

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

© 2019 В. И. Бирюлин¹, Д. В. Куделина²

¹канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения
e-mail: bir1956@mail.ru

²канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения
e-mail: mary_joy@mail.ru

Юго-Западный государственный университет

В статье рассматриваются вопросы нахождения оценок состояния изоляции кабельных линий различных электрических сетей. Показано, что на состояние изоляции влияет большое количество воздействующих факторов, часть из которых являются неопределенными и не могут быть выраженными в количественной форме. Предложено для получения оценки состояния изоляции применить систему нечеткого логического вывода, обеспечивающую обработку как количественной, так и качественной информации, что позволяет получать более обоснованные результаты по сравнению с использованием только количественной информации.

Ключевые слова: изоляция, кабельные линии, нечеткая логика, экспертные оценки, нечеткий вывод

В системах электроснабжения широкое распространение получили кабельные линии. Основными элементами этих линий являются силовые кабели различных классов напряжения. Эти кабели прокладываются различными способами, в том числе и в земле, включая размещение их в кабельных траншеях. Такая прокладка имеет ряд достоинств, но при этом имеет также и недостатки, включая сложность проведения осмотров и диагностики.

Во время работы кабелей на их изоляцию постоянно действует целый комплекс факторов, вызывающих в изоляционных материалах различные физико-химические процессы, создающих необратимые изменения характеристик или старение изоляции. В конечном итоге это приводит к нарушению электрической прочности или же пробоем изоляции [9]. Этот комплекс неблагоприятных факторов, воздействующих на изоляцию кабельных линий, можно разделить на несколько групп.

В первую группу данных факторов включаются проектные данные, среди которых наиболее важными являются глубина прокладки кабелей, трасса прохождения кабельных линий, характеристики грунтов и мест пересечения данных линий с другими инженерными сетями, а также автомобильными и железными дорогами. Ранее проведенные исследования показывают [6; 7], что перечисленные факторы могут в значительной степени влиять на характеристики изоляции кабелей. Большие сезонные колебания температуры неизбежно создают перемещения грунта и, как следствие их, механические усилия на кабели, проложенные в траншеях.

Во вторую группу рассматриваемых факторов входят эксплуатационные воздействия. Среди них следует выделить процессы нагрева токоведущих жил и других элементов кабелей токами, протекающими как при нормальных условиях работы, так и при перегрузках и КЗ. Последствия повышенного нагрева изоляции вследствие протекания токов перегрузки и КЗ сложно выразить количественной оценкой, потому что значения токов перегрузки и КЗ зачастую являются неопределенной величиной.

Также в эту группу необходимо включить возможные повреждения в ходе разнообразных подземных и наземных работ. Негативные последствия этих работ можно оценить только качественными оценками, источниками которых могут быть различные эксперты. Также следует учитывать, что на процессы старения изоляционных материалов может заметно влиять местоположение кабелей в схемах электрических сетей. Известно, что сроки службы кабельной изоляции от момента ввода в эксплуатацию до возникновения пробоя в кабельных линиях, находящихся на головных участках электросетей, меньше (около 186 месяцев), чем у линий на других участках (примерно 200 месяцев) [6; 8; 9]. Такое положение объясняется тем, что на головные кабельные линии чаще и интенсивнее действуют токи КЗ.

В третью группу следует отнести параметры, проявление которых напрямую зависит от персонала, обслуживающего данные электрические сети. Эти факторы отражают уровень квалификации персонала, непосредственно работающего на рассматриваемых кабельных линиях во всех периодах эксплуатации, включая выполнение строительно-монтажных работ, проведение диагностических испытаний и ремонтных работ.

Задача нахождения оценки состояния изоляции кабельных линий имеет трудноформализуемый характер, связанный в первую очередь с наличием неопределенности и неоднозначности в исходных данных. Также для успешного решения этой задачи необходимо учитывать сложности в определении взаимных связей между контролируемыми параметрами оборудования и внешними проявлениями развивающихся дефектов кабельной изоляции. В задачах такого рода следует использовать экспертные знания для повышения достоверности получаемых результатов, все это ограничивает возможности применения различных методов, рассчитанных прежде всего на обработку информации, выражаемой количественными оценками.

Проблемы, возникающие при исследовании подобных систем, достаточно легко разрешаются на основе применения математического аппарата нечетких множеств или нечеткой логики. В настоящее время использование данного математического аппарата является одним из наиболее эффективных тенденций при изучении сложных организационно-технических систем [1], в том числе и в области энергетики. Математическое моделирование воздействия различных внешних факторов на кабельные линии, в том числе и на изоляцию, – сложная задача, так как существует многообразие этих факторов, выражаемых как количественными, так и качественными оценками.

Использование аппарата нечеткой логики для решения подобных задач оказывается очень эффективным. Поэтому для нахождения оценки состояния изоляции кабельных линий различных классов напряжения применяем систему нечеткого логического вывода (НЛВ). Разработка и применение системы НЛВ осуществляется в виде последовательности действий [3; 10; 11], более подробно показанной ниже.

Для создания системы НЛВ все знания, которые имеются по рассматриваемому объекту или кабельной линии, представляются в виде некоторой формальной логической системы. Представим формальную логическую систему в общем виде с помощью четырех отдельных составляющих [2; 10]:

$$M = \langle T, P, A, B \rangle, \quad (1)$$

где T – множество базовых элементов; P – множество синтаксических правил; A – множество аксиом, то есть формул, признанных изначально истинными; B –

разработанные правила вывода результатов, которые составляют самую сложную часть формальной логической системы.

При разработке формальных логических систем на практике целесообразно выполнить замену этих систем нечеткими продукционными моделями. Нечеткая продукционная модель представляет собой согласованное множество отдельных нечетких продукционных правил вида <Если – то> и итоговое заключение по каждому правилу в виде нечетких высказываний. Структура разрабатываемой нечеткой продукционной модели определяется конкретной решаемой задачей и имеющейся исходной информацией.

Входные данные для разрабатываемой системы НЛВ представляют собой причины, действие которых приводит к старению изоляционных материалов, применяемых в кабелях. Значение выходной переменной системы – это оценка степени состояния изоляции. Для решения поставленной задачи применяем MISO-систему со многими (n) входными переменными и одной выходной переменной (система имеет много входов, для ввода различных исходных данных, один выход для получения оценки степени износа изоляции).

Подобные системы реализуют отображение следующего вида:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots x_n), \quad (2)$$

где y – выходная величина, для нашего случая представляет оценку степени износа изоляции; $x_1, x_2, x_3, \dots x_n$ – входные величины или исходные данные.

Нечеткая система для определения оценки состояния изоляции создается на основе алгоритма Мамдани [2; 10]. Все факторы, под действием которых происходит снижение электрической прочности изоляции, представляем как некоторое свойство создаваемой системы, рассматриваемое в математической модели и оцениваемое качественным показателем, например: «уровень нагрева изоляции током, протекающим по всем токоведущим жилам кабеля».

Для каждого входного фактора в разрабатываемой системе вводится отдельная лингвистическая переменная, характеризуемая своим терм-множеством $T_i = \{T_{1i}, T_{2i}, \dots T_{mi}\}$. В это множество входят нечеткие оценки возможных значений или состояний рассматриваемого фактора, например: «low» – «низкий», «middle» – «средний», «high» – «высокий», а также синтаксические и семантические правила.

Для обработки исходной информации применяются известные действия: выполнение фаззификации входных переменных или данных; осуществление операции нечеткого вывода; получение композиции подзаключений или же объединение исходных нечетких множеств в одно нечеткое множество; итоговым действием является проведение дефаззификации полученного нечеткого значения [10]. Далее кратко укажем особенности выполнения этих действий.

Для фаззификации входных данных осуществляется выбор наиболее подходящих функций принадлежности. Данные функции имеют вид $\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots \mu_A(x_n)$ и предварительно должны определяться для применяемых исходных данных.

Для относительно небольших объемов применяемой входной информации целесообразно использовать простые функции принадлежности, состоящие только из прямолинейных участков, или же многоугольные функции. Для таких функций легко обеспечивается условие, что сумма всех степеней принадлежности для каждого элемента нечеткого множества должна равняться 1 [12].

Для обработки крайних термов были использованы трапециевидные функции принадлежности, так как целесообразно, чтобы значения степеней принадлежности этих

термов вблизи границ интервала определения входной переменной были как можно ближе к единице. Вид примененных трапецевидных функций приведен на рисунке 1.

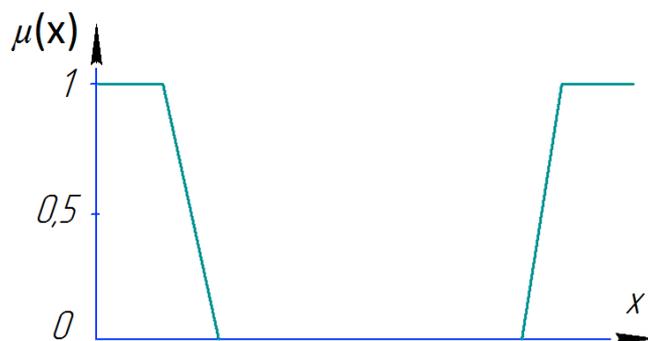


Рис. 1. Функции принадлежности для крайних термов

Трапецевидная функция принадлежности в общем случае определяется следующим образом [10]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d, \\ 0, & d \leq x. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь a, b, c, d – точки на оси x , определяющие вид этой трапеции.

Для средних термов каждого из рассматриваемых факторов используем треугольные функции принадлежности. Эти функции имеют вид, приведенный на рисунке 2.

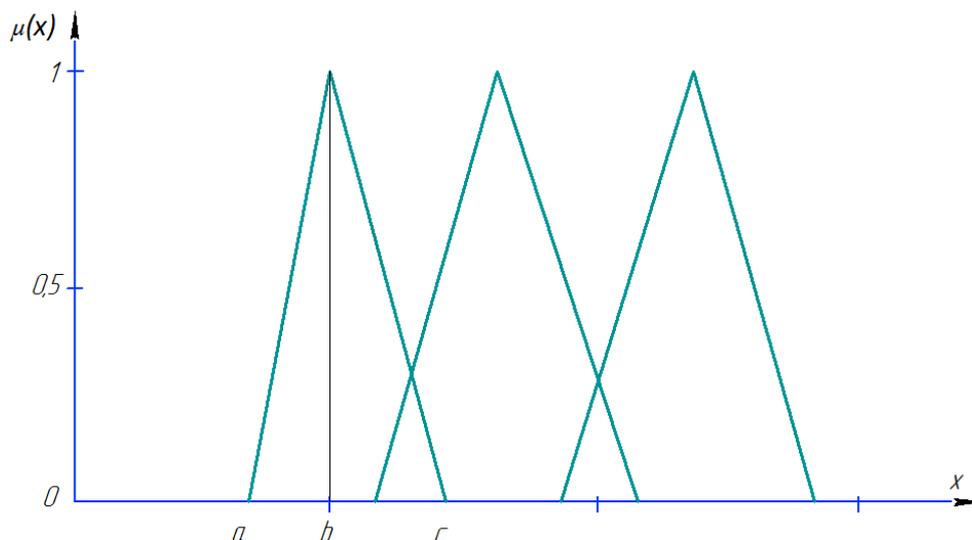


Рис. 2. Вид треугольных функций принадлежности

Данные треугольные функции представляются следующим аналитическим выражением [10]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x. \end{cases} \quad (4)$$

Для выполнения дефаззификации выбираем метод центра тяжести, потому что он использует все активизированные в данный момент функции принадлежности или же активные правила. Это обеспечивает более высокую чувствительность создаваемой нечеткой модели к изменению входных данных, чем применение методов первого максимума, последнего максимума, среднего максимума [10].

Разработанная система НЛВ выполняет реализацию следующего отображения входных величин системы X_1, \dots, X_N на ее выходной параметр Q :

$$X = (X_1, \dots, X_N) \rightarrow Q[0, 100]. \quad (5)$$

В качестве значений выходного параметра будем использовать определения, характеризующие состояние изоляции рассматриваемой кабельной линии:

- от 0 до 20 – этот интервал значений оценки уровня состояния изоляции определяется качественным параметром «очень низкий уровень»;
- от 20 до 40 – этот интервал значений оценки уровня состояния изоляции определяется качественным параметром «низкий уровень»;
- от 40 до 60 – этот интервал значений оценки уровня состояния изоляции определяется качественным параметром «средний уровень»;
- от 60 до 80 – этот интервал значений оценки уровня состояния изоляции определяется качественным параметром «уровень выше среднего»;
- от 80 до 100 – этот интервал значений оценки уровня состояния изоляции определяется качественным параметром «высокий уровень».

В качестве входных переменных системы НЛВ применяются следующие исходные данные:

- температура нагрева изоляции токами, протекающими в нормальном режиме работы, или X_1 ;
- температура нагрева токами, протекающими при КЗ, или X_2 ;
- вероятность возникновения ускоренного износа изоляции рассматриваемой кабельной линии из-за расположения на головных участках в электрической сети, или X_3 ;
- вероятность появления механических повреждений при земляных работах в зоне прокладки кабельной линии, или X_4 ;
- значение сопротивления изоляции кабеля, определенное при предыдущих испытаниях, или X_5 ;
- уровень частичных разрядов в изоляции, если производились необходимые для этого измерения, или X_6 ;
- вероятность возникновения опасных движений грунта на прямолинейных участках трассы прокладки данной кабельной линии, или X_7 ;
- вероятность возникновения опасных движений грунта в местах поворотов трассы прокладки рассматриваемой кабельной линии, X_8 ;

- соотношение между длинами поворотов и прямолинейных участков на трассе прокладки данной кабельной линии, X_9 ;
- количество кабельных муфт, используемых для соединения участков кабелей данной линии, X_{10} ;
- уровень квалификации персонала, производившего монтаж рассматриваемой кабельной линии, X_{11} ;
- уровень квалификации персонала, осуществляющего обслуживание рассматриваемой кабельной линии, X_{12} ;
- уровень квалификации персонала, выполняющего ремонтные работы на рассматриваемой кабельной линии, X_{13} .

При достаточно большом количестве учитываемых факторов их влияние целесообразно для наглядности представить в виде иерархического дерева логического вывода [4]. Это необходимо для того, что при моделировании существующих в сложных системах многомерных зависимостей «входы–выход» следует применять иерархические системы НЛВ. В этих системах выходная итоговая переменная одной базы знаний является входной для другой базы знаний [12].

Разработанное дерево нечеткого вывода представляется в виде

$$G = \langle X, E, R, P \rangle, \quad (5)$$

где X – множество учитываемых или входных факторов; E – множество сверток факторов факторов; R – множество причинно-следственных связей между различными факторами; P – множество процедур оценивания факторов (в том числе процедуры фазификации, кластеризации, нечеткого вывода и др.) – рисунок 3.

Элементы созданного дерева представляются как:

- корень дерева нечеткого вывода – уровень состояния изоляции рассматриваемой кабельной линии Q ;
- терминальные вершины дерева - входные факторы, влияющие на состояние изоляции кабельных линий (X_1, \dots, X_N);
- нетерминальные вершины дерева (двойные окружности) - свертки входных факторов, влияющих на состояние изоляции кабельных линий;
- дуги графа, выходящие из нетерминальных вершин - укрупненные влияющие факторы ($Y_1 - Y_M$).

Свертки Y_1 соответствуют ранее изложенным группам входных факторов, влияющих на состояние изоляции. Постоянное действие всех этих факторов создает постепенное снижение ее электрической прочности и в конечном итоге при неблагоприятных условиях может привести к пробое. В свою очередь, каждая такая свертка по существу является подсистемой нечеткого вывода более низкого уровня.

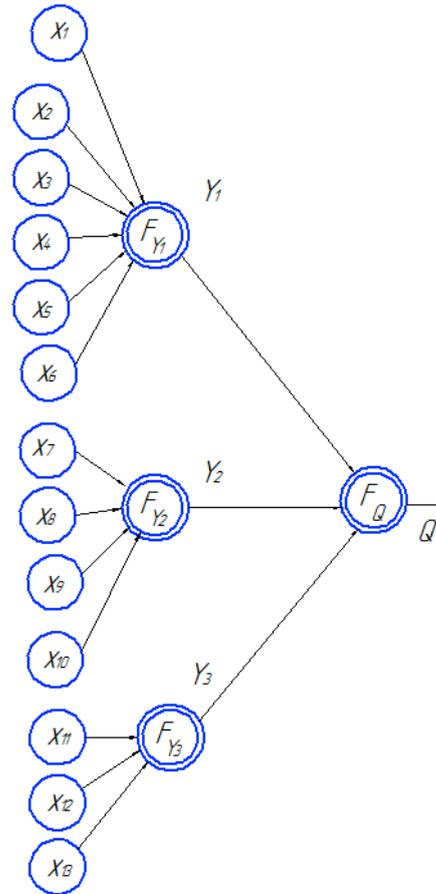


Рис. 3. Дерево нечеткого вывода

В качестве примера представим составление базы знаний для подсистемы нечеткого вывода эксплуатационных факторов. Эта база знаний является по существу основой для формирования выходного параметра Y_1 . Значение выходного параметра или Y_1 , отображающего влияние этих факторов на состояние изоляции, зависит от значений всех входных факторов данной подсистемы. Границы изменения входных переменных всей системы нечеткого вывода приведены в таблице.

Границы изменения входных переменных

Обозначение	Наименование показателя
X_1	Нижняя 0°C , верхняя 65°C
X_2	Нижняя 0°C , верхняя 120°C
X_3	Нижняя 0, верхняя 1
X_4	Нижняя 0, верхняя 1
X_5	От 0 до 1 мОм
X_6	Нижняя 0, верхняя 1
X_7	Нижняя 0, верхняя 1
X_8	Нижняя 0, верхняя 1
X_9	Нижняя 0, верхняя 1
X_{10}	Нижняя 0, верхняя 1
X_{11}	От низкая до высокая
X_{12}	От низкая до высокая
X_{13}	От низкая до высокая

Разработанная система НЛВ определения состояния изоляционных материалов силовых кабелей производит обработку как количественной, так и качественной информации, выражаемой экспертными оценками. Такое построение данной системы позволяет получать более обоснованные оценки по сравнению с системами, использующими только количественную информацию, например, по величине сопротивления изоляции.

Библиографический список

1. *Алиев Р. А.* Управление производством при нечеткой исходной информации / Р.А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
2. *Беллман Р., Заде Л.* Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 173–215.
3. *Беляев Л.С.* Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1978. 128 с.
4. *Вагин В.Н.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: Физматлитгиз, 2004. 704 с.
5. *Капустин В.Ф.* Неопределенность: виды, интерпретации, учет при моделировании и принятии решений // Вестник Санкт-Петербургского университета. 1993. Сер. 5. Вып. 2 (№12). С. 108–114.
6. *Коржов А.В.* Метод оценки значимости влияния проектных и эксплуатационных факторов на срок службы изоляции силовых кабелей 6(10) кВ городских электрических сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 1. С. 31–34.
7. *Коржов А.В.* Оценка теплового режима работы изоляции в 2D-модели звена «кабель 6(10) кВ – грунт» в ANSYS с учётом подвижек грунта и уставок устройств релейной защиты // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13, № 1. С. 39–45.
8. *Коржов А.В., Томашева Е.В.* Причины старения бумажно-масляной изоляции силовых кабелей // Электробезопасность. 2006. № 1. С. 12–17.
9. *Юрченко Е.Ю.* Оценка состояния изоляции городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ с разработкой рекомендаций по улучшению условий электробезопасности: дис. ... канд. техн. наук / Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 2009.
10. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М.: Лаборатория знаний, 2013. 804 с.
11. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 452 с.
12. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 228 с.