

УДК 621.315.2.016.2

Н.В. Пономарев

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Сегодня существует множество технических систем неразрушающего диагностического мониторинга силовых высоковольтных кабельных линий (КЛ), алгоритмы работы которых основываются на различных методах диагностики [1].

По мнению автора, система неразрушающего диагностического мониторинга КЛ, отвечающая всем современным требованиям [1,2], способная сравниться или даже превзойти по точности определения степени повреждений КЛ существующие, может быть разработана на базе метода высокочастотной рефлектометрии [1,4], основанном на особенностях распространения электромагнитных волн в длинных линиях, чья физическая длина сравнима или сколь угодно превосходит длину электромагнитной волны, и заключается в определении коэффициента отражения КЛ, последовательно на всем диапазоне частот зондирующего напряжения, причем указанный коэффициент отражения представляют в виде:

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{в}} - Z_{\text{вх}}}{Z_{\text{в}} + Z_{\text{вх}}}$$

где Γ – коэффициент отражения КЛ; $Z_{\text{в}}$ – волновое сопротивление КЛ; $Z_{\text{вх}}$ – входное сопротивление КЛ.

Входное сопротивление КЛ измеряется непосредственно на контролируемой КЛ последовательно на всем диапазоне частот зондирующего напряжения.

Значение волнового сопротивление КЛ также определяется непосредственно на контролируемой

КЛ или берется из справочных данных.

На основе полученных коэффициентов отражения КЛ производится вычисление спектральной плотности пространственных гармоник модулей коэффициентов отражения с помощью преобразования Фурье.

Изменение спектральной плотности пространственных гармоник модулей коэффициентов отражения определяет место нахождения дефекта в изоляции КЛ и определяется величиной емкости участка КЛ имеющий дефект.

В свою очередь величина емкости участка КЛ, имеющий дефект, определяет степень развития дефекта в изоляции КЛ. Предельная величина емкости (дальнейшее развитие дефекта изоляции КЛ приведет к пробое изоляции) вычисляется для каждого типа кабеля и кабельных муфт на основе значений пробивных напряжений изоляционных материалов.

Для определения расчетных параметров разрабатываемой автоматической системы диагностического мониторинга КЛ [1], было произведено моделирование метода высокочастотной рефлектометрии в программной среде моделирования MatlabSimulink.

Изображенная на рисунок 1 модель диагностической системы состоит из КЛ, измерительно-вычислительного прибора (ИВП) и согласованной с КЛ активной нагрузки.

В свою очередь КЛ состоит из трех участков с типовыми электрическими параметрами трехфаз-

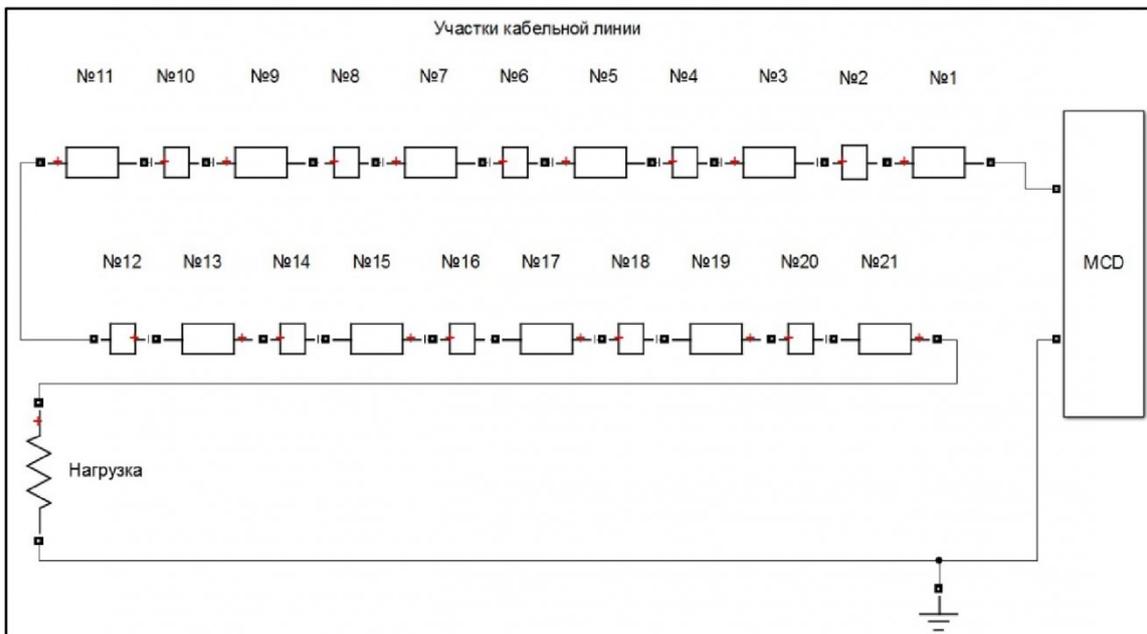


Рис. 1. Модель диагностической системы

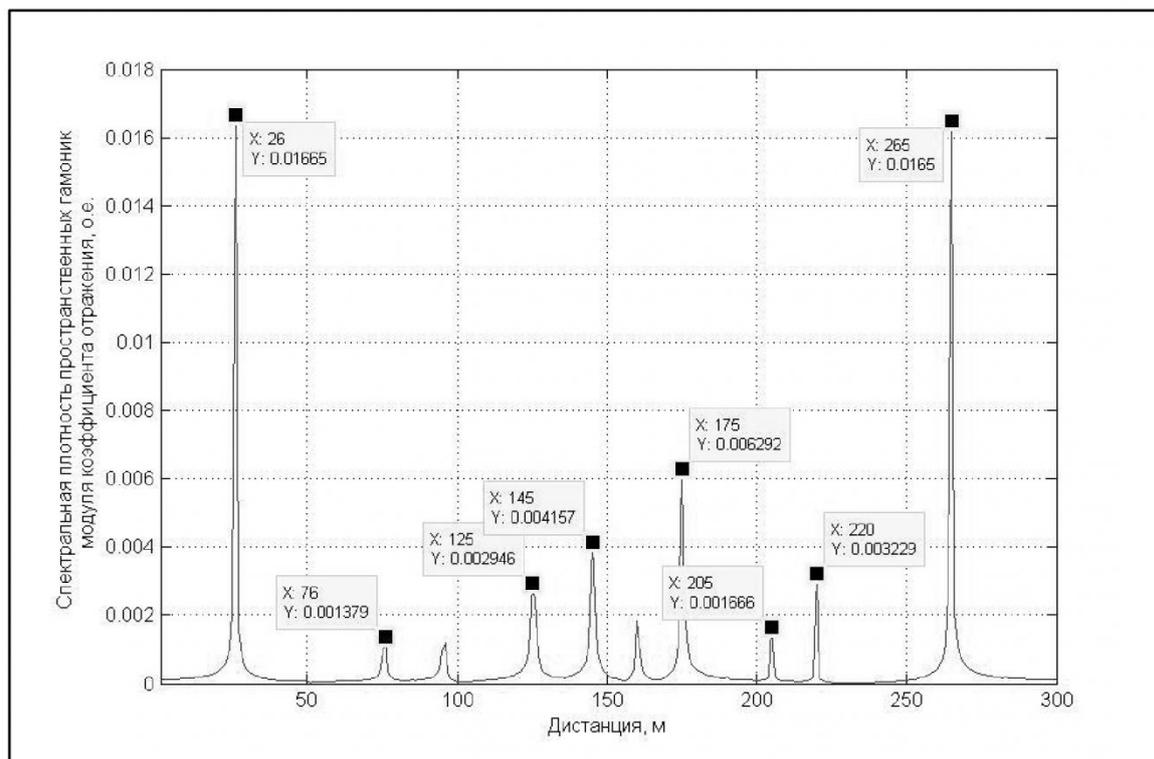


Рис. 2. График распределения спектральной плотности пространственных гармоник

ного силового высоковольтного кабеля 10 кВ в общей металлической оболочке с бумажной пропитанной изоляцией. Величина активной нагрузки соответствует величине волнового сопротивления КЛ (КЛ согласована с нагрузкой). Измерительно-вычислительный прибор MCD производит необходимые измерения и вычисляет на основе метода высокочастотной рефлектометрии [3,4] спектральную плотность гармоник модуля коэффициента отражения КЛ и распределенную емкость вдоль КЛ.

Для упрощения была использована однофазная модель кабеля.

Использовались следующие параметры кабеля: длина кабеля $L = 300$ м; сечение жилы $D = 120$ мм²; удельное активное сопротивление жилы кабеля $R_0 = 0,1523$ Ом/км; удельная емкость жилы кабеля $C_0 = 0,333$ мкФ/км; удельная индуктивность кабеля $L_0 = 0,268$ мГн/км [7]. Нагрузкой является активное сопротивление, согласованное с КЛ: $R_{нагр.} = |Z_{в}|$.

Моделирование дефектов КЛ производилось внесением локальных участков кабеля с увеличенной емкостью.

Причинами использования в модели такого вида кабеля является его широкое применение на промышленных предприятиях и в городских распределительных сетях.

Также по данным из [6] 100% КЛ на напряжения 6-35 кВ на предприятиях России требуют полную или частичную замену, а также ремонт

концевых и соединительных муфт. При этом на КЛ на напряжения 6-10 кВ приходится более 70% всех нарушений электроснабжения потребителей [5]. Все вышеизложенное обуславливает использование в первую очередь этого вида кабеля для апробации метода высокочастотной рефлектометрии.

В качестве зондирующих воздействий измерительно-вычислительный прибор MCD последовательно подавал на КЛ напряжения частотой от 547,4 МГц до 600 МГц с шагом дискретизации 100 кГц.

Участки КЛ №1, №3, №5, №7, №9, №11, №13, №15, №17, №19, №21 (рисунок 1) имеют вышеуказанные электрические параметры кабеля. Участки КЛ №2 и №20 (рисунок 1) моделируют участки КЛ с предельным локальным дефектом изоляции величиной $C_0 = 0,025$ пФ [5], расположенные на расстоянии 25 и 265 метров от места присоединения ИВП соответственно. Остальные участки КЛ моделируют дефекты КЛ, находящиеся в разной степени развития.

На основе, представленного на рисунке 2 графика распределения спектральной плотности пространственных гармоник модуля коэффициента отражения КЛ, соответствующего модели дефекта КЛ, представленного на рисунке 2, можно сделать следующие выводы: метод способен определять степень развития нескольких дефектов изоляции КЛ и мест их образования; теоретически метод способен определять состояние изоляции КЛ с

бесконечной длиной (границы измерения КЛ определяются мощностью МСД, диапазоном частот и степень дискретизации зондирующего напряжения); существует погрешности изменения спектральной плотности пространственных гармоник от места образования дефекта и локализации места дефекта (вышеуказанные погрешности нивелируются уменьшением шага дискретизации зондирующего напряжения).

Стоит заметить, что метод высокочастотной рефлектометрии возможно применять на КЛ находящейся в работе (в режиме on-line), не требует значительного времени наблюдения в сравнении с методом измерения частичных разрядов и менее критичен в технической реализации чем метод импульсной рефлектометрии.

Произведенное программное моделирование дало необходимую информацию для дальнейшей разработки автоматизированной системы диагностического мониторинга КЛ и подтвердила возможность применения метода высокочастотной рефлектометрии для выявления локальных дефектов изоляции кабельных линий 10 кВ.

Произведенная работа выявила необходимости определения критериев оценки состояния кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и разработки наиболее подходящей для применения

метода высокочастотной рефлектометрии схемы соединения с диагностируемой КЛ, способной применяться в режиме on-line. Также были выявлены необходимости в разработке схемы заградительного элемента, ограничивающего границу измерения МСД (то места присоединения МСД до места присоединения электроприемника) и расчета необходимой мощности зондирующего воздействия МСД, необходимой для производства достаточно точных измерений.

Разработка автоматизированной системы диагностического мониторинга КЛ на базе метода высокочастотной рефлектометрии является перспективной задачей, так как данный метод менее требователен к аппаратному обеспечению, имеет высокую помехоустойчивость, требует малого времени наблюдения, способен определять как локальные, так и распределенные дефекты, может применяться для диагностики в режиме on-line и имеет конкретные критерия оценки состояния кабелей с пропитанной бумажной изоляцией [4,5].

Дальнейшая работа по определению критериев оценки состояния кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена позволит применять данный метод для КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжением 10 кВ и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пономарев, Н.В.* Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий. // Вестник КузГТУ. 2012. – №5. С.68 – 71.
2. *Кобец, Б.Б.* Smart Grid как концепция инновационного развития электро-энергетики за рубежом / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова, В.Р. Окорочков // Энергоэксперт, 2010. – №2. – С. 52 – 58.
3. *Лебедев, Г.М.* Математическое моделирование локальных дефектов изоляции силовых кабелей 6-10 кВ / Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский. // Электричество, 1998. – №12. – С. 23 – 27.
4. *Лебедев, Г.М.* Определение дефектов изоляции кабельных линий высокочастотным методом контроля / Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский. // Электрика, 2003. – №7. – С. 37 – 40.
5. *Лебедев, Г.М.* Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6-10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. / Московский энергетический институт. (Технический университет). Защищена 19.10.2007. – М., 2007. – 408 с.
6. *Кустов, А.И.* Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования ... и зачем она нужна. // Энергетика и промышленность России. 2006. – №8. – С.30 – 38.
7. *Астахов, Б.А.* Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / Б.А. Астахов, И.А. Баумштейн // М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.

Автор статьи:

Пономарев
Никита Викторович
аспирант каф. электроснабжения горных и
промышленных предприятий КузГТУ.
E-mail:
nickitaponomarev@yandex.ru