

Аннотация

*В статье описан опыт реализации стационарной системы мониторинга и диагностирования технического состояния линии электропередач под рабочим напряжением 110 кВ. Приведены описания исследований, предшествовавших разработке системы: параметры частичных разрядов в изоляции ЛЭП и методы их регистрации. Описана аппаратная и программная реализация диагностической системы. Статья может быть полезна персоналу, осуществляющему эксплуатацию, обслуживание, диагностику, техническое управление электрическими сетями; инженерам и научным работникам, интересующимся технической диагностикой высоковольтного оборудования. Ключевые слова: линии электропередач, электрические подстанции, техническая диагностика, частичные разряды, управление техническим состоянием.*

ANNOTATION

*This research describes the experience of implementation the stationary diagnostics system that allows on-line controlling technical condition of high-voltage line 110 kV. It reported about studies that anteceded implementation of system: partial discharge parameter in the isolation and practices of its registration. Authors described instrumental and software realization. This research can be useful both for the specialists that exploit, maintain, detect, technical management of electrical services and for engineers that are interested in technical diagnosis of high-voltage equipments.*

Дата поступления в редакцию — 05.04.2011

## Диагностика состояния изоляции ЛЭП 110 кВ под рабочим напряжением

**М. И. Фурсанов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические системы», БНТУ  
**Ю. Л. Богатырёв**, директор НПФ «ДАТОС ЛТД», Киев  
**П. В. Криксин**, инженер СЗАО «Таврида Электрикс БП», Минск

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) — основное звено в процессе передачи электрической энергии потребителю. Управление техническим состоянием ЛЭП, как и другого высоковольтного оборудования, является важной задачей, решение которой позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей, минимизировать затраты на обслуживание и ремонт и эффективно управлять ими. Это управление представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий, включающий: контроль текущего состояния, диагностирование наличия дефектов, прогноз развития выявленных дефектов, определение параметров интенсивности потока отказов, учёт затрат на техническое обслуживание, ремонт, замену изношенных и вышедших из строя элементов и др.

Необходимым условием внедрения системы управления техническим состоянием является наличие полной и актуальной информации о текущих параметрах ЛЭП. Такая информация

может быть получена при помощи средств технической диагностики, среди форм которой наиболее актуально и перспективно направление по автоматической диагностике, позволяющей контролировать состояние оборудования в процессе его работы без вывода в ремонт. Ранее широкому внедрению таких методов мешал ряд технических барьеров, преодолеть которые стало возможным благодаря развитию микроэлектронной техники, методов и алгоритмов технической диагностики, программного обеспечения.

В статье описывается реализация проекта по разработке и внедрению автоматической системы диагностики технического состояния изоляции ЛЭП 110 кВ под рабочим напряжением.

### Описание объекта

Объект мониторинга и диагностирования — воздушная линия (ВЛ) 110 кВ от ПС «Енакиево» к ЦРУ № 3 с отпайкой на пятой опоре к ЦРУ № 4. На рис. 1 и 2 соответственно приведены её принципиальная схема и поопорная раскладка.

Потребитель и поставщик электроэнергии имеют разных владельцев.

На линии применяются опоры типа У110, УС110, «рюмка», У220, ПС220.

На опорах установлены гирлянды изоляторов следующих типов: поддерживающие — ЛК-70-110-7 и ЛК-70-150-7; натяжные — ЛК-120-150-7, ЛК-70-150-7, ПФ-11.

Типы проводов: АСО-300, АС 185/29.

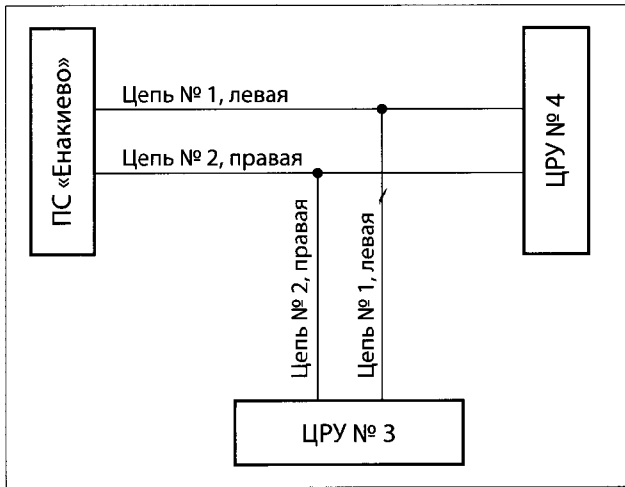


Рис. 1. Принципиальная схема ВЛ

**Постановка задачи**

ВЛ 110 кВ от ПС «Енакиево» питает крупный химический завод, выбросы производства которого оседают на изоляторах, что приводит к их внезапному пробое. В результате недопоставок энергии поставщик терпит крупные убытки. Для предупреждения внезапных отключений по причине повреждения изоляторов ВЛ была поставлена задача разработать автоматическую систему диагностики, позволяющую:

- ♦ определять состояние изоляторов ЛЭП по каждой фазе под рабочим напряжением с точностью до опоры и постановкой диагноза по градации: «Норма», «Предаварийное состояние», «Авария»;
- ♦ регистрировать наличие коротких замыканий в линии, определяя место аварии с точностью до опоры;
- ♦ регистрировать удары молнии, определяя место с точностью до опоры.

**Методики решения поставленной задачи**

В настоящее время наиболее прогрессивным методом, применяемым для диагностики состояния ЛЭП, является регистрация или измерение параметров частичных разрядов (ЧР). Наличие ЧР — первый признак дефекта в изоляции. Их анализ позволяет выявить и локализовать место с ухудшающимися параметрами. С другой стороны, ЧР являются не только диагностическим признаком, но и причиной ещё большего ухудшения состояния изоляции. В конечном итоге их воздействие приводит к её пробое.

Один из способов представления сигналов ЧР изображён на рис. 3: по оси ординат (Y) — амплитуда импульса; по оси абсцисс (X) — фаза питающей сети. Характерной особенностью ЧР является то, что они появляются на полуволнах переменного напряжения.

ЧР представляют собой скользящий (поверхностный) разряд или пробой отдельных зон или

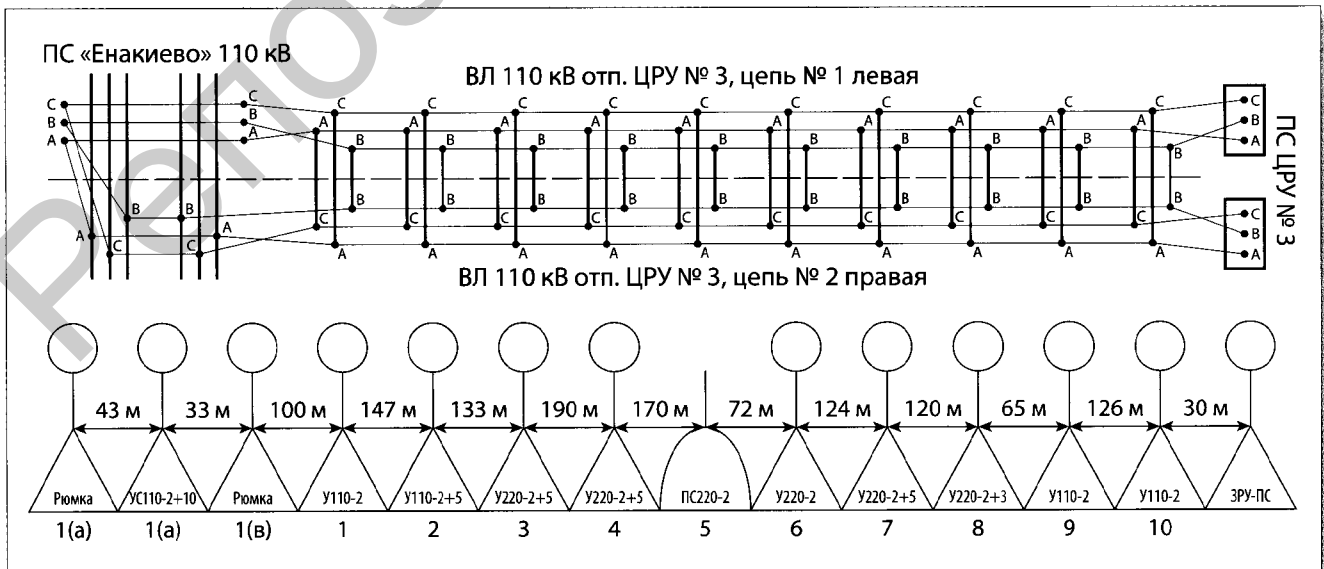


Рис. 2. Поопорная раскладка ВЛ

элементов изоляции. Они возникают в оборудовании любого вида: проводах, изоляторах, высоковольтных вводах. Однако действие ЧР не одинаково для изоляции различного типа. Особо опасны они для органической изоляции, которая при этом интенсивно разрушается и в конечном итоге выходит из строя.

ЧР имеют различные виды проявлений. Их энергия может преобразовываться в:

- ♦ оптическое излучение;
- ♦ тепловое излучение;
- ♦ ударную волну;
- ♦ радиоизлучение;
- ♦ электрический сигнал.

Перечисленные проявления ЧР могут быть использованы в качестве диагностического признака. Вместе с тем проведённый нами анализ существующих методов регистрации ЧР показал, что в рамках поставленной задачи наиболее эффективно рассматривать только два из перечисленных проявлений: оптическое излучение и электрический сигнал. Остальные признаки обладают малой диагностической ценностью: энергия ударной волны, проявляющаяся в виде ультразвукового сигнала в частотном диапазоне от 70 до 300 кГц, позволяет определить только место возникновения ЧР без их градации по количественным признакам; регистрация радиоизлучения требует наличия специальных дорогостоящих антенн; тепловое проявление мало для его успешного выявления [1].

Локация и анализ ЧР по оптическим признакам широко применяется для дистанционного контроля технического состояния ЛЭП. Наиболее информативен оптический спектр в ультрафиолетовом диапазоне, исследования которого позволяют определить повреждения изоляции в глубине пазов изоляторов без прямого доступа к ним. Излучения в ультрафиолетовом спектре связаны с выбросом ионизированного газа из области разряда в зону наблюдений и последующей рекомбинацией молекул [2]. Описанный метод реализован в приборах «Филин-6», широко применяемых в передвижных лабораториях железных дорог для диагностики состояния подвесной изоляции. Анализ опыта применения этого прибора свидетельствует о том, что получаемая им информация не отражает количественных характе-

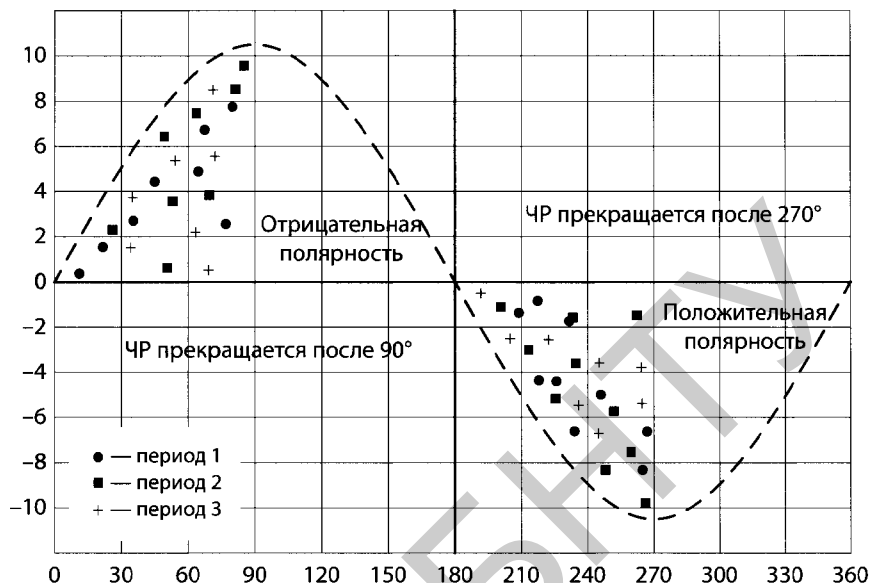


Рис. 3. Распределение ЧР на амплитудно-фазовой плоскости

ристик дефектов изоляции. Возможна только качественная оценка: «меньше», «больше», на основании которой могут быть сделаны выводы типа «требуется замена» или «эксплуатация допустима».

В нашем случае стояла более широкая задача: создать автоматический диагностический процессор, который бы позволил оперативному персоналу получить однозначный ответ о наличии дефекта и степени его развития. Это было необходимо для постановки чёткого диагноза, который должен отражать, в каком состоянии находится изолятор, необходим ли повышенный контроль над ним или, возможно, необходима его срочная замена. При этом локация места возникновения дефекта должна быть проведена с точностью до одной опоры. В итоге для решения поставленной задачи самым эффективным методом исследования ЧР оказалась регистрация электрических сигналов.

Следующий вопрос, который предстояло решить, — найти подходящий датчик для измерения сигнала ЧР, выдерживающий рабочее напряжение линии 110 кВ. Разработаны и выпускаются фирмами IRIS (Канада) и «ДИМРУС» (Россия) датчики для работы под напряжением до 30 кВ. В нашем случае их применение невозможно из-за низкого класса напряжения. Так как прямое измерение электрического сигнала от ЧР в линии 110 кВ практически трудно реализуемо, было принято искать решения путём съёма информации со вторичных устройств. Для этих целей мы применили потенциальный выход для ПИН на вводах трансформатора, куда был установлен датчик со

встроенным высокочастотным трансформатором тока. Такое решение значительно упростило ситуацию и позволило применить измерительное устройство с максимальным напряжением 80 В.

Принципиальная схема подключения датчика к ПИН-вводу и принципиальная схема самого датчика приведены на рис. 4 и 5.

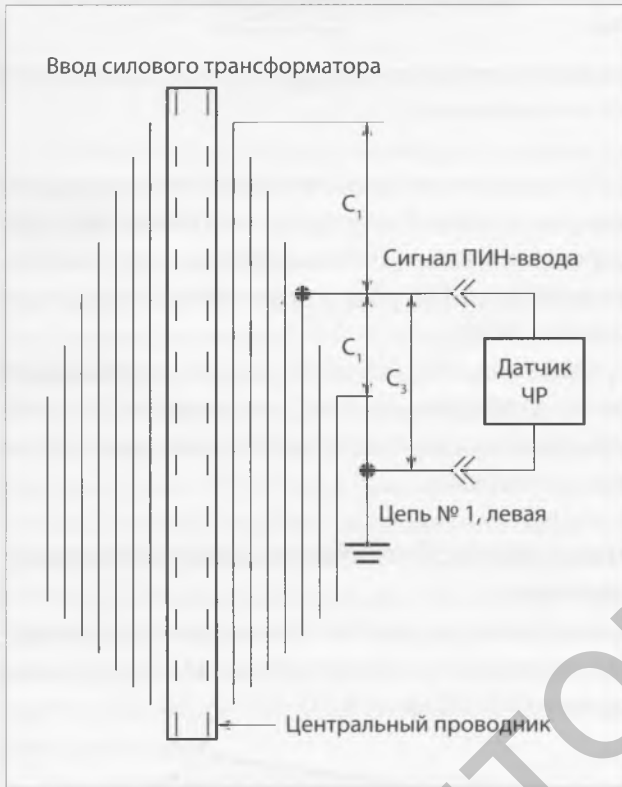


Рис. 4. Принципиальная схема подключения датчика

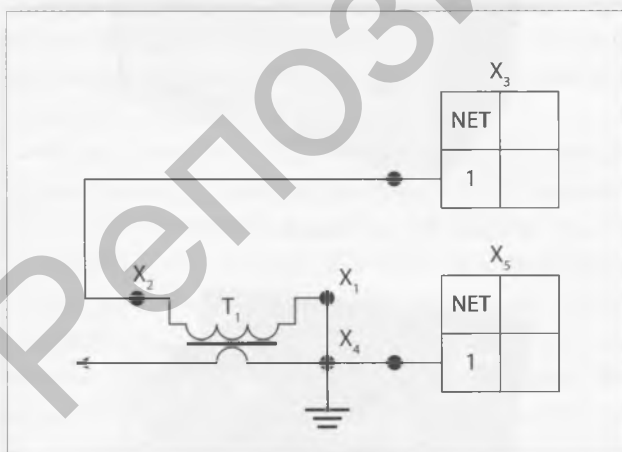


Рис. 5. Принципиальная схема датчика

Датчик ДВ-2 фирмы «ДИМРУС», установленный на ПИН-ввод силового трансформатора 110/35 кВ мощностью 63 МВА, показан на рис. 6 (тип ввода — ГТТББ-60-110/800).



Рис. 6. Датчик ДВ-2, установленный на ввод

Установка датчиков на ПИН-ввод позволила решить проблему измерения электрического сигнала от ЧР. Между тем необходимо разобраться с вопросом, что за сигнал в итоге мы измеряем: регистрируем ЧР, помехи или нечто другое. Прежде всего отметим, что в настоящее время непосредственное измерение ЧР в изоляции по ряду причин невозможно. ЧР определяют по так называемому кажущемуся заряду, каковым является абсолютное значение заряда, который, будучи мгновенно введён между выводами объекта, вызовет такое же кратковременное изменение напряжения на объекте, как и ЧР в нём [3]. Иными словами, фактически измеряется не сам ЧР, а то изменение напряжения в линии, которое он обуславливает.

Достоверное измерение электрического сигнала от ЧР в условиях действующего объекта потребовало применения эффективных средств отстройки от помех. Для этих целей были применены устройства с несколькими видами селекции сигнала: амплитудной, частотной, временной (фазовой). Кроме того, хорошая помехозащищённость обеспечивалась за счёт применения балансной схемы измерения [4].

Следующая задача, которую пришлось решать в процессе создания диагностической системы, — локация места повреждения. Физическая координата возникновения ЧР в воздушной линии определяется исходя из скорости распространения электрического сигнала по проводам. Время поступления сигнала и его параметры фиксируются регистраторами, расположенными по обоим концам линии. На основании этих данных по разности времён прибытия сигнала к регистраторам устанавливается место возникновения ЧР. Схема локации места возникновения ЧР приведена на рис. 7.

Рассмотрим, как работает эта схема. Допустим, что первый регистратор зафиксировал

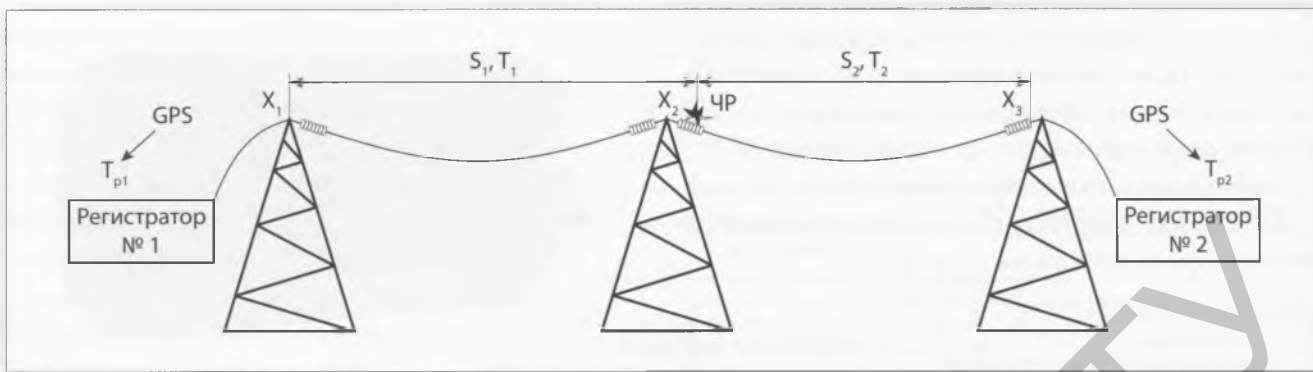


Рис. 7. Схема локации места возникновения ЧР

время поступления сигнала от ЧР —  $T_{p1}$ , а второй —  $T_{p2}$ . Разность времени фиксации сигнала регистраторами —  $\Delta T = T_{p1} - T_{p2} = T_1 - T_2 = 529$  нс. Расстояние между регистраторами —  $S = 2$  км.

Сигнал от места дефекта (координата  $x_2$ ) распространяется к регистратору № 1 (координата  $x_1$ ) за время  $T_1$  и к регистратору № 2 (координата  $x_3$ ) за время  $T_2$ , проходя при этом расстояния  $S_1$  и  $S_2$  соответственно со скоростью  $v = 2,88 \cdot 10^8$  м/с.

При этом будут выполняться следующие соотношения:

$$T_1 = S_1 / v = (x_2 - x_1) / v;$$

$$T_2 = S_2 / v = (x_3 - x_2) / v.$$

Разность времени поступления сигнала к регистраторам ( $\Delta T$ ) (рис. 8) составит:

$$T_1 - T_2 = \Delta T = (2x_2 - (x_1 + x_3)) / v.$$

Если координату  $x_1$  принять за начало системы отсчета, то  $x_3 = S$ . В итоге получим:

$$x_2 = 0,5 ((\Delta T \cdot v) + S).$$

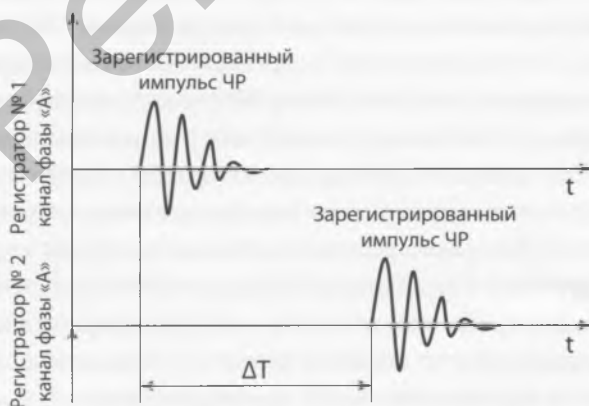


Рис. 8. Регистрация импульса ЧР

В таком случае при принятых исходных данных расстояние от первого регистратора до точки дефекта составит 1076 м ( $\pm 20$  м — при синхронизации по GPS,  $\pm 2$  м — при синхронизации по оптоволокну).

Отметим, что для определения номера опоры необходимо знать точные длины проводов с учётом провисания, а не строительные расстояния между опорами.

### Аппаратное обеспечение диагностической системы

Для реализации поставленных задач был применён специально разработанный для таких целей прибор OVM-3 (рис. 9, 10, 11).



Рис. 9



Рис. 10



Рис. 11

Прибор OVM-3 предназначен для диагностирования технического состояния изоляции трёх фаз кабельных или воздушных линий под рабочим напряжением. Количество устанавливаемых приборов зависит от конфигурации сети, наличия отпаек, источников и приёмников энергии. В нашем случае понадобилось три таких прибора, установленных на каждом конце ЛЭП.

Одновременность измерения времени прибытия импульсов ЧР, то есть одновременность срабатывания цепей измерения на аналого-цифровом преобразователе (АЦП) прибора, осуществляется посредством синхронизации по каналам GPS. Прибор сам определяет количество спутников, находящихся в зоне доступа антенны GPS, выявляет наиболее мощные сигналы и проводит синхронизацию.

Для отстройки от помех и измерения именно импульсов ЧР, а не помех, необходима привязка к питающей фазе (рис. 3). Для этих целей в приборе предусмотрен специальный разъём, на который подключено напряжение от соответствующей фазы трансформатора собственных нужд подстанции.

Выходные сигналы от ПИН-ввода каждой фазы силового трансформатора 110 кВ заводятся на соответствующий входной разъём прибора по ВЧ-кабелю типа RG-58 A/U с волновым сопротивлением 50 Ом. При прокладке кабеля предъявлялись особые требования к его длине, разность которой до других фаз не должна превышать  $\pm 10$  см. Такая точность необходима для исключения задержек по времени «прихода» импульсов ЧР от разных фаз в прибор.

### Технические характеристики прибора

Основные технические характеристики прибора OVM-3 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики прибора OVM-3

Технический параметр	Значение
Количество измерительных каналов	3
Рабочее напряжение контролируемых кабельных линий	от 3 кВ и выше
Частотный диапазон регистрируемых импульсов	1–10,0 МГц
Динамический диапазон входных сигналов	70 dB
Диапазон измерения температуры	от –50 до +150 °С
Диапазон измерения относительной влажности воздуха	0–100 %
Интерфейс связи прибора с компьютером	USB, Ethernet
Объём памяти для хранения архива выполненных измерений	256 Мб
Напряжение питания	120–260 В, 50/60 Гц
Срок эксплуатации	не менее 10 лет
Габаритные размеры	220x130x120 мм
Вес (без гермошкафа)	1200 г
Диапазон рабочих температур	от –40 до +60 °С

### Калибровка измерительных каналов приборов

Для расчёта передаточных коэффициентов (пК / В) и затухания сигнала ЧР в ВЛ необходимо откалибровать каналы измерения кажущегося заряда. Для этих целей проводилось инжектирование тестового заряда в линию. Схема калибровки состоит из трёх приборов OVM-3 (на каждый конец линии), калибровочного генератора GKI-3 и проводов ВЛ. Принципиальная схема калибровки показана на рис. 12.

Схема калибровки выбиралась с таким расчётом, чтобы минимизировать затухание инжектируемого в линию сигнала при его прохождении по земле между территориально разнесенными объектами измерения (силовыми трансформаторами). Для этого в качестве «общего провода заземления» использовалась одна из фаз (на рис. 12 — фаза «С»). Всего в процессе калибровки было проведено 12 измерений: 6 с одной стороны линии (ПС «Енакиево» – «ЦРУ №3», «ЦРУ №4»), 3 с другой («ЦРУ №3» – ПС «Енакиево») и 3 с третьей («ЦРУ №4» – ПС «Енакиево»).

Общий вид калибровочного генератора GKI-3 показан на рис. 13.

Процесс калибровки каналов генератором GKI-3 на объекте представлен на рис. 14.

Технические характеристики генератора GKI-3 приведены в таблице 2.

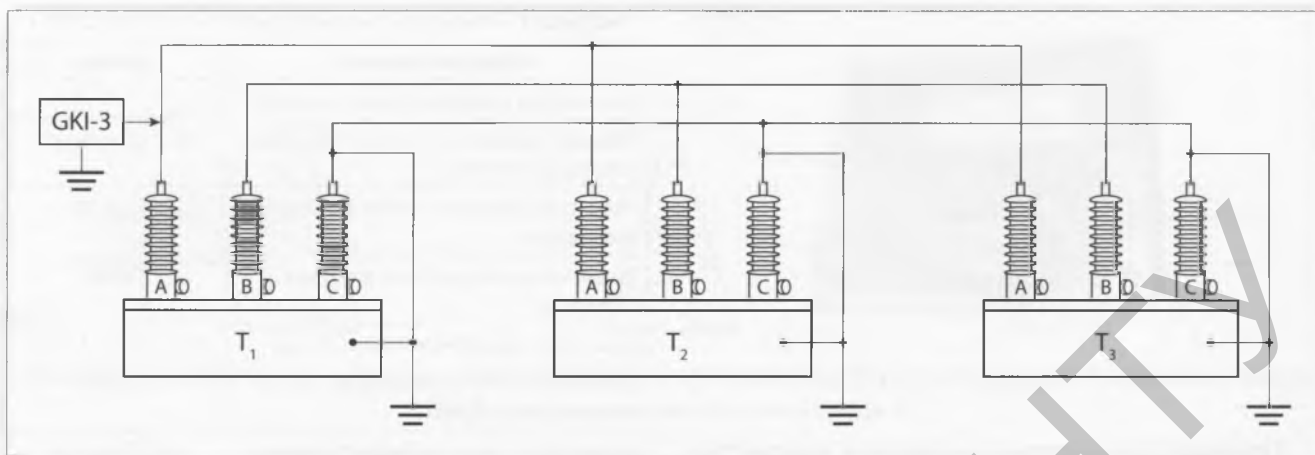


Рис. 12. Схема калибровки

Таблица 2. Технические характеристики генератора GKI-3

Генерация прямоугольных импульсов	
Длительность положительного импульса	100/30±0,3 мкс
Амплитуда импульсов	100/200/400 В ±5 %
Сквозность импульсов	2/10
Длительность фронтов импульсов	≤ 20 нс
Мощность, отдаваемая в нагрузку	не менее 2 В·А
Инжекция фиксированного заряда	
Частота следования импульсов	2,4 кГц
Инjectируемый заряд	40/80/160 нКл
Нарастающий фронт импульса	≤ 10/15/30 нс
Длительность импульса	≤ 60/70/120 нс
Интерфейс управления	
Стандарт	RS-232 (DCE)
Разъём	DB9 (розетка)
Формат и скорость данных	9600 бит/с; 8 бит данных, 1 стоповый, контроля чётности нет
Питание	
Автономное питание	Свинцово-кислотный необслуживаемый аккумулятор 12 В; 1,2 А·ч
Время непрерывной работы прибора от аккумуляторов при максимальной нагрузке	около 1,5* ч
Питание от сети переменного напряжения	100–240 В, 40–440 Гц
Время полной зарядки аккумуляторов	около 12 ч
Габаритные размеры, не более	148x108x75 мм
Масса	не более 1,5 кг



Рис. 13. Калибровочный генератор GKI-3

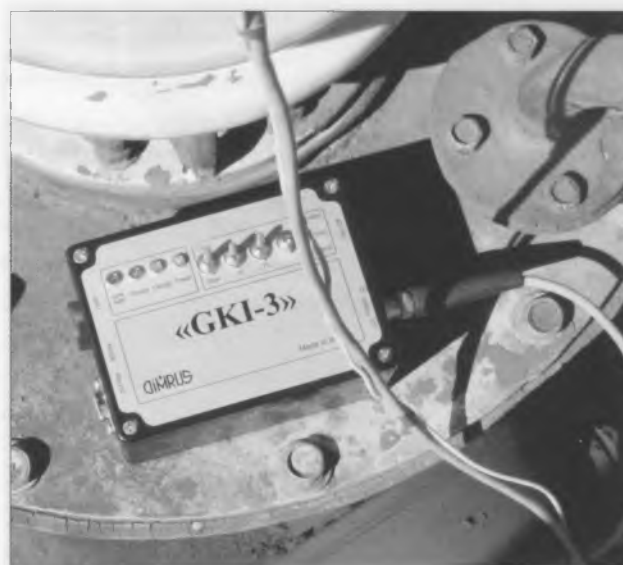


Рис. 14. Процесс калибровки каналов генератором GKI-3

\* При генерации импульсов 100 мкс со сквозностью 2.

### Организация локальной сети

Для организации оперативного мониторинга технического состояния ЛЭП (получение и анализ данных в течение 5–10 мин) приборы, находящиеся на разных сторонах линии, были связаны единой локальной сетью. Передаваемые по ней данные скачиваются с приборов и поступают на управляющий компьютер в единую систему управления базами данных (СУБД). Данные с приборов запрашиваются с управляющего компьютера посредством специального программного обеспечения, поддерживающего несколько видов связи типа «точка–точка».

При решении задачи объединения приборов в единую локальную сеть было рассмотрено и проверено несколько видов связи. На самом объекте кроме телефонной линии никакой иной связи не было, поэтому в результате была выбрана технология WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access — телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях — до 5 км от рабочих станций, основанная на стандарте IEEE 802.16).

Технологически локальная сеть представляла собой направленные приёмо-передающие антенны, установленные на крыше зданий ПС «Енакиево», ЦРУ № 3 и ЦРУ № 4. Антенна была подключена к модему, реализующему технологию WiMAX. Модем через обычный разъём RJ-45 посредством канала Ethernet (100 МБ/с) подключался к компьютеру рабочей станции. Тестирование канала показало удовлетворительные результаты при перекачке файлов замеров объёмом 200 кБ. Время перекачки данных с двух приборов при этом занимало не более 5–8 мин.

Организация локальной сети позволила предоставить инженерному персоналу удалённый доступ к системе, благодаря чему процесс мониторинга и диагностирования может наблюдаться на персональных компьютерах, включённых в корпоративную сеть предприятия. Проблема назначения IP-адресов для приборов, маски сети и т. п. решалась администратором корпоративной сети предприятия в штатном режиме.

### Сбор, обработка и отображение информации

В системе предусмотрено два режима работы: мониторинг и измерение уровня ЧР.

В режиме мониторинга чувствительность входных цепей существенно занижается и ведётся по-

стоянное наблюдение за контролируемым объектом на предмет возникновения импульсов большой мощности (грозовых, коммутационных и т. п.).

В режиме измерения ЧР чувствительность входных цепей повышается и регистрация производится согласно заданному пользователем расписанию.

На рис. 15 показано разработанное совместно со специалистами заказчика функциональное главное окно интерфейса пользователя системы мониторинга и диагностирования технического состояния изоляторов ЛЭП.

В главном окне интерфейса пользователя отображается схема расположения ЛЭП с лампочками-индикаторами, которые цветом и миганием показывают состояние изоляторов на опоре по каждой фазе. Слева расположено окно погодных условий. Данные берутся от датчиков температуры и влажности, подключённых к приборам OVM. Ниже — окно событий, показывающее зарегистрированное аварийное состояние или сильное загрязнение изоляторов конкретной опоры и фазы. Внизу слева находятся информационные окна, в которых приводится обозначение используемых на схеме цветов и описываются функциональные возможности кнопок управления.

Пользователь системы может кликнуть на лампочку-индикатор состояния изоляторов, и программа покажет развитие событий (архив) по конкретному изолятору и фазе, зарегистрированные уровни мощности и интенсивности ЧР. На рис. 16 представлен тренд интенсивности ЧР. При достижении величины ЧР предельного уровня (горизонтальная линия на уровне 500 имп/с) срабатывает сигнал аварии.

Программа также позволяет пользователю знать, сколько времени у него есть в запасе, чтобы предпринять упреждающие действия до аварии (вызвать бригаду, перевести нагрузку на другую линию). Это можно сделать, расширив зону развития дефекта до уровня минут на оси абсцисс графиков (рис. 17).

### Заключение

В статье описан уникальный опыт внедрения стационарной системы контроля технического состояния изоляторов ЛЭП 110 кВ. В процессе работы над системой была апробирована методика регистрации кажущегося заряда, возникающего при поверхностном ЧР в полимерных изоляторах. Для них опытным путём определены характеристики — интенсивность и мощность. Проведено обучение



персонала. Для дальнейшего совершенствования алгоритмов системы необходимо собрать и обработать опытную информацию о частичных разрядах в процессе эксплуатации: в летний и осенний период в условиях повышенной влажности и температуры, а также при различных режимах работы металлургического предприятия: плавка и сопутствующие ей выбросы металлургической пыли.

Описанная система диагностики позволяет в максимально автоматизированном режиме получать данные о состоянии изоляции ВЛ 110 кВ без её вывода в ремонт, а также перейти от ремонтов по факту аварии или по регламенту к техническому обслуживанию по фактическому состоянию.

Минимизация затрат на техническое обслуживание, своевременный вывод линии в ремонт и, как следствие, отсутствие исковых заявлений от потребителя электроэнергии обеспечивают быструю окупаемость вложенных в создание системы средств.

Помимо очевидной денежной выгоды важным фактором в пользу внедрения системы является повышение уровня безопасности за счёт предупреждения аварийных ситуаций и моральное спокойствие оперативного персонала, отвечающего за бесперебойность электроснабжения по ЛЭП.

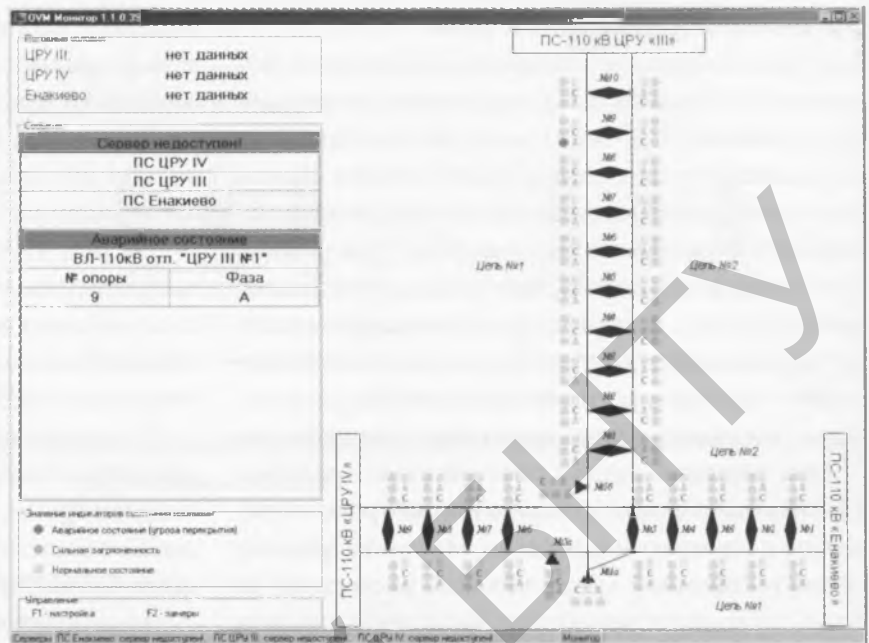


Рис. 15. Главное окно интерфейса пользователя

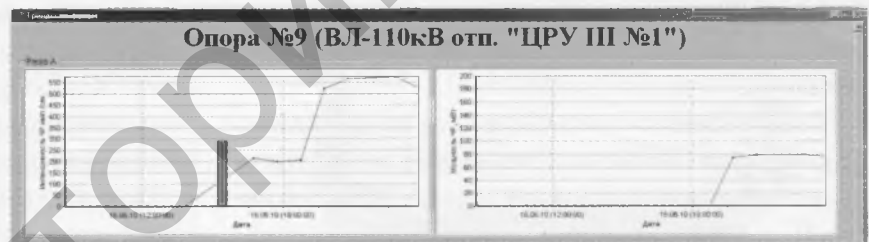


Рис. 16. Срабатывание аварии по уставке «Интенсивность ЧР»

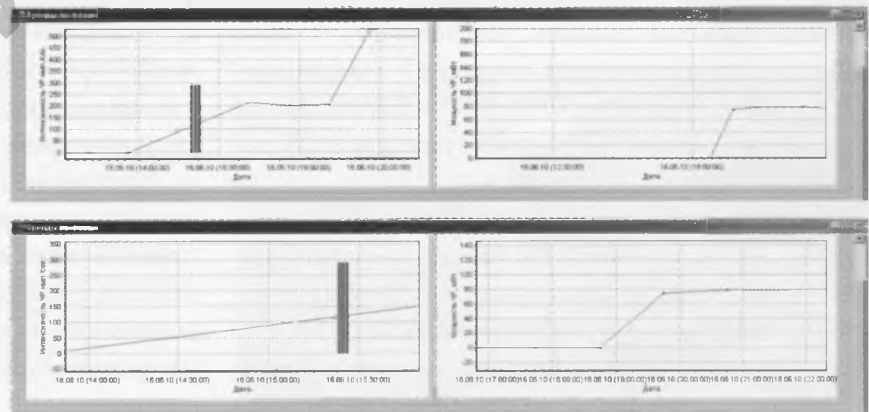


Рис. 17. Определение времени развития дефекта

**Литература**

1. Овчинников Ю. И. Методы и средства регистрации акустических сигналов частичных разрядов: Семинар по диагностике высоковольтного оборудования. — Пермь: НВП «ВиброЦентр», 2010.
2. Завидей В. И. и другие. Дистанционные методы и системы дефектоскопии высоковольтной изоляции электрооборудования по оптическому излучению // Электр. — 2008. — № 3.

3. СвиП. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Живодерников С. В. Разработка методики и аппаратуры регистрации частичных разрядов в электрооборудовании под рабочим напряжением: Дис. на соискание степени канд. техн. наук. — Новосибирск: СибНИИ энергетике, 2004.