

УДК 621.315.21

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6 КВ

Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., Баширов М.Г., Прахов И.В.

*Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Салават, e-mail: shavier_93@mail.ru*

Кабельные линии 6 кВ получили широкое применение в распределительных электрических сетях городов и промышленных предприятий. Они являются необходимым звеном в передаче и распределении электроэнергии и в значительной степени определяют надежность электроснабжения потребителей. Повреждаемость кабельных линий в 2–3 раза выше, чем у других элементов сети электроснабжения, что вызывает необходимость периодического диагностирования. Многообразие видов повреждений и параметров кабельных линий привело к созданию и применению большого количества методов диагностирования. Но из существующих множеств методов нет ни одного универсального. У каждого есть свои достоинства и недостатки, а также условия, ограничивающие возможности применения его на практике. Негативное влияние оказывает различие условий диагностирования, которое обусловлено конструктивными особенностями кабельных изделий и свойствами современных изоляционных материалов. В результате испытания возможен пробой, поэтому отыскание места повреждения является актуальной задачей. Экономически оправданным подходом в решении указанной задачи может служить компактность установки и возможность исключения операции повреждения и прожигания изоляции.

Ключевые слова: силовой кабель, деградация изоляции, образ, экспериментальная установка, оценка технического состояния, диагностический параметр, интегральный параметр

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION 6 KV'S CABLE LINES

Novikova Freyre Shavier G.D'K., Bashirov M.G., Prakhov I.V.

Salavat Branch of Ufa State Petroleum Technical University, Salavat, e-mail: shavier_93@mail.ru

Cable lines of 6 kV were widely used in distributive networks of power supply systems, in the cities and at the industrial enterprises. They are a necessary link in transfer and distribution of the electric power and substantially define reliability of power supply of consumers. Damageability of cable lines is in 2–3 times higher, than at other elements of a network of power supply that causes the necessity of periodic diagnosing. The variety of types of damages and parameters of cable lines led to creation and application of a large number of methods of diagnosing. But from the existing sets of methods there is no universal. Everyone has merits and demerits, and also conditions the limiting possibilities of its application in practice. Distinction of conditions of diagnosing which is caused by design features of cable products and properties of modern insulating materials has negative impact. As a result of test breakdown therefore search of a place of damage is an actual task is possible. As economically justified approach compactness of installation and of an exception of operation of damage and burning of isolation can serve in the solution of the specified task.

Keywords: power cable, insulation degradation, image, experimental setup, technical condition assessment, diagnostic parameter, integral parameter

Общая протяженность электрических сетей 0,4–110 кВ в России составляет более 3 млн км, а протяженность кабельных сетей напряжением 3–20 кВ составляет примерно 250 тыс. км. Аварии в сетях 6–10 кВ составляют около 70% всех нарушений электроснабжения потребителей. Моральный и физический износ кабельных линий 6–10 кВ в системах электроснабжения составляет 40–80%.

На рис. 1 представлена статистика аварийных ситуаций на предприятиях нефтехимической отрасли по данным ОАО «ФСК ЕЭС» и службы эксплуатации КЛ за период с 2003 по 2014 гг.

Основную долю аварийности электрооборудования составляют неисправности в кабельных линиях, составляющие порядка 63%, неисправности электродвигате-

лей различных классов напряжения – 24%. Также возникают неисправности в трансформаторах порядка 8% и прочие виды неисправностей, не связанные с вышеперечисленными неисправностями, 5%.

Анализ статистических данных службы эксплуатации кабельных линий 6 кВ показывает, что 42% пробоев происходит под нагрузкой, пробой при испытании – 37% и порывы при вскрытии грунта – 21%. Данные представлены в виде диаграммы на рис. 2.

Бесперебойная работа системы электроснабжения промышленных предприятий невозможна без высокой надежности силовых кабельных линий. Для оценки технического состояния кабельных линий необходимо применение неразрушающего метода контроля, который позволит классифицировать

кабельные линии по их остаточному ресурсу и создать алгоритм постепенной замены изношенных кабелей. Следовательно, данный метод контроля позволит увеличить срок службы кабельных линий сверх нормативных сроков и с большой экономией обеспечить их техническое обслуживание и ремонт [5].

При переходе на систему контроля и ремонта силовых кабельных линий по их техническому состоянию может быть получен существенный экономический эффект за счет снижения количества аварий на кабельных линиях и, соответственно, затрат на их устранение [4].

Предлагается метод многопараметровой динамической количественной оценки технического состояния кабельной линии 6 кВ. В филиале ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 3.

из которой формальной заменой p на $j\omega$ получаем обобщенную частотную характеристику (формула (1)) [1]. Совместно с генератором и осциллографом используется прибор Е7-22, предназначенный для автоматического измерения емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, добротности и сопротивления на различных частотах.

$$W(j\omega) = \frac{k \cdot (1 - T^2 \cdot \omega^2)}{(1 - T^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \cdot \omega^2} + j \cdot \frac{k \cdot T_1 \cdot \omega}{(1 - T^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \cdot \omega^2} \quad (1)$$

Передаточная функция $W(j\omega)$ позволяет охарактеризовать все свойства исследуемой системы. Только необходимо установить, устойчива ли система. Ответ на этот вопрос дает применение критериев устойчивости, но они требуют выполнения некоторых действий. Для этого производим поиск

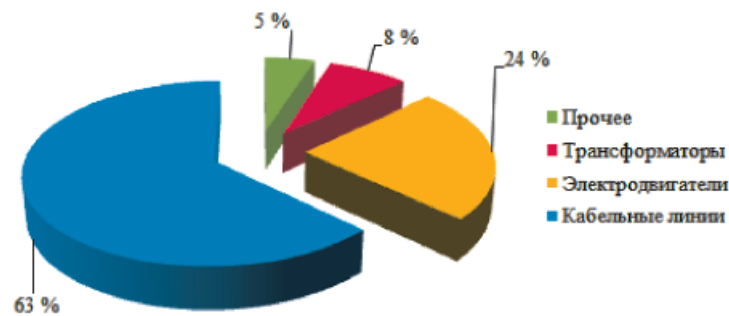


Рис. 1. Аварийность электрооборудования на нефтехимических предприятиях (данные ОАО «ФСК ЕЭС» за период с 2003 по 2014 гг.)

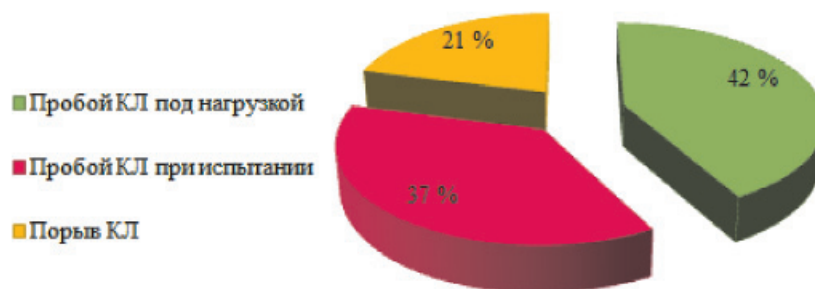


Рис. 2. Статистические данные пробоев кабельных линий 6 кВ (данные службы эксплуатации кабельных линий за период с 2005 по 2014 гг.)

Для снятия экспериментальных данных на вход кабеля подается единичный ступенчатый сигнал прямоугольной формы, на выходе кабеля осциллографом (или осциллоскопом) регистрируется кривая переходного процесса. Затем по переходной кривой определяем передаточную функцию $W(p)$,

корней полинома. Корни полинома, как и все комплексные числа, удобно представлять в виде точек на комплексной плоскости.

Существует достаточно много методов оценки устойчивости характеристического уравнения. Метод распределения корней – один из них.



Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

Этот метод основан на изучении распределения корней характеристического уравнения системы на комплексной плоскости, то есть существует область на плоскости, внутри которой располагаются корни характеристического уравнения, эту область определяет степень устойчивости. В геометрическом представлении степень устойчивости равна расстоянию от мнимой оси до ближайшего к ней корня характеристического уравнения устойчивой системы [2].

Для определения технического состояния кабельной линии и ее остаточного ресурса будет корневая оценка (расположение

корней на плоскости). Изобразим корневую оценку технического состояния кабельных линий с различными корнями на общем графике (рис. 4).

По графику видно, что чем больше повреждений имеет кабельная линия, тем ближе корни к мнимой оси, то есть они приближаются к границе устойчивости. Это означает, что чем ближе к границе устойчивости, тем меньше становится остаточный ресурс кабельной линии, и можно предположить о ее настоящем техническом состоянии, а также определить запас устойчивости.

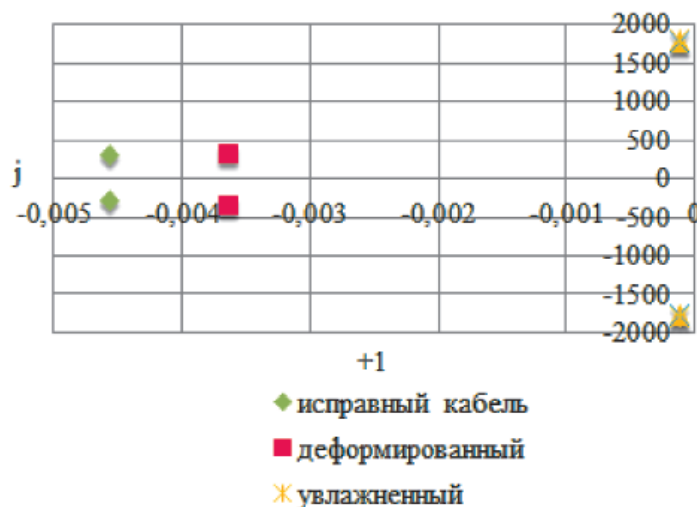


Рис. 4. Корневая оценка технического состояния кабельной линии

Используя передаточную функцию и нормированные значения основных электрических параметров кабеля, можно определить область D расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, которая соответствует исправному состоянию кабеля. В результате сопоставления координат корней характеристического уравнения, полученных экспериментально, с границами области D , делается заключение о состоянии кабельной линии. Для количественной оценки уровня деградации диэлектрических свойств изоляции кабеля использован метрический метод распознавания образов. Мерой уровня деградации служит расстояние между текущими значениями координат корней характеристического уравнения и координатами корней, соответствующих либо исходному, либо предельному состоянию кабеля (параметр D).

Область D исправного кабеля может быть выражена формулой (2)

$$D_{\text{норм}} = \begin{cases} \varphi_{\text{кр}} \leq \arctg \left| \frac{X}{Y} \right| \leq \varphi_{\text{ном}}; \\ \sqrt{X_{\text{кр}}^2 + Y_{\text{кр}}^2} \leq \sqrt{X^2 + Y^2} \leq \sqrt{X_{\text{ном}}^2 + Y_{\text{ном}}^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где X – действительная часть комплексного корня характеристического уравнения

передаточной функции; Y – мнимая часть комплексного корня характеристического уравнения передаточной функции.

В зависимости от расположения корней передаточной функции на комплексной плоскости, состояние кабельной линии по аналогии с методом вибродиагностики машинных агрегатов, подразделяется на три подгруппы – «Нормальное», «Удовлетворительное» и «Неудовлетворительное», которым соответствуют следующие состояния поврежденности: «Повреждение не обнаружено», «Повреждение обнаружено», «Обнаружено критическое повреждение». Состояние «Повреждение не обнаружено» соответствует расположению корней передаточной функции в области D . Расположение корней передаточной функции, не принадлежащее области D , соответствует состоянию «Обнаружено критическое повреждение» (100% уровень поврежденности согласно ГОСТ 27.002-89, при котором дальнейшая эксплуатация кабеля недопустима). Порог состояния «Повреждение обнаружено» составляет 20% от уровня состояния «Обнаружено критическое повреждение» и соответствует расположению корней передаточной функции в области $D_{\text{уд}}$ (формула (3)).

$$D_{\text{уд}} = \begin{cases} \varphi_{\text{кр}} \leq \arctg \left| \frac{X}{Y} \right| \leq [\varphi_{\text{кр}} + 0,2 \cdot (\varphi_{\text{ном}} - \varphi_{\text{кр}})]; \\ \sqrt{X_{\text{кр}}^2 + Y_{\text{кр}}^2} \leq \sqrt{X^2 + Y^2} \leq \sqrt{[X_{\text{кр}} + 0,2 \cdot (X_{\text{ном}} - X_{\text{кр}})]^2 + [Y_{\text{кр}} + 0,2 \cdot (Y_{\text{ном}} - Y_{\text{кр}})]^2}. \end{cases} \quad (3)$$

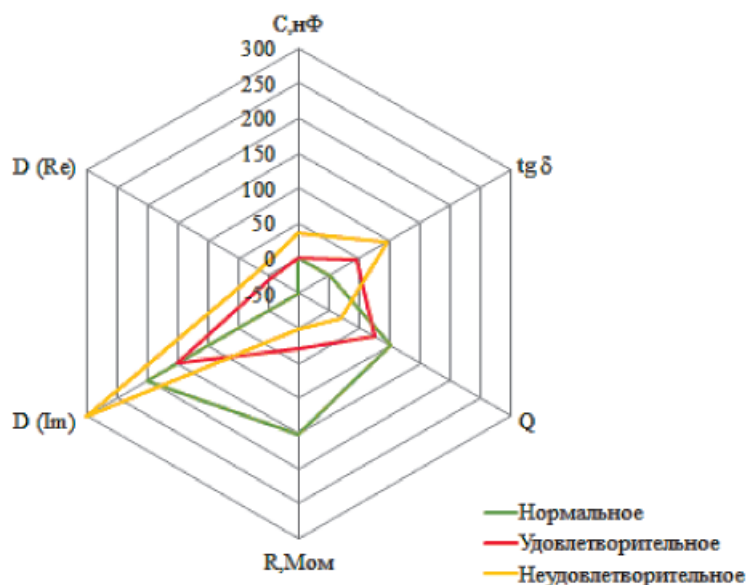


Рис. 5. Лепестковая диаграмма оценки технического состояния кабеля

Параметр D применяется для определения расчетных значений состояния кабеля в программном обеспечении, а для визуализации текущего технического состояния кабельной линии на мониторе компьютера или операторской панели используется метод многопараметровой динамической количественной оценки технического состояния, представленный в виде лепестковой диаграммы на рис. 5.

Данная диаграмма позволяет оценивать совокупность значений диагностических параметров.

Предлагается отображать состояние кабельной линии на основе результатов экспериментальных данных в виде 6-лепестковой диаграммы, где лучами будут значения сопротивления изоляции, добротности, емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, действительная и мнимая части корней характеристического уравнения передаточной функции. Отложив данные диагностические параметры от центра и соединив полученные при этом точки соседних радиальных лучей отрезками прямых, получаем образ состояния диагностируемого объекта [3]. Нанеся на лепестковую диаграмму параметры исправного кабеля, получаем образ бездефектного состояния объекта, то есть образ «Нормальное». Если образ, описывающий диагностируемый объект, выходит за пределы области, ограниченной образом «Нормальное» хотя бы по одному значению параметра, то предполагается наличие развивающегося дефекта или какой-либо неисправности.

Оценку технического состояния кабельных линий (муфт) представим в виде интегрального критерия оценки технического состояния I , формируемого из совокупности диагностических параметров,

$$I = f(C, \operatorname{tg}\delta, Q, R, D(\operatorname{Im}), D(\operatorname{Re})). \quad (4)$$

Формируя интегральный критерий искусственной нейронной сетью из совокуп-

ности диагностических параметров, получим выражение (5):

$$I = f\left(w_{j_0} + \sum_{i=1}^m (w_{ji} \cdot (C_i + \operatorname{tg}\delta_i + Q_i + R_i + D(\operatorname{Im})_i + D(\operatorname{Re})_i))\right), \quad (5)$$

где m – одинаковое число входов параллельно действующих линейных элементов; w_{j_0} – пороговый коэффициент; w_{ji} – весовой коэффициент i -го входа j -го нейрона.

В ходе выполнения экспериментальных исследований подтвердился тот факт, что происходит изменение измеряемых величин, была выведена передаточная функция, которая математически описывает состояние кабельной линии, а также может показать остаточный ресурс кабельной линии.

Разработанный метод многопараметровой динамической количественной оценки технического состояния кабельной линии 6 кВ является неразрушающим методом контроля, позволяющим формировать рекомендации о сроках и приоритете обслуживания кабельных линий на основе оценки их технического состояния с использованием интегральных критериев.

Список литературы

1. Баширов М.Г. Способ диагностики состояния изоляции кабельных линий / М.Г. Баширов, Д.А. Заварихин, М.А. Миндолин, С.К. Мокшанцев // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. – 157 с.
2. Баширов М.Г. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств / М.Г. Баширов, Р.Н. Бахтизин, Э.М. Баширова, И.С. Миронова // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2011. – № 3. – С. 26–40. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_4.pdf.
3. Давиденко И.В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Екатеринбург: НГТУ, 2009. – 45 с.
4. Заварихин Д.А. Оценка технического состояния и прогнозирование ресурса безопасной эксплуатации кабельных линий 6–10 кВ магистральных перекачивающих станций / Д.А. Заварихин, М.Г. Баширов, М.А. Миндолин // Проблема сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2009. – № 2. – С. 83–88.
5. РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: методические указания.