



СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.311

НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

FUZZY CONTROL SYSTEM OF THE INSULATION STATE

Д.В. Куделина
D.V. Kudelina

Юго-Западный государственный университет, Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

South-West State University, 94 50 let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russia

e-mail: mary_joy@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы прогнозирования ресурса работы электрооборудования с использованием математического аппарата нечёткой логики. Получение адекватных оценок состояния оборудования в энергетике становится особенно актуальным в настоящее время. Это во многом объясняется тем, что большая часть основного оборудования энергетических предприятий выработала свой ресурс, и используется на пределе своих возможностей. Надежность работы электрооборудования энергетических систем во многом зависит от его текущего технического состояния, при этом выход из строя электроэнергетических объектов в большинстве случаев является следствием отказов изоляции, как наиболее слабой их части. Приведенная в статье модель оценки состояния изоляции на основе применения нечеткого логического вывода позволяет получать данную оценку с учетом разнородной входной информации, количественной и качественной, при этом учитывается неполнота и неопределенность части исходной информации. Такой подход позволяет получать более достоверные результаты выходного параметра или оценки состояния изоляции по сравнению с применением моделей, ориентированных на обработку только количественных исходных данных.

Resume. The paper deals with the prediction of service life of electrical equipment with the use of mathematical apparatus of fuzzy logic. Getting adequate assessments of the equipment in the power industry is particularly relevant at the moment. This is largely due to the fact that the majority of main equipment of the power enterprises is outlived its lifespan and is used at its limits. The reliability of the electrical equipment of energy systems depends largely on its current technical condition, and in most cases the failure of the electric power facilities is the result of insulation failures as it is their weakest part. The model which is given in the article for evaluating the insulation state on the basis of fuzzy logic inference allows you to receive this assessment taking into account the diverse input information, quantitative and qualitative, taking into consideration the incompleteness and uncertainty of the initial information. This approach allows obtaining more reliable results of the output parameter or the state estimation of insulation compared with the use of the models aimed at the processing of only quantitative initial data.

Ключевые слова: энергетическая система, прогнозирование, нечеткая логика, математическая модель, оценка состояния изоляции, неполнота информации

Keywords: energy system, forecasting, fuzzy logic, mathematical model, evaluation of insulation state, incomplete information

Введение

Надежность работы электрооборудования энергетических систем сетей во многом зависит от его текущего технического состояния. Во время эксплуатации на это оборудование воздействуют различные неблагоприятные факторы. Поэтому техническое состояние электрооборудования в процессе его работы непрерывно ухудшается, что увеличивает вероятность возникновения отказов.

Получение адекватных оценок состояния оборудования в энергетике становится особенно актуальным в настоящее время. Это во многом объясняется тем, что большая часть основного оборудования энергетических предприятий выработала свой ресурс или срок эксплуатации, определенный в различных нормативных документах, и используется по существу на пределе своих возможностей [Ушаков, 2008; Федяков, 2011].



В настоящее время для контроля и оценки состояния электрооборудования на энергопредприятиях применяется мониторинг с помощью комплекса аппаратных и программных средств. Этот комплекс обеспечивает регистрацию разнообразной информации о параметрах контролируемого оборудования и его составных частей, условиях их работы и пр., а также осуществляет анализ текущего состояния оборудования.

В настоящее время используется и разрабатывается много информационных систем, методов и средств контроля и диагностики технического состояния электрооборудования [Стеклов, Подковырин, 2015; Хальясмаа, Дмитриев, Кокин, Осотова, 2013]. Вместе с тем необходимо совершенствование существующих и разработка новых технологий и практических методов, которые обеспечивали бы более эффективное техническое обслуживание и ремонт электрооборудования по техническому состоянию.

Объекты и методы исследования

Основным направлением, определяющим повышение качества информационных технологий контроля и оценки технического состояния, следует считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием информационных технологий, в частности экспертных систем, которые способны обеспечить повышение качества распознавания и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта.

Применение таких технологий позволит не только определять техническое состояние электрооборудования в текущий момент времени, но и прогнозировать техническое состояние контролируемого объекта и изменение ресурса в будущем, чтобы можно было своевременно реализовывать различные мероприятия по предотвращению возникновения отказов [Бирюлин, Куделина, 2015].

Прогнозирование ресурса работы электрооборудования требует использования исходных данных, имеющих значительную степень неопределенности, обусловленной с одной стороны фактором случайности, а с другой – нечеткости.

Плохо формализуемый и неструктурированный характер задачи прогнозирования работы электрооборудования, связанный с существованием неполноты и неоднозначности исходных данных, сложностью определения взаимных связей между значениями параметров оборудования и признаками проявления дефектов, необходимостью применения экспертных знаний для повышения достоверности результата оценки ограничивает возможность применения методов, рассчитанных на обработку количественной информации и предполагающих обработку больших объемов статических данных [Серебровский, Филист, Шаталова, Черепанов, 2014].

Эти проблемы в настоящее время успешно преодолеваются при использовании математического аппарата нечетких систем или нечеткой логики. В последнее время применение таких систем относится к наиболее перспективным направлениям исследований сложных организационно-технических систем.

Математический аппарат нечёткой логики существенно ближе по своим основам и применению к мышлению человека, чем широко известные математические методы, направленные на обработку количественной информации. Он представляет эффективное средство учета и обработки в разрабатываемых математических моделях, представляющих различные объекты, в том числе и энергетические, неопределённости и неточности, характерных для окружающего нас, реального мира [Куделина, 2016].

Применение нечеткой логики для оценки технического состояния электрооборудования обуславливается значительным объемом информации, необходимость использовать не только количественные исходные данные, но и качественные, учитывая при этом существование неопределенности и неполноты данной информации. Кроме того, использование математического аппарата нечеткой логики позволяет адекватно формализовать знания экспертов, которые могут быть неполными или носить субъективный характер [Леоненков, 2005].

Также следует учитывать, что любая математическая модель может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике, согласно теореме о нечеткой аппроксимации [Пегат, 2013]. Это позволяет с помощью качественных или лингвистических высказываний типа < Если – то > с последующей их обработкой средствами теории нечеткой логики обеспечить адекватное отображение сколь угодно сложной рассматриваемой системы, без использования сложных систем линейных и дифференциальных уравнений.

Надежность работы систем электроснабжения во многом определяется состоянием элементов, входящих в данную систему. При этом выход из строя электроэнергетических объектов в большинстве случаев является следствием отказов изоляции, как наиболее слабой их части [Воропай, 2006; Конюхова, 2001].

В процессе эксплуатации на изоляцию электрооборудования действуют электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. В результате их совместного действия в изоляции происходят сложные процессы, приводящие к постепенному ухудшению свойств изоляции или старению.



Моделирование воздействия данных нагрузок на изоляцию является трудно формализуемой задачей из-за многообразия характера проявления этих нагрузок и сложности учета действия внешних условий, например, теплообмена изоляции с окружающей средой. Но определение степени снижения характеристик изоляции имеет важное практическое значение, так как от состояния изоляции во многом зависит надежность работы электрооборудования, а значит, и надежность электроснабжения потребителей электроэнергии.

Для решения подобных задач будет эффективным применение аппарата нечеткой логики, позволяющим более полно учитывать многообразие механизмов воздействия на изоляцию различных нагрузок и внешних условий. Модель решения поставленной задачи разрабатываем на основе использования системы нечеткого логического вывода (НЛВ).

При создании системы НЛВ все имеющиеся знания по изучаемому объекту представляются в виде некоторой формальной логической системы. В общем случае формальная логическая система может задаваться четверкой компонентов вида:

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

где T – множество базовых элементов, на основе которого строятся все выражения разрабатываемой системы, для этого множества T должен существовать способ определения принадлежности какого-либо произвольного элемента к множеству T ; P – множество синтаксических правил, выделяющих среди всех возможных выражений из множества базовых элементов только те, которые являются формулами или синтаксически правильными совокупностями; A – множество аксиом, т.е. формул, признаваемых априорно истинными, эти аксиомы являются ядром предметной области; B – разработанные правила вывода результатов, они являются самой сложной частью формальной логической системы.

Результаты и их обсуждение

При практическом применении формальных логических систем будет целесообразной замена этих систем нечеткими продукционными моделями. В общем виде нечеткая продукционная модель представляется согласованным множеством отдельных нечетких продукционных правил вида <Если – то> и заключением данного правила в виде нечетких высказываний. Структурой нечеткой продукционной модели определяется решаемой задачей, в том числе и исходной информацией.

Входной информацией для разрабатываемой модели будут являться причины, приводящие к старению изоляции. Наиболее распространенными причинами являются:

- электрическое старение, вызываемое частичными разрядами в изоляции при напряжении, близком к номинальному или повышенному напряжению;
- тепловое старение изоляции, возникающее из-за нагрева протекающими по токоведущим частям электрооборудования токами, а вследствие дополнительного нагрева токами высших гармоник, появляющихся в сети при снижении качества электроэнергии;
- окисление изоляции вследствие химических процессов, протекающих в ней;
- увеличение содержания влаги в изоляции.

Старение изоляции может происходить вследствие других причин – механические воздействия, проявление электродинамических усилий при протекании токов КЗ, влияние вибрации, действие агрессивных веществ.

Выходной величиной модели будет являться оценка степени снижения ресурса изоляции или степени ее износа. Поэтому в нашем случае будем работать в рамках MISO-системы со многими (n) входными переменными и одной выходной переменной (много входов – различные входные данные, один выход – оценка степени износа изоляции).

Подобные системы реализуют отображение вида:

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

где y – выходная величина, в нашем случае оценка степени износа изоляции;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – входные величины или исходные данные.

Исходные данные могут быть представлены вектором X , определенным на декартовом произведении областей определения входных величин $X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n$. Функция f осуществляет отображение данного вектора X на область значений выходной величины Y .

На областях определения входных величин задаются нечеткие множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Тогда в соответствии с принципом обобщения на выходе системы получается нечеткое множество $B = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$, представляющее результат отображения нечетких множеств входных величин:



$$B(y) = (A_1(x_1) \wedge A_2(x_2) \wedge \dots \wedge A_n(x_n)) = \left(\frac{\mu_B(y)}{y} \right); \tag{3}$$

$$f = f(X), X \in X_1 \times \dots \times X_n.$$

Нечеткая модель для определения степени износа изоляции разработана на основе модели Мамдани [Леоненков, 2005; Пегат, 2013]. Эта модель в настоящее время является наиболее часто используемой. Отображение нечетких множеств входных величин в выходное множество значений определяет существование некоторой поверхности, называемой поверхностью отображения в пространстве $X \times Y$. Каждое правило, используемое в модели, задает в пространстве $X \times Y$ определенную точку, определяющую особенности поведения рассматриваемой системы.

Факторы, действующие на изоляцию, представляем как некоторое свойство рассматриваемой в математической модели системы, оцениваемое на качественном уровне, например: «уровень нагрева изоляции током частотой 50 Гц», «интенсивность возникновения частичных разрядов». Каждому фактору устанавливается в соответствии своя лингвистическая переменная, характеризующаяся терм-множеством $T_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im}\}$, термы которого представляют собой нечеткие оценки возможных состояний изучаемого фактора, например «низкая», «средняя», «высокая»; синтаксическими и семантическими правилами.

Рассматриваемая система нечеткого вывода реализует следующие основные этапы обработки исходной информации.

Фаззификация входных переменных проводится на основе функций принадлежности. Для выполнения этой операции необходимо предварительно задать функции принадлежности для исходных данных вида $\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots, \mu_A(x_n)$.

Цель данного этапа состоит в установлении соответствия между определенным количественным значением той или иной входной переменной системы и значением выбранной функции принадлежности соответствующего термина входной лингвистической переменной. Значения, полученные с помощью измерительных приборов, являются входными количественными данными. Эти данные преобразуются по заданным в системе функциям принадлежности, и четкое множество входных количественных данных становится нечетким множеством, которое затем используется в виде лингвистических переменных.

Для небольших объемов имеющейся информации целесообразно использовать простые функции принадлежности, состоящие из прямолинейных участков – многоугольные функции. Для подобных функций легко обеспечивается выполнение условия, что сумма степеней принадлежности для каждого элемента нечеткого множества должна равняться 1 [Пегат, 2013].

С учетом этого используем функции принадлежности, имеющие вид асимметричной трапеции, которые могут быть представлены в виде [Леоненков, 2005]:

$$\mu(x) = w_1 \left(\frac{x-a}{b-a} \right) + w_2 + w_3 \left(\frac{d-x}{d-c} \right), \tag{4}$$

где w_1, w_2, w_3 – интервалы по оси x ; a, b, c, d – точки на оси x , определяющие вид трапеции.

Следующим шагом производится операция нечеткого вывода, результатом которой является результирующая функция принадлежности выходного значения. Эта функция имеет сложную форму и определяется при проведении вычислений. Для выполнения операции вывода разрабатываемая система должна включать в себя следующие составляющие:

- база правил;
- механизм вывода;
- функции принадлежности выходного значения y .

В свою очередь механизм вывода реализует три дальнейших шага.

Первым шагом на выводе выполняется агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций, что обеспечивает вычисление степени выполнения сложных условий, являющихся комбинацией простых. Для двух нечетких множеств A и A^* агрегирование производится по формуле [Леоненков, 2005]:

$$h = \text{MAXMIN}(\mu_A(x), \mu_{A^*}(x)), \tag{5}$$

Для случая агрегирования нескольких нечетких множеств в формуле (5) увеличивается число составляющих элементов.

На втором шаге определяются активизированные функции принадлежности заключений по отдельным правилам на основании степени выполнения их условий. Это действие выполняется с использованием оператора нечеткой импликации Мамдани, базирующимся на предположении,



что степень истинности заключения $\mu_B(y)$ не может быть выше, чем степень выполнения условия $\mu_A(x)$ [Леоненков, 2005]:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (6)$$

Третий шаг осуществляет композицию подзаключений или объединение исходных нечётких множеств в одно нечёткое множество, представляющее собой фаззифицированное значение выходного параметра или оценки эффективности Q .

Результатом объединения нечеткого множества A с областью определения x и нечеткого отношения двух аргументов R , заданных на области определения $x \times y$ является третье нечеткое множество B с областью определения y и следующей функцией принадлежности:

$$\mu_B(y) = \text{MAXMIN}(\mu_{A^*}(x, y), \mu_R(x, y)), \quad (7)$$

где $A^{**}(x, y)$ – цилиндрическое продолжение множества $A(x)$ на область определения $x \times y$.

Дефаззификация. Эта операция обеспечивает нахождение четкого значения выходного параметра. Для этого выбираем метод центра тяжести, так как он задействует все активизированные функции принадлежности заключений или активные правила. Это обеспечивает более высокую чувствительность создаваемой нечеткой модели к изменению входных сигналов по сравнению с методами первого максимума, последнего максимума, среднего максимума.

Значение выходного параметра Q определяются как:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^k \mu_A(x_i)}, \quad (8)$$

где x_i – рассматриваемые переменные; $\mu_A(x_i)$ – функция принадлежности результирующего нечеткого множества.

Созданная модель реализует следующее отображение входных величин на выходной параметр Q :

$$X = (X_1, \dots, X_N) \rightarrow Q[0, 100]. \quad (9)$$

При формировании выходного параметра его значением приняты следующие отношения по общему состоянию изоляции:

- от 0 до 20 – уровень состояния изоляции «очень низкий», требуется вывод оборудования в ремонт для предотвращения аварии;
- от 20 до 40 – уровень состояния изоляции «низкий», требуется техническое обслуживание, возможен мелкий ремонт оборудования;
- от 40 до 60 – уровень состояния изоляции «средний», требуется техническое обслуживание без вывода оборудования в ремонт;
- от 60 до 80 – уровень «выше среднего», рекомендуется дополнительная обработка исходных данных для уточнения состояния изоляции;
- от 80 до 100 – уровень «высокий», изоляция находится в нормальном состоянии, не требующем выполнения никаких дополнительных действий.

При формировании базы нечетких правил используются как априорные данные, которые поступают от экспертов, так и данные, получаемые в результате измерений.

Изначально каждому примеру из выборки ставится в соответствие отдельное правило. Множество таких примеров обучающей выборки задается следующим образом:

$$(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, x_4^{(k)}, x_5^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}, y), k = 1, \dots, K, \quad (10)$$

где $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, x_4^{(k)}, x_5^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}$ – значения n входных переменных; y – значение выходной переменной y в k -м примере; K – общее количество примеров в обучающей выборке.

Для каждого такого примера определяются степени принадлежности заданных значений переменных к соответствующим нечетким множествам. Далее каждому обучающему примеру в соответствие ставятся нечеткие множества, к которым у соответствующих значений переменных из данного примера степени принадлежности являются максимальными.

Сформированные таким образом правила и составляют начальную базу нечетких правил. Иногда начальная база может являться избыточной, содержать противоречия (правила с



одинаковыми предпосылками, но разными заключениями). В этом случае набор правил необходимо оптимизировать. Это можно сделать на основе эмпирической информации от экспертов, либо путем адаптации обучающей выборки.

Заключение

Приведенная модель оценки состояния изоляции на основе применения нечеткого логического вывода позволяет получать данную оценку с учетом разнородной входной информации, количественной и качественной, при этом учитывается неполнота и неопределенность части исходной информации. Такой подход позволяет получать более достоверные результаты выходного параметра или оценки состояния изоляции по сравнению с применением моделей, ориентированных на обработку только количественных исходных данных.

Список литературы References

- Бирюлин В.И., Куделина Д.В., 2015. Система нечеткого вывода оценки эффективности региональной энергетики. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика Информатика. 13 (210): 128–132.
- Biryulin V.I., Kudelina D.V., 2015. Fuzzy inference system for regional energy effectiveness evaluation. Nauchnye vedomosti BelGU. Ekonomika, Informatika [Belgorod State University Scientific bulletin. Economics Information technologies], 13 (210):128–132. (in Russian)
- Воропай Н.И., 2006. Надёжность систем электроснабжения. Конспект лекций. Новосибирск, Наука, 205.
- Voropay N.I., 2006. Reliability of power supply systems. lecture notes. Novosibirsk, Nauka, 205. (in Russian)
- Конюхова Е.А., 2001. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий. М., Энергопрогресс, 92.
- Konyuhova E.A., 2001. The reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow, Energoprogress, 92. (in Russian)
- Куделина Д.В., 2016. Прогнозирование развития региональной энергетической системы. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 9(230): 129–134.
- Kudelina D.V., 2015. Forecasting of regional energy system development. Nauchnye vedomosti BelGU. Ekonomika, Informatika [Belgorod State University Scientific bulletin. Economics Information technologies]. 9(230): 129–134. (in Russian)
- Леоненков А.В., 2005. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб., БХВ-Петербург, 736.
- Leonenkov A.V., 2005. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. SPb., BHV-Peterburg, 736. (in Russian)
- Пегат А., 2013. Нечеткое моделирование и управление. М., Лаборатория знаний, 804.
- Pegat A., 2013. Fuzzy modeling and management. Moscow, Laboratoriya znaniy, 804. (in Russian)
- Серебровский В.В., Филист С.А., Шаталова О.В., Черепанов А.А., 2014. Информационная система детектирования ишемических кардиоциклов с использованием нечеткой логики. Научные ведомости БелГУ. Сер. История Политология Экономика Информатика. 8(179): 71–75.
- Serebrovskiy V.V., Filist S.A., Shatalova O.V., Cherepanov A.A., 2014. Information system detection ischemic cardiocycles using fuzzy logic. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istoriya Politologiya Ekonomika Informatika [Belgorod State University Scientific bulletin. History Political science Economics Information technologies], 8(179): 71–75. (in Russian)
- Стеклов А.С., Подковырин Д.С., 2015. Нейро-нечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора. Главный энергетик, 11–12: 55–59.
- Steklov A.S., Podkovyirin D.S. 2015. Neuro-fuzzy model of synchronous generator technical condition diagnostics. Glavnyiy energetik [Chief Power Engineer], 11–12: 55–59. (in Russian)
- Ушаков В.Я., 2008. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты. Томск, ТПУ, 469.
- Ushakov V.Ya., 2008. Modern and prospective energy: technological, socio-economic and environmental aspects. Tomsk, TPU, 469. (in Russian)
- Федяков И., 2011. Износ оборудования системная проблема всей электроэнергетической отрасли. Электротехнический рынок. Электронный журнал, 3(39). URL: <http://market.elec.ru/nomer/36/iznos-oborudovaniya-sistemnaya-problema-vsej-elekt/> (30 ноября 2016). (in Russian)
- Fedyakov I. 2011. Depreciation of equipment is a systemic problem across the electricity industry. Elektrotehnicheskii ryinok [Electrotechnical market]. Electronic journal, 3(39). Available at: <http://www.ecosystema.ru/01welcome/articles/lions/index.htm> (accessed 30 November 2016). (in Russian)
- Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е., Осотова М.В., 2013. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях. Вопросы современной науки и практики, 1 (45): 289–300.
- Halyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E., Osotova M.V., 2013. Assessing technical condition of power equipment at power substations. Voprosyi sovremennoy nauki i praktiki [Questions of modern science and practice], 1 (45): 289–300. (in Russian)