

# ON-LINE ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Богдашева Л.В., Качесов В.Е., Шевченко С.С.*

*(Новосибирский государственный технический университет)*

*Михеев В.П., Орлянский А.В., Остапенко О.Н. (ГУП «УЭВ СО РАН», Новосибирск)*

*Дементьев Е.Н. (ИЯФ СО РАН, Новосибирск)*

## **Постановка проблемы.**

Распределительные сети 6-35 кВ имеют сложную древовидную структуру, поэтому диагностика их состояния представляет сложную в техническом плане задачу. В отличие от сетей высокого и сверхвысокого напряжений, где нарушение любой изоляции – междуфазной и фазной сопровождается сверхтоками и приводит к отключению линии, в распределительных сетях дефекты фазной изоляции не приводят к ухудшению условий электроснабжения потребителя, но существующий дефект требует его устранения, поскольку изоляция находится под повышенным напряжением, особенно, в случае неустойчивого дугового замыкания, когда перенапряжения значительны, продолжительны и представляют опасность для ослабленной изоляции неповрежденных фаз.

Задача on-line диагностики состоит в определении текущего состояния сети. В силу ее сложной конфигурации необходимо ответить на вопросы: ЧТО?, ГДЕ?, КОГДА?, ПРИ КАКИХ УСЛОВИЯХ? В [1] показана и описана общая структура задачи мониторинга, включающая подзадачи *распознавания, выделения поврежденного фидера, локации*. Эти три подзадачи отвечают на первые два выше перечисленных вопроса, а выполнение непрерывного мониторинга аварийных событий с достаточно высокой частотой дискретизации отвечает на два последних. Совокупность ответов на все отмеченные вопросы дает информацию для решения задачи координации изоляции и целенаправленной ее профилактики.

Реализация мониторинга сети представляется аппаратно-программной задачей и в техническом плане не является достаточно сложной (см., например, [2,3]), поскольку на современном рынке представлены соответствующие аппаратные (измерительные) средства. Остальные подзадачи более сложны в теоретическом плане, но имеют к настоящему времени достаточно глубоко проработанные решения.

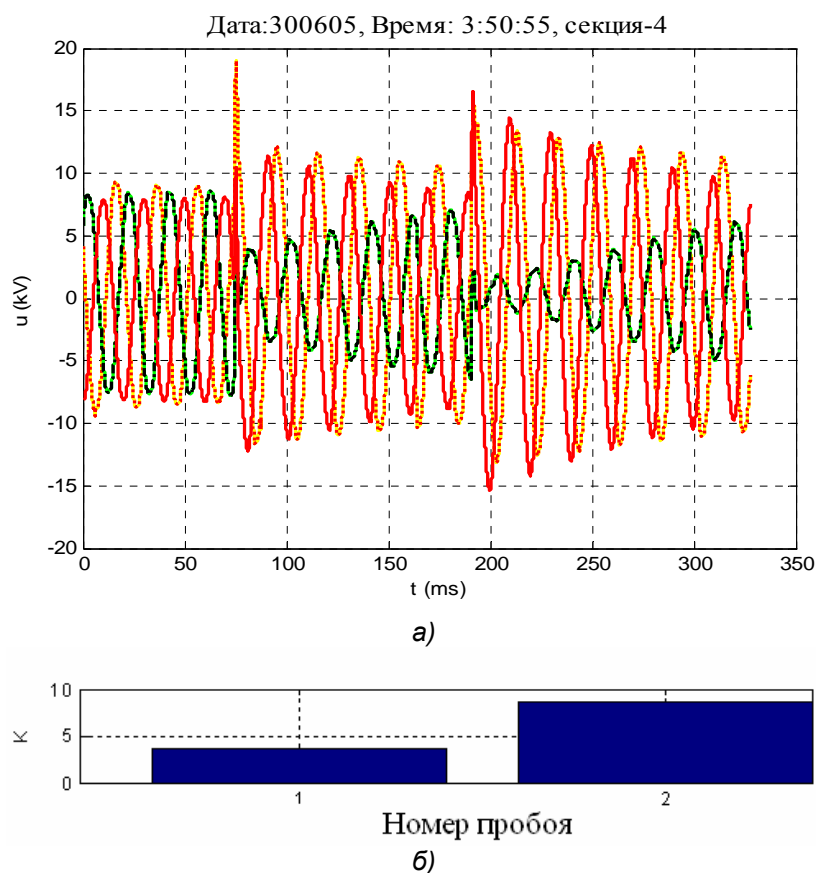
## **Диагностика сети с компенсацией емкостных токов замыкания на землю.**

Наиболее остро задача диагностики стоит в сильно разветвленных и протяженных сетях; выделение поврежденного фидера и локация поврежденной зоны в такой сети осложнены. Эти сети характеризуются большими емкостными токами замыкания на землю (ЕТЗЗ), которые компенсируются с помощью дугогасящих реакторов (ДГР), одновременно эффективно снижающих перенапряжения при дуговых замыканиях.

Наличие ДГР в нейтрали питающего трансформатора позволяет надежно решить задачу распознавания однофазного дугового замыкания (ОДЗ), поскольку напряжение на поврежденной фазе после погасания дуги восстанавливается в виде биения колебаний. Даже при удовлетворительной настройке ДГР оно восстанавливается плавно, поэтому отношение ( $K$ ) действующих значений напряжений на неповрежденных фазах к напряжению поврежденной фазы (определенных на относительно малом интервале времени) велико (см. рис.1). Этот параметр является критерием распознавания ОДЗ [4].

Для выделения фидера с ОДЗ могут использоваться различные способы, но их применимость к сетям с компенсацией емкостных токов замыкания ограничена, кроме того, достоверность селекции их использования довольно низка [5]. Последнее отталкивает предприятия электрических сетей от их широкого внедрения. В разработанной системе выделения фидера с ОДЗ реализован принцип, основанный на известном свойстве противоположности полярностей первых полуволн высокочастотных составляющих токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденном фидерах (предложенный еще в начале 20-го века Бергероном Л. [6]). Благодаря

выделению из сигнала только его полярности исключается влияние разброса параметров трансформаторов тока нулевой последовательности. Для повышения надежности селекции и исключения случаев ложного срабатывания выделение происходит только при наличии факта ОДЗ [7], что осуществляется модулем распознавания.



*Рис.1 Фазные напряжения при ОДЗ в сети 10 кВ с компенсацией ЕТЗЗ (а), коэффициент отношения (К) минимального действующего напряжения одной из неповрежденных фаз к напряжению поврежденной фазы (б)*

Блок выделения фидера (БВФ) с ОДЗ выполнен в виде отдельного устройства, реализованного на микроконтроллере. Информация с этого устройства, устанавливаемого на каждой секции шин, поступает в персональный компьютер и обрабатывается при установлении факта ОДЗ. Структура системы мониторинга и диагностики воздушно-кабельной распределительной сети 10 кВ, питаемой от ГПП «Академическая» (г. Новосибирск), представлена на рис.3.

#### **Локация повреждений.**

Наибольшие трудности при диагностике сети представляет задача локации мест замыкания (мест со значительной поперечной фазной проводимостью). Локационные методы мало пригодны к распределительным сетям в силу многократных отражений в линиях и, как следствие, невозможности анализа рефлектограмм. Применение параметрических методов локации замыканий в таких сетях [8-11], осложняется динамикой изменения параметров сети и, значит, ее свойств. Учет изменения топологии и нагрузки сети можно реализовать двумя подходами: а) - путем расчета частотных ( $l_3 = \varphi(f_2)$ ) или дифференциальных ( $l_3 = \xi\left(\frac{du^*}{dt}\right)$ ) характеристик присоединений в режиме замыкания на землю для всех наиболее вероятных схемных режимов с последующей интерполяцией значений в промежуточных точках, б) - путем получения характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе измерительного процесса.



Рис.2 Устройство выделения фидера с ОДЗ

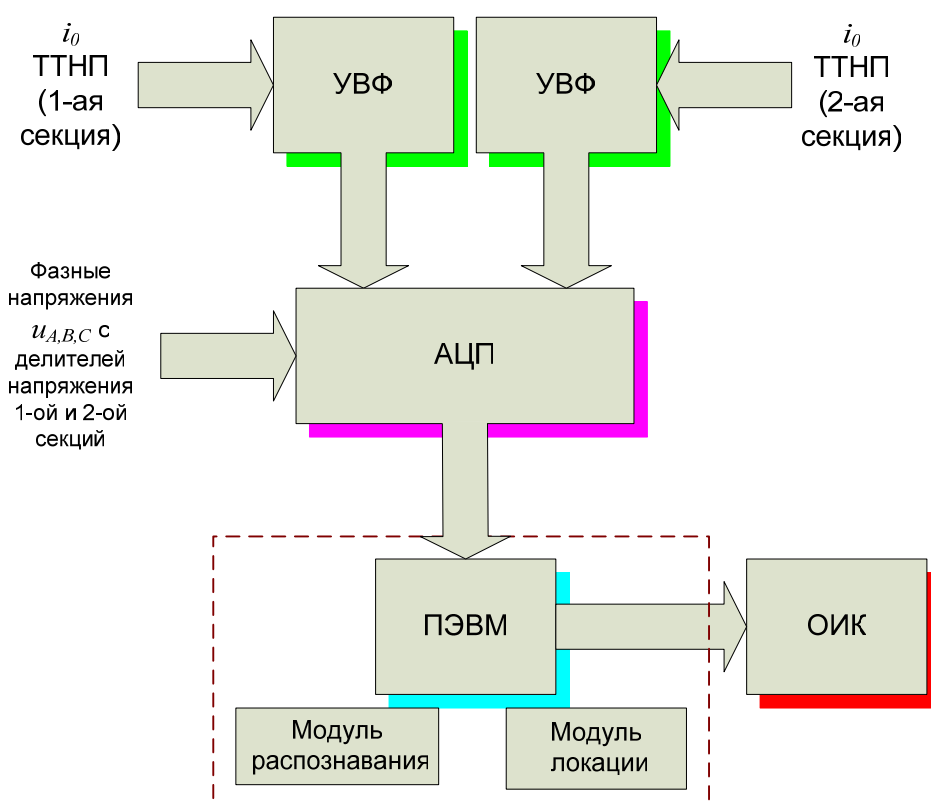


Рис.3 Структура системы мониторинга и диагностики (АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ОИК – оперативно-измерительный комплекс)

В последнем случае точность локации (теоретически) будет максимальна, но сложность полной электрической схемы питания, содержащей, как правило, сотни узлов, ограничивает применение этого способа. Практически представляется возможным снимать расчетные характеристики и в полной схеме сети, но для этого требуются достаточно сложные пакеты программ моделирования стационарных и переходных процессов, а также программы постпроцессирования расчетных данных. Однако, количество свободных частот, участвующих в формировании образа переходного процесса замыкания на землю, ограничено, что позволяет применять методику редуцирования порядка расчетной схемы без потери точности расчетов в эквивалентной схеме и использовать более простую расчетную модель.

Существуют высокоточные методики эквивалентирования схем, базирующиеся на аппроксимации частотной характеристики цепи (сети), например, - векторная

аппроксимация [12]. Но такие методики сложны в практической (алгоритмической и программной) реализации, поэтому разработана несложная методика, которая ориентирована, главным образом, на радиальные распределительные сети и обеспечивает требуемую точность.

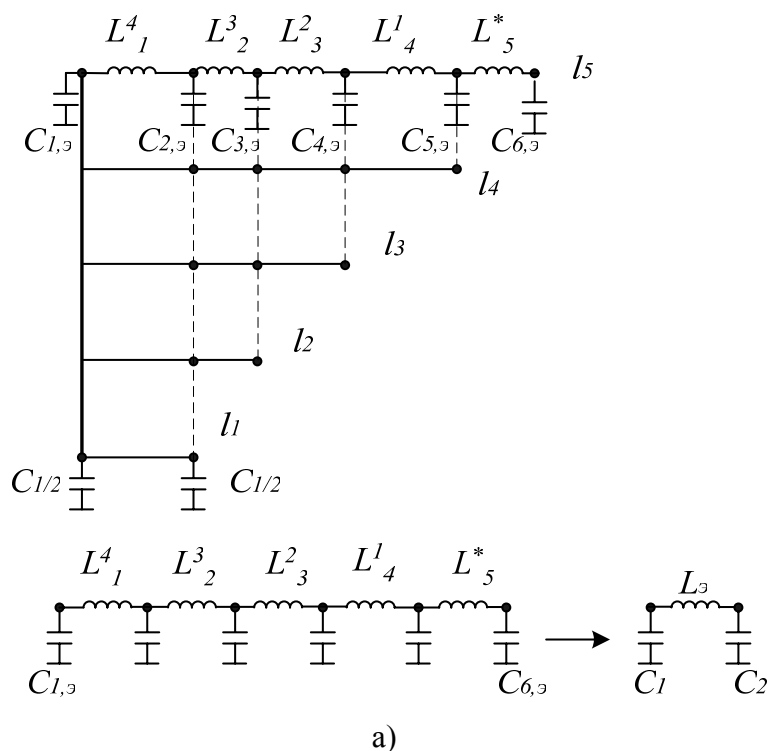
Основа методики редуцирования схемы сети состоит в поэтапном эквивалентировании различных ее участков с целью приведения сложной древовидной схемы распределительной сети, имеющей очень высокий порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в ней, к наиболее простому виду, содержащему только параллельно соединенные эквивалентные участки [13].

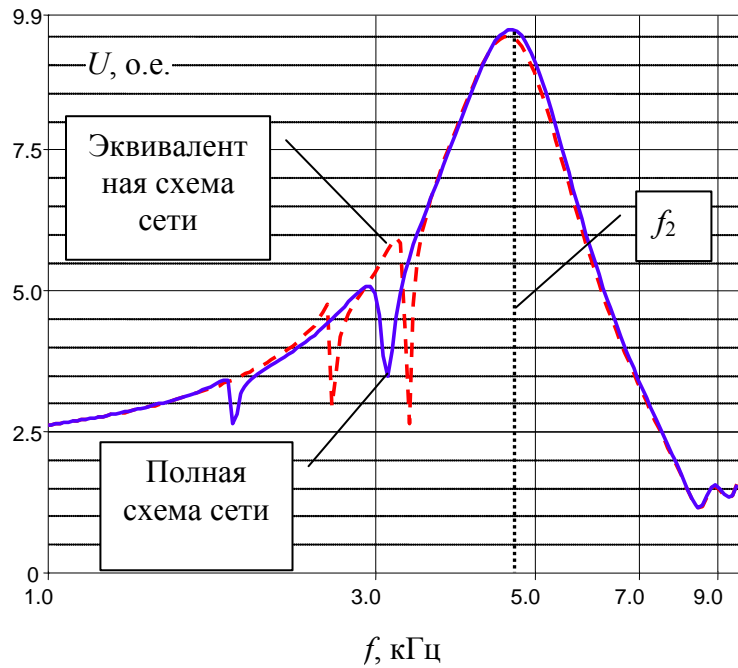
В общем случае методика редуцирования может быть разделена на три составляющие, направленные на различные конфигурации участков сети, а именно:

- метод эквивалентирования однородных линий (однородная линия - линия, удельные первичные параметры которой постоянны по всей длине);
- метод эквивалентирования участков сети, содержащих как кабельные, так и воздушные линии электропередачи;
- метод эквивалентирования неоднородных линий.

*Метод эквивалентирования однородных линий.* В случае, когда в структуре сети содержится значительное число распределительных подстанций (РП) с большим количеством отходящих присоединений, схема может быть упрощена при помощи алгоритма, приведенного далее, до схемы цепочного вида, а затем до П-схемы, используя правило моментов (рис.4).

В качестве исходных параметров используются векторы-строки удельных емкостей и индуктивностей, а также длины каждого присоединения. В месте окончания каждого присоединения формируется «фиктивный» узел и полагается, что все присоединения в этом узле включены параллельно.





б)

Рис.4 Преобразование участка расчетной схемы для случая однородных линий а), частотные характеристики в полной схеме сети и в эквивалентной схеме, где все фидеры (включая головной) одной РП заменены П-схемой (б)

Алгоритм эквивалентирования индуктивностей и емкостей для схемы, представленной на рис.4 а), изложен ниже:

$$L_{i(i=1)}^k = \frac{L_{k+i} l_i L_i^{k-1}}{L_{k+i} l_i + L_i^{k-1}}; L_{i(i=2..n-2)}^k = \frac{L_{k+i} (l_i - l_{i-1}) L_i^{k-1}}{L_{k+i} l_i + L_i^{k-1}}; L_{i(i=n-1)}^* = L_i (l_i - l_{i-1}), k = 1..(n-i)$$

$$C_{\varepsilon,1} = l_1 \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{2}; C_{\varepsilon,k(k=2..n)} = (l_{k-1} - l_{k-2}) \sum_{i=k-1}^n \frac{C_i}{2} + (l_k - l_{k-1}) \sum_{i=k}^n \frac{C_i}{2}; C_{\varepsilon,n+1} = (l_2 - l_1) \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{2},$$

где  $n$  – количество отходящих присоединений.

*Метод эквивалентирования участков сети, содержащих как кабельные, так и воздушные линии электропередачи.* В распределительных сетях 6-35 кВ нередко встречаются смешанные участки сети, где воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) чередуются с кабельными линиями. Воздушные вставки (ВЛЭП) обладают значительно большей (погонной) индуктивностью по сравнению с кабельными линиями и поэтому при редуцировании схемы могут быть представлены сосредоточенной индуктивностью. Результаты расчетов показывают, что в этом случае амплитудно-частотная характеристика исходного участка сети практически не претерпевает значительных изменений в частотном диапазоне, подлежащем анализу [8,10].

*Метод эквивалентирования неоднородных линий.* Особый интерес представляет собой эквивалентирование участков сети, представленных, например, отходящим от ГПП питающим фидером (линия с распределенными параметрами) и РП, представленной П-схемой (уже после некоторого этапа эквивалентирования).

На первом этапе редуцирования происходит преобразование участка сети с распределенными параметрами в П-схему, затем с использованием упомянутого выше метода эквивалентирования однородных линий выполняется приведение к схеме

цепочечного вида и дальнейшее ее преобразование в эквивалентную П-схему при помощи правила моментов.

Представленные методы были опробованы в реальной радиальной распределительной (преимущественно) кабельной сети 10 кВ. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные для полной схемы сети отличаются от эквивалентных схем лишь на единицы процентов. На рис.4,б в качестве примера приведены АЧХ полной схемы сети и сети, в которой одна РП (с отходящими протяженными ВЛЭП, чередующимися КЛ) заменена эквивалентной П - схемой. Погрешность в отклонении второй частоты свободных колебаний составляет менее 2%.

Таким образом, исходные полные расчетные схемы сетей могут быть многократно редуцированы без потери точности локации с целью получения характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе измерительного процесса.

#### **Выводы.**

Для радиальных распределительных сетей разработана методика контроля состояния их изоляции в реальном времени, на примере реальной сети 10 кВ показаны принципы ее практической реализации. Небольшими партиями система может поставляться в предприятия электрических сетей. Использование системы on-line диагностики позволяет контролировать правильность работы средств защиты от перенапряжений, состояние изоляции, формировать карту аварийности сети, целенаправленно выполнять своевременные профилактические и ремонтные работы.

#### **Литература.**

1. Bogdasheva L.V., Kachesov V.E. Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. - Proc. IEEE PowerTech'05, St.-Petersburg, 27-30 June, 2005, paper 159.
2. Качесов В.Е., Ларионов В.Н., Овсянников А.Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях. - Электрические станции, №8, 2002.
3. Качесов В.Е., Шевченко С.С., Борисов С.А. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки и их мониторинг. - Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ; Труды третьей Всероссийской научн.-техн. конф.- Новосибирск, 2004.
4. Патент РФ № 2232456 (от 11.10.2002). Способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с резонансно-заземленной нейтралью// Качесов В.Е., БИ № 19, 2004.
5. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию. - Энергетик, №1, 2000.
6. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической цепи. - М.: Машгиз, 1962, 465 с.
7. Патент РФ № 2254586 (от 24.12.2003). Способ определения фидера с однофазным дуговым замыканием на землю в радиальных распределительных кабельных сетях// Качесов В.Е., БИ № 17, 2005.
8. Патент РФ № 2216749 (от 27.03.2001). Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях// Качесов В.Е., БИ №32, 2003.
9. Патент РФ № 2222026 (от 11.01.2002). Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях// Качесов В.Е., БИ №2, 2004.
10. Качесов В.Е., Лавров В.Ю., Черепанов А.Б. Параметрический способ определения мест повреждения в распределительных сетях// Электрические станции, №8, 2003.
11. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением// Электричество, №6, 2005.

12. B. Gustavsen and A. Semlyen. Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting. - IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, July 1999.
13. Богдашева Л.В. Редукция порядка расчетных схем в параметрических методах локации однофазных дуговых замыканий/ Труды 8-го всероссийского студенческого научно-технического семинара «ЭНЕРГЕТИКА: ЭКОЛОГИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ», ТГУ, Томск, 20-22 апреля, 2006.