

УДК 614.8; 621.311

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ
С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

**INTEGRATED CRITERIA APPLICATION TO ENSURE
INDUSTRIAL SAFETY OPERATION OF CABLE LINES**

Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф.

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

G. da K. Novikova Freyre Shavier, F.Sh. Khafizov, I.F. Khafizov

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: pkpb@mail.ru

Аннотация. В нефтехимической и нефтегазовой промышленности выход из строя кабельных линий может привести к авариям, сопровождающимся значительным экономическим и экологическим ущербом. Для осуществления бесперебойной работы систем электроснабжения производства необходима диагностика надежности кабельных линий. Опытным путем установлены значения диагностических параметров предельного уровня повреждения кабельных линий. Также проведено исследование взаимосвязи между техническим состоянием кабельной линии и значениями диагностических параметров. Предложены интегральные критерии определения технического состояния кабельных линий в промышленных условиях. С целью обеспечения безопасности и надежности их использования разработан алгоритм, разрешающий переходить на систему технического сервиса и ремонтных работ

кабельных линий в соответствии с фактическим техническим состоянием. В ходе экспериментального исследования был подтвержден тот факт, что происходит изменение измеренных значений кабельной линии, была определена передаточная функция, что математически точно характеризует состояние кабельной линии. Применение интегрального критерия позволяет создавать рекомендации о сроках, а также об очередности обслуживания кабельных линий, базирующихся на оценке их технического состояния.

Abstract. In the petrochemical and oil and gas industry, the failure of cable lines can lead to accidents, accompanied by significant economic and environmental damage. To ensure uninterrupted operation of production power supply systems, diagnostics of the reliability of cable lines is necessary. Values of diagnostic parameters of the limit level of damage to cable lines were established experimentally. A study of the relationship between the technical condition of the cable line and the values of diagnostic parameters was held. Integral criteria for determining the technical condition of cable lines in industrial conditions are proposed. In order to ensure the safety and reliability of their use, there has been developed an algorithm that allows switching to a system of technical service and repair of cable lines in accordance with the actual technical condition. In the course of the experimental study, it was confirmed that a change in the measured values of the cable line occurs, the transfer function was determined, which mathematically accurately describes the state of the cable line. The use of an integral criterion allows to create recommendations about the timing, as well as the order of maintenance of cable lines, based on an assessment of their technical condition.

Ключевые слова: кабельная линия, техническое состояние, дефект, бесперебойная работа, диагностический параметр, интегральный критерий, промышленная безопасность, безопасность эксплуатации

Key words: cable line, technical condition, defect, uninterrupted operation, diagnostic parameter, integral criterion, industrial safety, safety of operation

Одним из важных элементов предприятий нефтехимической и нефтегазовой промышленности является кабельная линия. При циркуляции веществ в технологических циклах существует риск выхода кабеля из строя, что может привести к аварийным ситуациям, которые сопровождаются большим экономическим и экологическим ущербом. Доля кабельных линий в отрасли составляет около 80 % от общего объема электрооборудования. Для создания современных интеллектуальных систем управления промышленным состоянием и защищенностью эксплуатации кабельных линий используются критерии, разрешающие в комплексе производить оценку их текущего технического состояния, а также остаточного ресурса.

Принимая во внимание техническое состояние используемого электрооборудования и тот факт, что средний период амортизации составляет порядка 70-80 %, можно предположить увеличение аварий и несчастных случаев на предприятиях нефтехимической и нефтегазовой промышленности страны.

Анализируя данные МЧС по нашей стране, видно, что приблизительно 20 % пожаров происходит вследствие причин, вызванных проблемами с электричеством, в том числе и из-за сбоев в подаче электричества и чрезвычайных обстановок на промышленных предприятиях и их объектах. Несоблюдение правил строительства и эксплуатации электрооборудования, в том числе кабельных линий и агрегатов с электроприводом, является причиной каждого четвертого пожара. Моральный и физический износ кабельных линий составляет приблизительно 40-80 % в системах электроснабжения.

На рисунке 1 приведена статистика чрезвычайных ситуаций на предприятиях нефтехимической и нефтегазовой отраслей по данным Федеральной сетевой компании и службы эксплуатации кабельных линий за последние 10 лет.

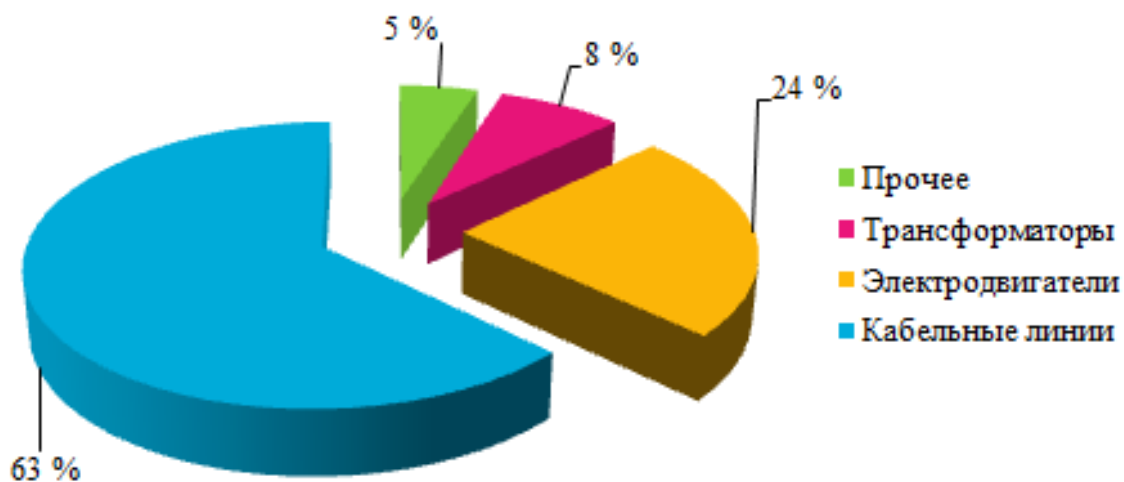


Рисунок 1. Показатели аварийных ситуаций, вызванных работой электрооборудования на предприятиях нефтехимической и нефтегазовой отраслей

Основную долю аварий из-за работы электрооборудования составляют неполадки в кабельных линиях – около 63 %, неисправности и неполадки разных классов напряжения электродвигателей – 24 %, неполадки в трансформаторах – примерно 8 %, прочие разновидности неполадок, не связанные с вышеуказанными, – 5 %.

Анализируя статистические данные службы эксплуатации кабельных линий за 2005-2016 годы, видно, что 42 % поломок происходят под нагрузкой, пробоев во время испытаний – 37 % и порывов во время вскрытия грунта – 21 % (рисунок 2).

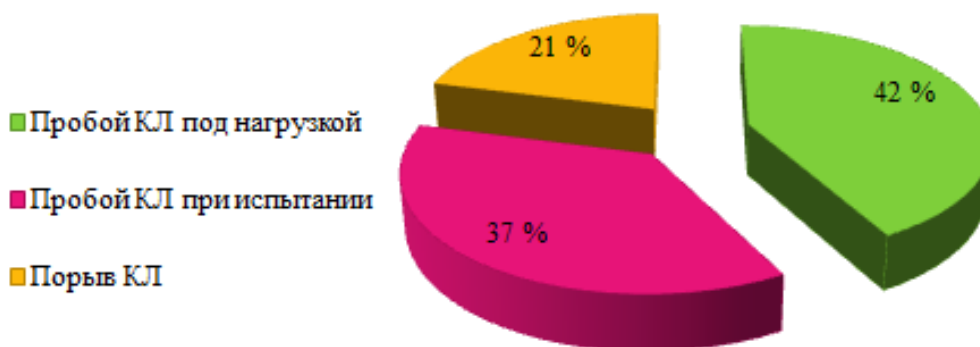


Рисунок 2. Статистические данные пробоев кабельных линий

Надежная и безопасная эксплуатация кабельных линий невозможна без проведения диагностики технического состояния объекта. Одним из перспективных способов оценки технического состояния кабельных линий является метод многопараметровой динамической количественной оценки. В отличие от других методов диагностики, данный метод является неразрушающим, что позволяет классифицировать кабельные линии по остаточному ресурсу. Для оценки технического состояния кабельных линий наиболее перспективным методом является метод искусственных нейронных сетей (ИНС). Особенностью данного метода является обучение. Обучение нейронных сетей дает возможность существенно уменьшить устройство определения образов при отсутствии изменения правдивости результатов [1].

Для проведения экспериментальных исследований взаимосвязи диагностических параметров с характерными дефектами кабельных линий были изготовлены опытные установки в соответствии с требованиями Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок, Правил устройства электроустановок и Руководства по эксплуатации средств измерений [2]. В качестве объектов исследования выбраны кабельные линии 6 кВ. На рисунке 3 показана блок-схема экспериментальной установки для изучения закономерностей взаимосвязи диагностических параметров (подана заявка на патент РФ).



Рисунок 3. Структурная модель экспериментальной установки для изучения закономерностей связи диагностических параметров и характеристик кабельных линий

В ходе исследования кабельная линия была принята за «черный ящик», на который подавался одношаговый сигнал, а на выходе регистрировалась кривая перехода. Далее с помощью переходной кривой определялась передаточная функция $W(p)$, из которой была получена обобщенная частотная характеристика:

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

Передаточная функция (1) позволила охарактеризовать свойства исследуемой системы. Для этого необходимо было установить, является ли система устойчивой. Определение устойчивости было достигнуто путем применения критериев устойчивости.

В настоящее время существует достаточное количество методов оценки устойчивости, например, одним из них является метод корневого распределения. Метод корневого распределения – это исследование на комплексной плоскости месторасположения корней характеристического уравнения в системе. В пределах и на границах плоскости, где

расположены корни характеристического уравнения, имеется область, определяющая степень устойчивости. Если рассматривать с точки зрения геометрии, уровень устойчивости равен расстоянию от мнимой оси вплоть до близлежащего корня характеристического уравнения стабильной устойчивой системы [3].

Затем была произведена корневая оценка, то есть расположение корней на плоскости для определения технического состояния кабельной линии. На рисунке 4 показана корневая оценка с разными корнями, нанесенными на общий график, технического состояния кабельной линии.

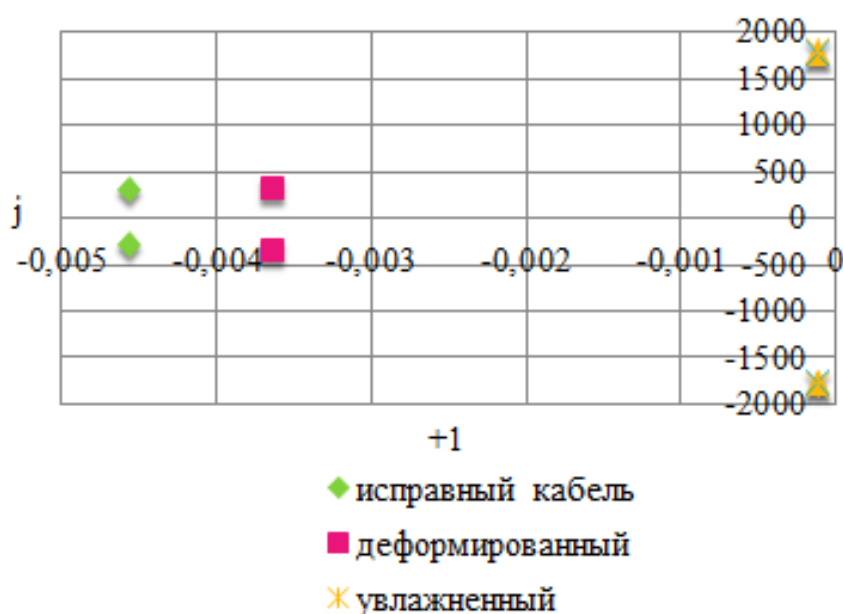


Рисунок 4. Корневая оценка технического состояния кабельной линии

График показывает, чем больше повреждений и дефектов содержит кабельная линия, тем ближе корни к воображаемой оси, а значит, приближаются к границе устойчивости. Можно сделать вывод, что чем ближе к пределу стабильности, тем меньше остаточный ресурс кабельных линий.

Таким образом, с помощью передаточной функции и значений, нормированных основных электрических характеристик и параметров кабеля, была определена область D корней характеристического уравнения

на единой комплексной плоскости, что отвечает правильному состоянию кабельной линии. Благодаря исследованиям и полученным опытным путем результатам было проведено сопоставление положения координат корней характеристического уравнения с границами области D . В результате получено заключение о состоянии кабельной линии. Для количественной оценки степени износа диэлектрических характеристик изоляции кабелей использовался метрический способ определения образов. Критерием степени деградации являлось расстояние между нынешними значениями местоположения корней характеристического уравнения либо координатами корней. D область рабочего кабеля была определена формулой:

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

где X – реальная часть корня характеристического уравнения;

Y – мнимая часть корня данной функции характеристического уравнения.

Аналогичным образом была проведена вибродиагностика узлов машин. С учетом на комплексной единой плоскости месторасположения корней полученной передаточной функции техническое состояние кабелей было распределено на 3 группы: «неудовлетворительное», «удовлетворительное» и «нормальное». Каждая группа соответствует различным состояниям дефекта: «дефект не обнаружен», то есть недостатков не найдено; либо «дефект обнаружен», то есть незначительный недостаток; либо «критическое повреждение обнаружено», что означает, что объект в дальнейшем не работоспособен. Месторасположению корней передаточной функции в области размещения области D отвечает «дефект не обнаружен». А согласно ГОСТ 27.002-89 (актуальная редакция), состоянию «критическое повреждение

обнаружено» соответствует та область размещения корней передаточной функции, которые никак не относятся к области D. Это означает, что это 100 %-ный ущерб [4]. Опытным путем было рассчитано, что 20 % от «критическое повреждение обнаружено» соответствует «повреждение обнаружено». Данному пределу состояния и отвечает месторасположению корней передаточной функции в удовлетворительной области $D_{уд}$:

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

Повреждение кабельной линии было смоделировано на экспериментальной установке (рисунок 5) с помощью нагрева и охлаждения кабеля, также использовали и новый кабель, и кабель с различным сроком службы.

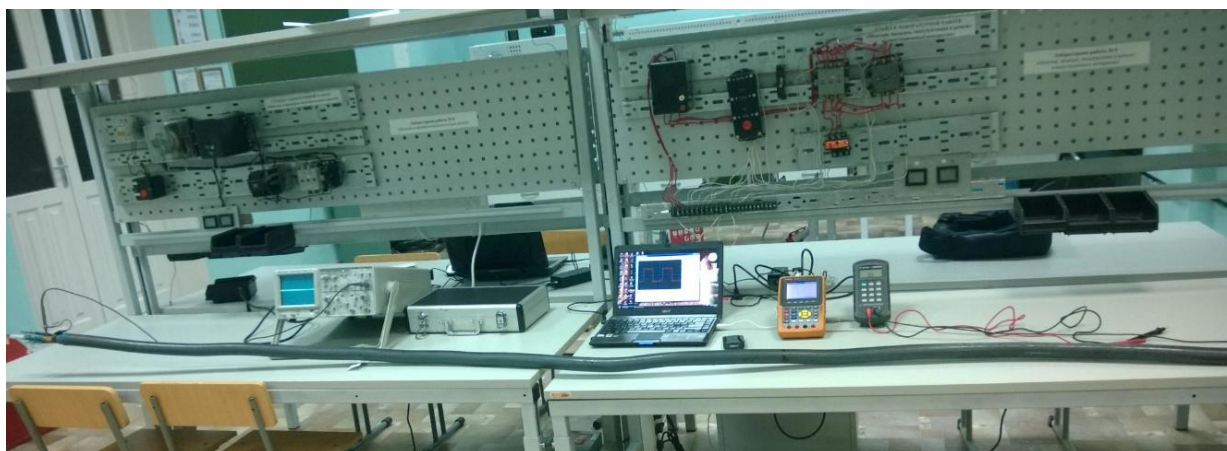


Рисунок 5. Внешний вид экспериментальной установки

Для определения характеристик дальнейшей эксплуатации кабельной линии на основе анализа диагностических параметров применяются искусственные нейронные сети. Преимуществом нейронных сетей в вопросах определения технического состояния является их обучаемость. Однако нейронные сети имеют значительный минус: для обучения следует осуществить большое число экспериментов, их количество может

достигать нескольких десятков тысяч. На рисунке 6 показана экспериментальная установка для расчетов.

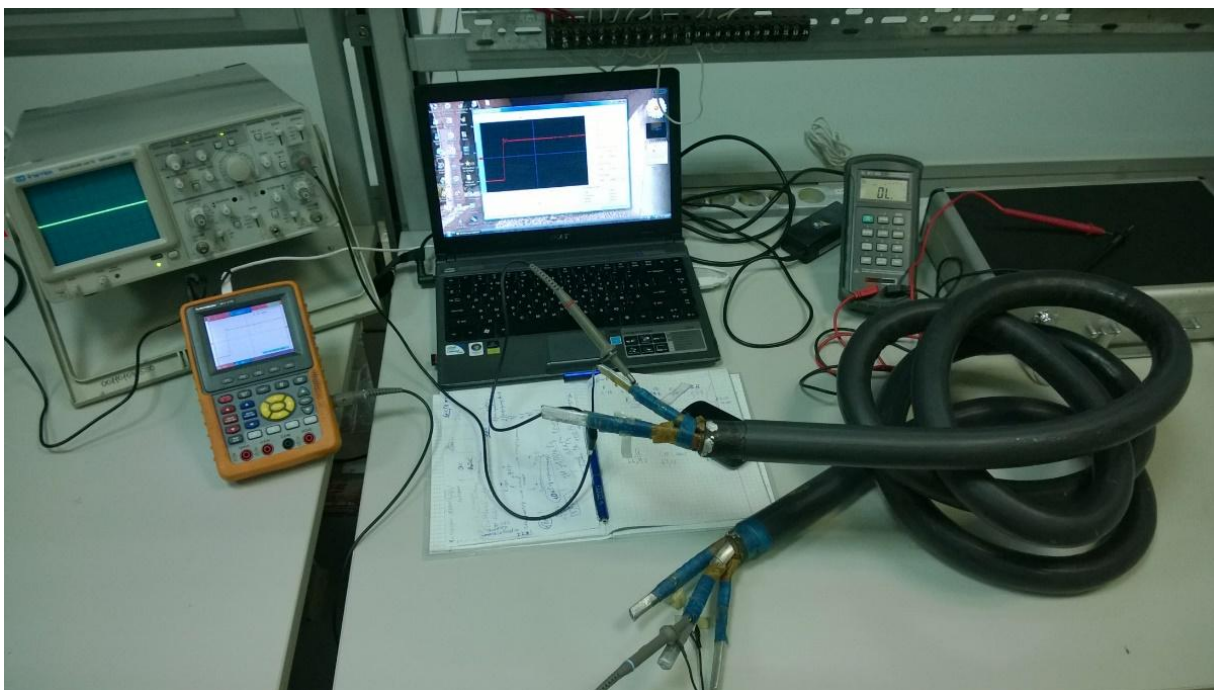


Рисунок 6. Экспериментальная установка с целью изучения, исследования и расчетов взаимосвязи между техническим состоянием кабельной линии и значениями диагностических параметров

С помощью программного обеспечения искусственная нейронная сеть формирует интегральный критерий. То есть, набор нормированных показателей параметров диагностических разбирается искусственной нейронной сетью:

$$I = f(w_{j0} + \sum_{i=1}^m (w_{ji} \cdot (C_i + tg \delta_i + Q_i + R_i + D(\text{Im})_i + D(\text{Re})_i))), \quad (4)$$

где m – равное количество входов одновременно функционирующих линейных элементов;

w_{j0} – лиминальный коэффициент;

w_{ji} – весовой параметр i входа j нейрона.

Для обучения искусственных нейронных сетей, которые предназначены для определения значений интегрального критерия I , создан программно-аппаратный комплекс с базой данных (рисунок 7) [5].



Рисунок 7. Программно-аппаратный комплекс (структурная схема)

В соответствии с вышеизложенным составлен алгоритм оценки технического состояния кабельных линий (рисунок 8).

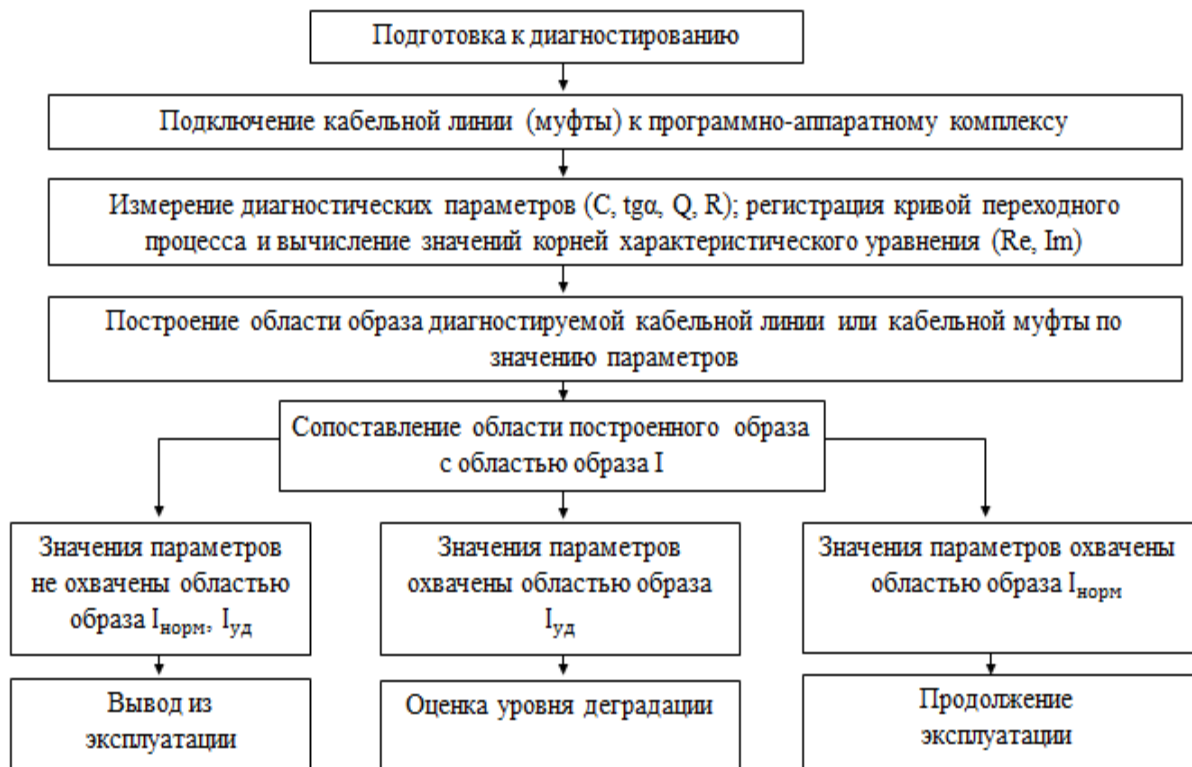


Рисунок 8. Алгоритм оценки технического состояния кабельных линий

Вывод

В ходе экспериментального исследования был подтвержден тот факт, что происходит изменение измеренных значений кабельной линии, была определена передаточная функция, что математически точно характеризует состояние кабельной линии. Применение интегрального критерия позволяет создавать рекомендации о сроках, а также об очередности обслуживания кабельных линий, базирующихся на оценке их технического состояния.

Список используемых источников

1. Мокшанцев С.К., Заварихин Д.А., Баширов М.Г., Миндолин М.А. Способ диагностирования состояния изоляции кабелей. Электрооборудование, технологии и электропривод предприятий. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2008. 156 с.

2. Давиденко И.В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного оборудования: дисс. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2009. 462 с.

3. Баширов М.Г., Бахтизин Р.Н., Баширова Э.М., Миронова И.С. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтяных и газовых производств // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 3. С. 26-40. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_4.pdf.

4. Прахов И.В., Самородов А.В., Баширов М.Г. Повышение эффективности применения искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования использованием теории планирования эксперимента // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. № 2. С. 14-16.

5. Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., Миронова И.С., Чернов К.В. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей 6 кВ на основе частотного способа диагностики // Теоретические и прикладные современные науки: сб. науч. тр. по матер. 6-ой Междунар. науч.-прикладн. конф.: в 5 ч. Белгород: Изд-во АПНИ, 2015. С. 88-91.

References

1. Mokshantsev S.K., Zavarikhin D.A., Bashirov M.G., Mindolin M.A. *Sposob diagnostirovaniya sostoyaniya izolyatsii kabelei // Elektrooborudovanie, tekhnologii i elektroprivod predpriyatii* [The Way to Diagnose the Cable Insulation State. Electrical Equipment, Technology and Electric Drive of Enterprises]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2008. 156 p. [in Russian].

2. Davidenko I.V. *Razrabotka sistemy mnogoaspektnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i obsluzhivaniya vysokovol'tnogo maslonapolnennogo oborudovaniya: diss. d-ra tekhn. nauk* [Development of a Multi-Aspect System for Assessing the Technical Condition and Maintenance of High-Voltage Oil-Filled Equipment: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2009. 462 p. [in Russian].

3. Bashirov M.G., Bakhtizin R.N., Bashirova E.M., Mironova I.S. Sistema avtomatizatsii upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem tekhnologicheskogo oborudovaniya neftyanykh i gazovykh proizvodstv [The Management Automation System of Technical Condition the Technological Equipment in Oil and Gas Industry]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 3, pp. 26-40. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_4.pdf. [in Russian].

4. Prakhov I.V., Samorodov A.V., Bashirov M.G. Povyshenie effektivnosti primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei v zadachakh diagnostiki nasosno-kompressornogo oborudovaniya ispol'zovaniem teorii planirovaniya eksperimenta [Improving the Efficiency of the Use of Artificial Neural Networks in the Problems of Diagnostics of Pump-Compression Equipment Using Experiment Planning Theory]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya – Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials*, 2011, No. 2, pp. 14-16. [in Russian].

5. Novikova Freire Shavier Zh. da K., Mironova I.S., Chernov K.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh kabelei 6 kV na osnove chastotnogo sposoba diagnostiki [Evaluation of the Technical Condition of High-Voltage Cables of 6 kV Based on the Frequency Diagnostic Method]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam 6-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prikladnoi konferentsii «Teoreticheskie i prikladnye sovremennye nauki»: v 5 ch.* [Collection of scientific papers based on the materials of the 6th International Scientific and Applied Conferences «Theoretical and Applied Modern Sciences»: in 5 parts]. Belgorod, Izd-vo APNI, 2015, pp. 88-91. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., аспирант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

G. da K. Novikova Freyre Shavier, Post-graduate Student of Fire and Industrial Safety Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: shavier_93@mail.ru

Хафизов Ф.Ш., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная и промышленная безопасность», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

F.Sh. Khafizov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Fire and Industrial Safety Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation
e-mail: pkpb@mail.ru

Хафизов И.Ф., д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

I.F. Khafizov, Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Fire and Industrial Safety Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation
e-mail: pkpb@mail.ru