между опорами на характер падения.

Стенд выполнен в масштабе 1:50 по отношению к реальной воздушной линии напряжением 6 кВ. Основные геометрические параметры стенда приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные параметры стенда в сравнении с реальной ВЛ-6 кВ

Параметр	Значение для реальной ВЛ-6 кВ	Значение для стенда
Высота опоры	10,0-12,0 м	200-240 мм
Принятая высота опоры	10,0 м	200 мм
Расстояние между опорами (пролёт)	40-60 м	800-1200 мм
Принятое расстояние между опорами	50,0 м	1000 мм
Диаметр провода	9 мм	0,18 мм
Стрела провиса провода	1,0-1,5 м	0; 2; 4 мм

В настоящей модели провод был натянут тремя вариациями величины стрелы провиса (0; 2; 4 мм) для наблюдения зависимости падения провода при обрыве.



Рисунок 1 - Эскиз экспериментального стенда

Две опоры стенда выполнены из жёсткого материала (металлический цилиндр) высотой 200 мм каждая. Конструкция опоры обеспечивает:

- Вертикальную устойчивость модели при различных режимах натяжения провода.
- Возможность регулировки натяжения провода.
- Крепление изоляторов на траверсе (для ВЛ-6 кВ траверса расположена на вершине опоры, так как проводка – одноцепная, без разделения на уровни).

На вершине каждой опоры жёстко закреплена траверса, на которой установлен изолятор. В простейшем исполнении для демонстрационных экспериментов нами использовалась однофазная модель (изолятор на одной опоре – один провод, на другой – аналогично).

В стенде используется провод с тремя вариантами стрелы провиса. Провод закрепляется на изоляторах с возможностью его быстрой замены и

изменения натяжения для возможности провести эксперимент с обрывом провода многократно.

Для имитации аварийного режима (обрыва провода) были проведены следующие эксперименты:

1) Наклон правой опоры до обрыва провода (без стрелы провиса) - имитация наезда техники на опору;

2) Обрез провода по центру - имитация падения дерева на провод.

Обрез провода осуществлялся тремя вариациями натяжения:

1) Без стрелы провиса;

2) Со стрелой провиса 2 мм;

3) Со стрелой провиса 4 мм.

Разработанный стенд может быть использован для:

1) Эмпирической проверки результатов математического моделирования динамики падения проводов.

2) Определения зависимостей радиуса разлёта провода от начального натяжения и высоты подвеса.

3) Демонстрации в учебных аудиториях (подготовка электромонтёров, оперативно-ремонтного персонала).

4) Оптимизации расстановки защитных устройств (например, временных ограждений в охранной зоне) при производстве работ на ВЛ.

В ходе лабораторных экспериментов было обнаружено, что место обрыва провода и его ориентация относительно опор существенно влияют на конечное расположение оборванного проводника относительно зоны растекания тока.

Серия 1. Обрыв провода на изоляторе опоры при натяжении правой опоры стенда

При проведении опытов с имитацией одностороннего натяжения провода (натяжение создавалось только правой опорой стенда, левая опора закреплялась жёстко без натяжного устройства) было установлено следующее:

- В момент обрыва провода в зоне контакта с изолятором левой опоры происходило резкое освобождение накопленной механической энергии.
- Провод, оборвавшийся непосредственно у изолятора левой опоры, под действием силы натяжения со стороны правой опоры с высокой скоростью перемещался в сторону правого края стенда.
- Во всех повторных испытаниях провод полностью покидал зону между опорами и улетал за правую опору, не касаясь поверхности грунта на участке между опорами.
- При этом явление «стрелы провиса» (изначального провисания провода между опорами) в данной серии экспериментов отсутствовало — провод был натянут без заметного провисания.

Данный результат позволяет сделать вывод, что при реальном обрыве провода на опоре с односторонним натяжением возможно полное «выдёргивание» оборванного конца за пределы пролёта, что существенно изменяет локализацию места замыкания на землю по сравнению с обрывом в середине пролёта.

Серия 2. Имитация падения дерева на провод в центре ЛЭП (обрез провода по центру пролёта)

Для моделирования внешнего воздействия (падение дерева, обледенение, перехлёст проводов) проводилась серия опытов с обрезом провода в геометрическом центре пролёта между двумя опорами стенда.

Условия эксперимента:

- Длина пролёта: 1 м (масштабированная модель).
- Точка обрыва: строго по центру пролёта.
- Варьируемый параметр: стрела провиса (0 мм, 2 мм, 4 мм) перед обрезом.

Способ обрыва: механическая обрезка проводника. Результаты данного опыта представлены в таблице 3

Таблица 3 - Зависимость конечного положения провода после обрыва от стрелы провиса

Стрела провиса, мм	Характер падения концов провода
0	Концы провода при падении отклонились незначительно (5 см), зона контакта с грунтом - компактная, оба конца остались в пределах центральной части пролёта.
2	Заметное расхождение концов после обреза: левый и правый концы отклонились в противоположные стороны на расстояние 15 см от центра падения.
4	Максимальное расхождение: концы провода разлетелись на 23 см в разные стороны относительно точки обрыва. Зона контакта с грунтом заняла почти весь пролёт.

Была выявлена устойчивая закономерность: чем больше стрела провиса, тем дальше оборванные части провода отдаляются друг от друга при падении. Это объясняется тем, что при наличии провиса в проводе накапливается дополнительная потенциальная энергия упругой деформации. В момент обрыва эта энергия преобразуется в кинетическую энергию движения концов провода в горизонтальной плоскости, перпендикулярной оси линии.

При стреле провиса 4 мм наблюдалось не только расхождение концов, но и их закручивание вокруг продольной оси, что приводило к многократным касаниям грунта разными участками провода. Это обстоятельство крайне важно для прогнозирования переходного

сопротивления: при падении с большой стрелой провиса один и тот же оборванный провод может последовательно замкнуть землю в нескольких точках, создавая несколько параллельных путей для тока замыкания и снижая общее переходное сопротивление по сравнению с точечным контактом.

Разработанный лабораторный стенд позволяет моделировать процесс падения оборванного провода ВЛ-6 кВ. Универсальность стенда позволяет варьировать стрелу провиса, место обрыва провода, а также проводить данный эксперимент многократно.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что механические условия обрыва (место обрыва, наличие и величина стрелы провиса) являются существенными факторами, определяющими финальную конфигурацию контакта оборванного провода с землёй. Игнорирование этих факторов при моделировании аварийных режимов на ВЛ-6 кВ может приводить к некорректной оценке величины переходного сопротивления, токов замыкания на землю и, как следствие, к ошибкам при настройке устройств релейной защиты и оценке электробезопасности в зоне аварии.

Список литературы

1) Усманов, Ф. Х. Анализ отключений сельских ВЛ 6-10 кВ / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, В. А. Максимов // Электрические станции. – 1980. – № 8. – С. 56-58.