

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 110 КВ

Егорова Надежда Геннадьевна, студент, КГЭУ, 420066, Россия, г.Казань, ул.Красносельская, 51, email: Nadyaegorova1997@mail.ru

Кузьмин Игорь Леонидович, к.т.н., доц., КГЭУ, 420066, Россия, г.Казань, ул.Красносельская, 51, email: to_kigor@list.ru

Хузяшев Рустэм Газизович, к.ф.-м.н., доц. КГЭУ, 420066, Россия, г.Казань, ул.Красносельская, 51, email: 142892@mail.ru

Аннотация. В статье приведены осциллограммы сигналов переходного процесса, порожденные коммутационными процессами, одновременно зарегистрированные по обоим сторонам кабельной линии электропередач 110 кВ длиной 11 км. Формы осциллограмм сигналов ярко демонстрируют механизм дисперсии. Он проявляется в ослаблении амплитуды сигнала, увеличении длительности переднего фронта и увеличении общей длительности по мере распространения сигналов вдоль кабельной линии.

В данной работе показано, что разработанный программно-аппаратный комплекс помимо задачи определения места повреждения, позволяет регистрировать место, количество и энергию частичных разрядов, что позволяет охарактеризовать состояние высоковольтной изоляции электрооборудования. Актуальность данной работы заключается в том, что результаты анализа осциллограмм показывают реальную возможность разграничить аварийные и неаварийные сигналы, чтобы довести сведения диспетчерам только об аварийных сигналах.

Ключевые слова: сигнал переходного процесса, определение места повреждения, аналогово-цифровой преобразователь, энергия сигнала, частичные разряды

EXPERIMENTAL RESULTS OF THE WAVE DETERMINATION OF THE DAMAGE PLACE IN A 110 KV CABLE LINE

Egorova Nadezhda Gennadievna, Stud., KSEU, 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya St., 51, email: Nadyaegorova1997@mail.ru

Kuzmin Igor Leonidovich, candidate of technical sciences, associate professor, KSEU, 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya St., 51, email: to_kigor@list.ru

Khuzyashev Rustem Gazizovich, Ph.D., Assoc. KSEU, 420066, Russia, Kazan, 51 Krasnoselskaya St., email: 142892@mail.ru

Annotation. The article presents the oscillograms of transient signals generated by switching processes, simultaneously recorded on both sides of a 110 kV cable power line 11 km long. Waveform waveforms clearly demonstrate the dispersion mechanism. It manifests itself in a weakening of the signal amplitude, an increase in the duration of the leading edge, and an increase in the total duration as the signals propagate along the cable line.

In this work, it is shown that the developed software and hardware complex, in addition to the problem of determining the location of damage, allows you to register the place, number and energy of partial discharges, which allows you to characterize the state of high-voltage insulation of electrical equipment. The relevance of this work lies in the fact that the results of the analysis of the waveforms show a real opportunity to distinguish between alarm and non-emergency signals in order to bring information to dispatchers only about alarms.

Keywords: transient signal, fault location, analog-to-digital converter, signal energy, partial discharges

1. Введение.

В настоящее время задача определения места повреждения (ОМП) в электрических сетях линейной структуры 110-750кВ решается микропроцессорными регистраторами с дистанционным ОМП по параметрам аварийного режима на промышленной частоте. Средняя точность этого метода достигает 3-5% от длины ЛЭП при одностороннем замере и 1-2% – при двухстороннем [1]. Основным источником погрешности этого метода являются неточность задания параметров линии и погрешность измерения параметров режима.

С целью уменьшения погрешности ОМП в предыдущие десятилетия проводилось большое количество модельных исследований использования сигналов переходного процесса (СПП), рождаемых в месте аварийной коммутации, в целях ОМП. Последнее десятилетие характеризуется практическим внедрением волновых устройств ОМП, использующих регистрацию начала сигнала переходного процесса (СПП) по обоим сторонам линии в единой спутниковой шкале времени [2-4]. Безусловная конкурентоспособность волнового ОМП проявляется при однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях 6(10) кВ с древовидной структурой [5,6]. В настоящее время в этих сетях доминирует использование топографических индикаторов, определяющих участок повреждения [7]. Для достижения сравнимой с волновыми методами точности ОМП топографических индикаторов их количество, а, следовательно, и стоимость, увеличиваются многократно относительно количества датчиков комплекса волнового ОМП. Топографические индикаторы совместно с автоматическими разъединителями хорошо решают проблему уменьшения количества потребителей, электроснабжение которых прерывается на время ликвидации повреждения. Комплекс волнового ОМП решает проблему точного определения места повреждения.

Регистрация СПП с высокой частотой дискретизации до 10МГц поставляет большой объем данных, интеллектуальная обработка которых позволяет определять не только место повреждения, но и причину возникновения СПП, начиная от частичных разрядов и кончая короткими замыканиями и плановыми коммутациями. Разработка интеллектуальных методов обработки данных позволит оперативно доставлять диспетчеру лишь информацию об аварийных событиях, и, после соответствующей обработки, отчеты о состоянии изоляции на разных участках сети. Работа в этом направлении пока находится в зачаточном состоянии, что объясняется сложностью разработки как аппаратного, так и алгоритмического обеспечения волнового ОМП. Развитие этих работ является актуальным направлением, т.к. позволяет существенно улучшить качество информации о состоянии важнейшего объекта электроэнергетики – кабельных и воздушных линий.

2. Результаты опытной эксплуатации комплекса волнового определения места повреждения в кабельной линии 110кВ

В апреле 2019 г на кабельной линии 110кВ «Центральная –Восточная 2 цепь» длиной 11,058км был установлен программно-аппаратный комплекс (ПАК) волнового определения места повреждения (ВОМП) в составе датчика №23, установленного на подстанциях (ПС) Восточная, и датчика №29, установленного на ПС Центральная (рис.1). Оба датчика регистрируют сигналы переходного процесса, рождаемых плановыми и аварийными коммутациями любой природы, с помощью разъемных трансформаторов тока, подключаемых к вторичным цепям штатных измерительных трансформаторов тока двух фаз кабельной линии «А» и «С».



Рис.1 Схема КЛ. ПС Восточная – ПС Центральная.

За время эксплуатации было зарегистрировано семь синхронных событий, одновременно наблюдавшихся на обоих ПС и большое количество одиночных событий, регистрируемых лишь на каждой из сторон линии. Регистрация осциллограмм с высокой частотой дискретизации 1 МГц в глобальной шкале времени позволяет определять место возникновения СПП.

23.04.19 в 19:34 произошло первое синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.2. По оси времени отложены мгновенные отсчеты с временным интервалом 1,085мкс.

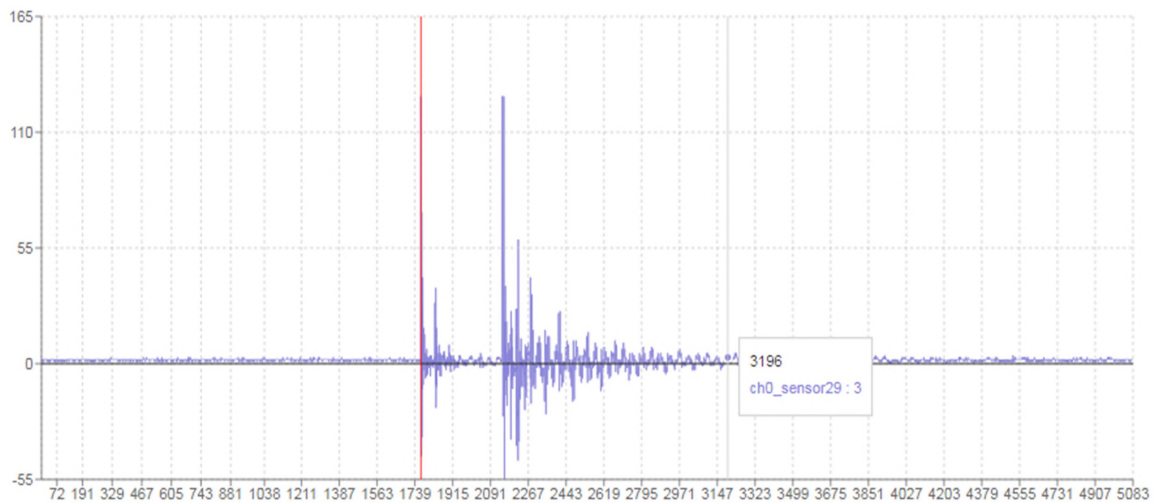


Рис.2а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 23.04.19 в 19:34 на ПС Центральная

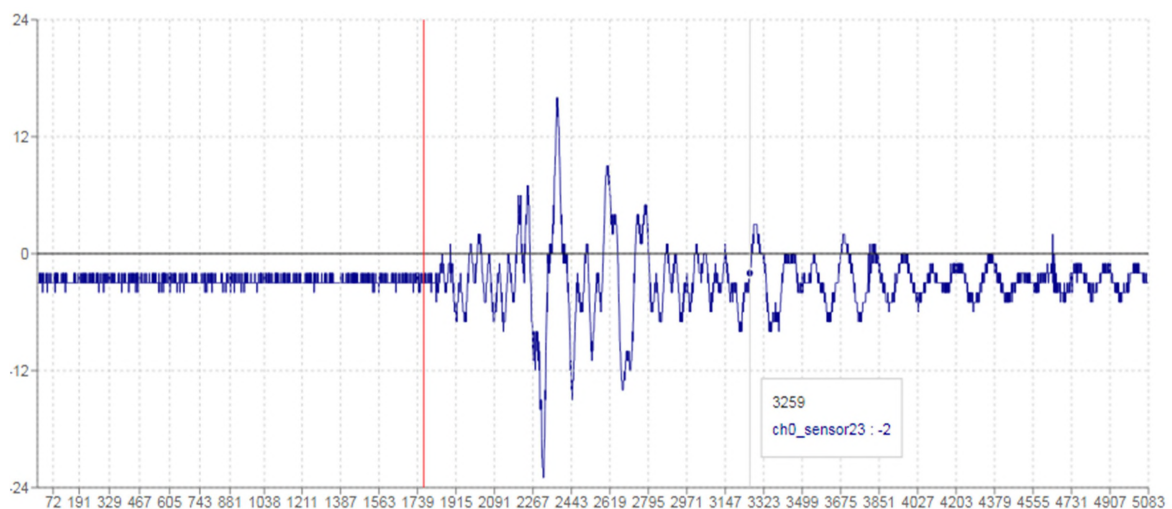


Рис.2б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 23.04.19 в 19:34 на ПС Восточная

СПП на рис.2а обладает более резким началом, большей амплитудой, большей частотой свободных колебаний, и более ранним временем регистрации начала СПП по

сравнению с аналогичным СПП на рис.2б. Все это, но в первую очередь их относительная величина временной задержки начал СПП относительно друг друга в 62,9мкс (на ПС Центральная СПП зафиксирован раньше), замеренная в единой шкале времени, позволяют определить место возникновения СПП, в рассматриваемой системе из двух датчиков, как ПС Центральная или любое другое место электрической сети, соединенной с шинами этой подстанции. Форма СПП, состоящая из нескольких последовательных во времени всплесков, указывает на причину его возникновения – плановая коммутация включения выключателя и сопровождающий этот процесс дребезг контактов. Высокая частота свободных колебаний, зафиксированного на ПС Центральная СПП (рис.2), которая составляет более 500кГц, указывает на шины ПС Центральная как источник этого СПП. На ПС Восточная доминируют свободные колебания с периодом около 150мкс или частотой 6,6кГц.

27.04.19 в 00:23 произошло второе синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.3

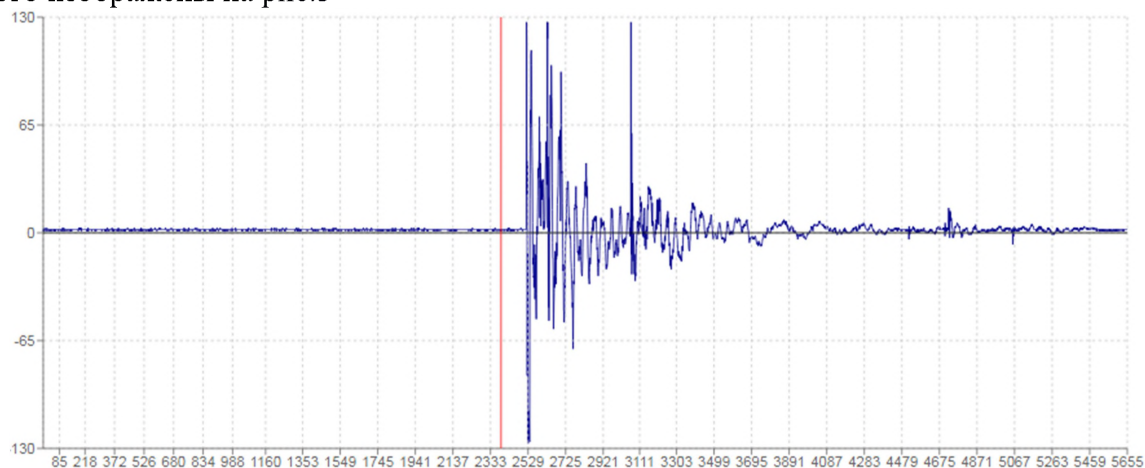


Рис.3а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 27.04.19 в 00:23 на ПС Центральная

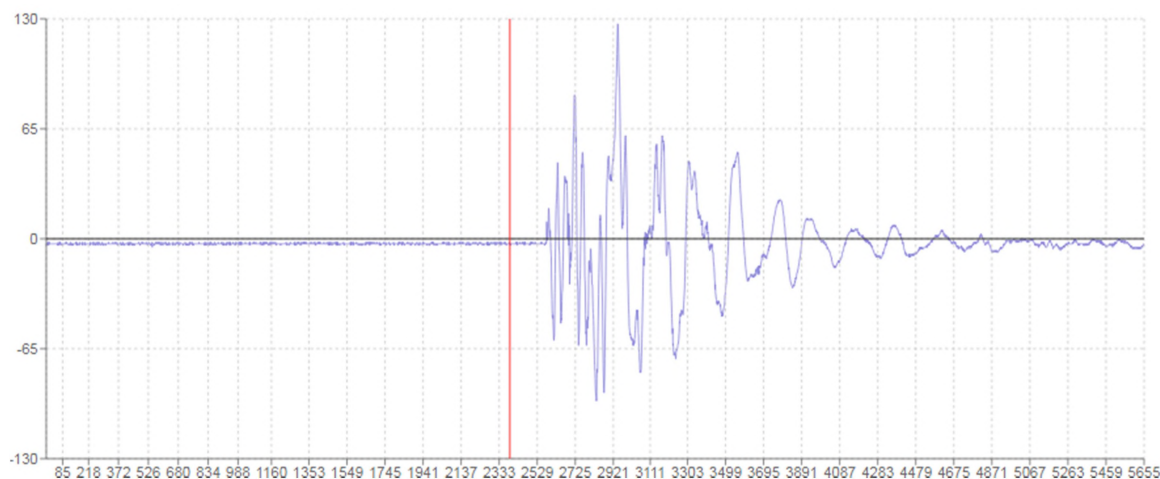


Рис.3б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 27.04.19 в 00:23 на ПС Восточная

Меньшая частота свободных колебаний, зафиксированного на ПС Центральная СПП (рис.3а), которая составляет около 40кГц, указывает на источник этого СПП расположенный далее шины ПС Центральная. Относительная величина временной задержки начал СПП относительно друг друга составляет 60,76мкс (на ПС Центральная СПП зафиксирован раньше). На ПС Восточная доминируют свободные колебания с периодом около 250мкс или частотой 4кГц.

08.05.19 в 16:04 произошло третье синхронное срабатывание, осциллограммы СПП

которого изображены на рис.4. Относительная величина временной задержки начал СПП относительно друг друга составляет 60,76мкс (на ПС Восточная СПП зафиксирован раньше).

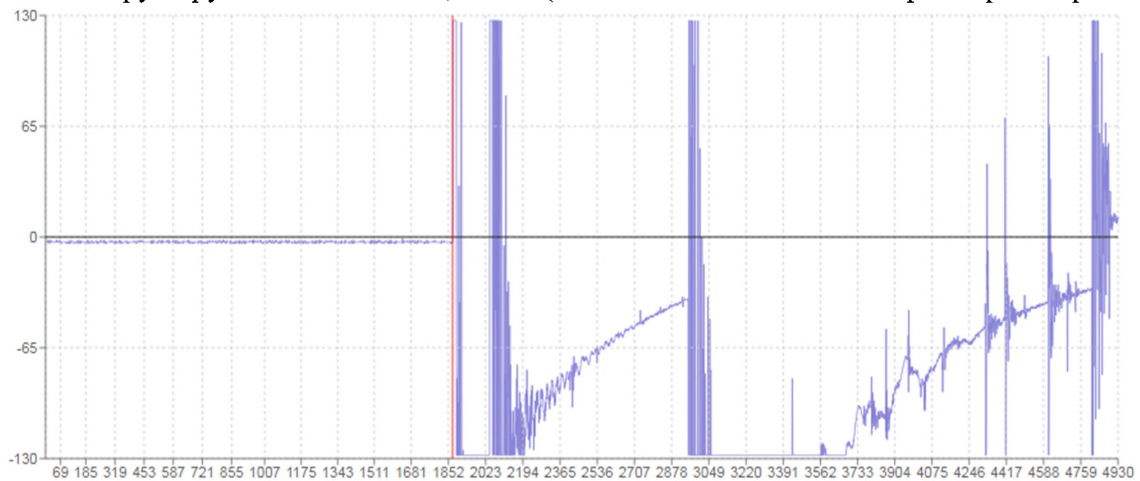


Рис.4а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 08.05.19 в 16:04 на ПС Восточная

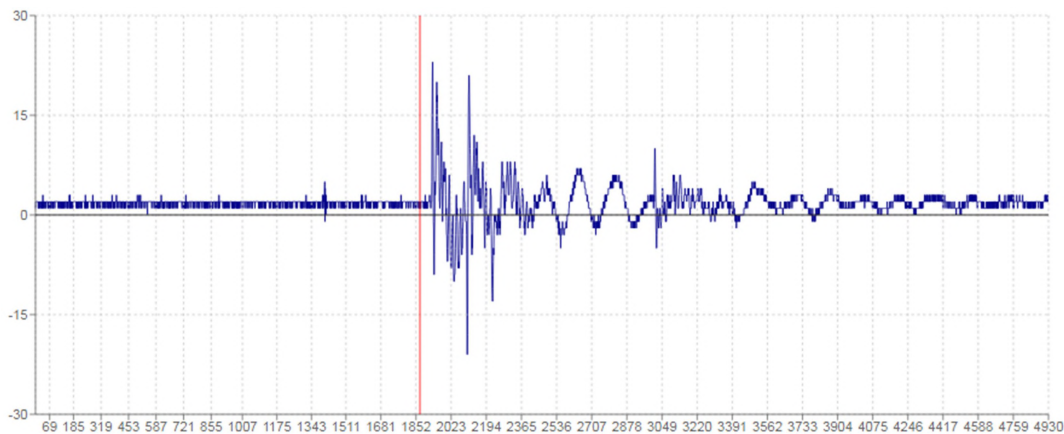


Рис.4б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 08.05.19 в 16:04 на ПС Центральная

Большая величина апериодической составляющей переходного тока и высокая частота свободных колебаний, зафиксированных на ПС Восточная СПП (рис.4), которая составляет более 500кГц, указывает на источник этого СПП расположенный на шинах ПС Восточная. Апериодический характер изменения сигнала ПП с постоянной спада около 0,7мс, что более чем на порядок превышает аналогичную величину сигналов остальных событий, указывает на насыщение трансформатора тока. Частичные разряды на апериодической ветке сигнала ПП, длительностью от единиц до сотен мкс, указывают на негативное воздействие перенапряжения на высоковольтную изоляцию. На ПС Центральная доминируют свободные колебания с периодом около 180мкс или частотой 5,6кГц. Приведенные выше три синхронных события, источником СПП в которых являлась плановая коммутация, позволяют по средней величине времени распространения СПП и длине КЛ определить скорость распространения величиной 179,85м/мкс.

27.07.19 в 23:29 произошло четвертое синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.5.

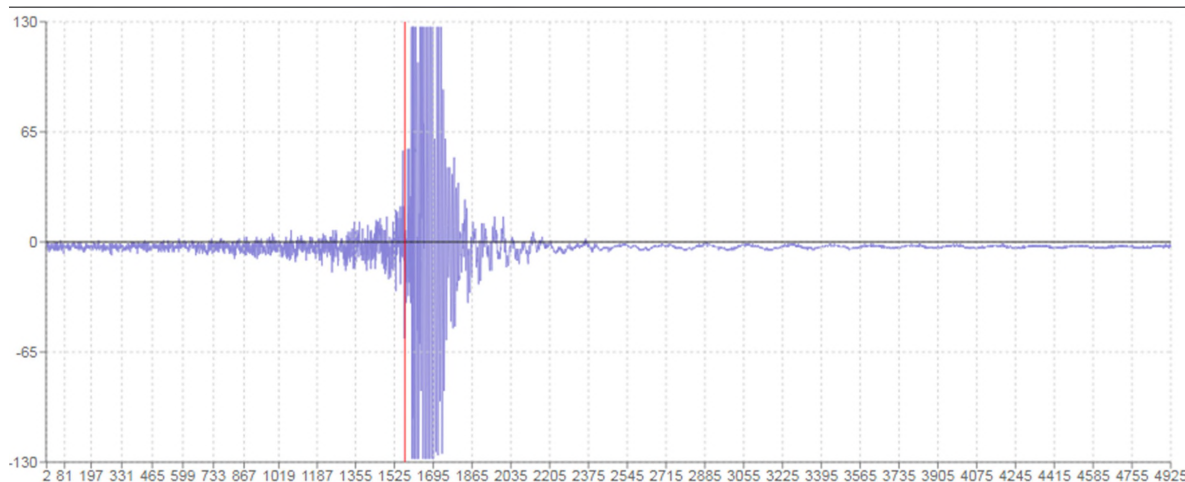


Рис.5а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 27.07.19 в 23:29 на ПК Восточная

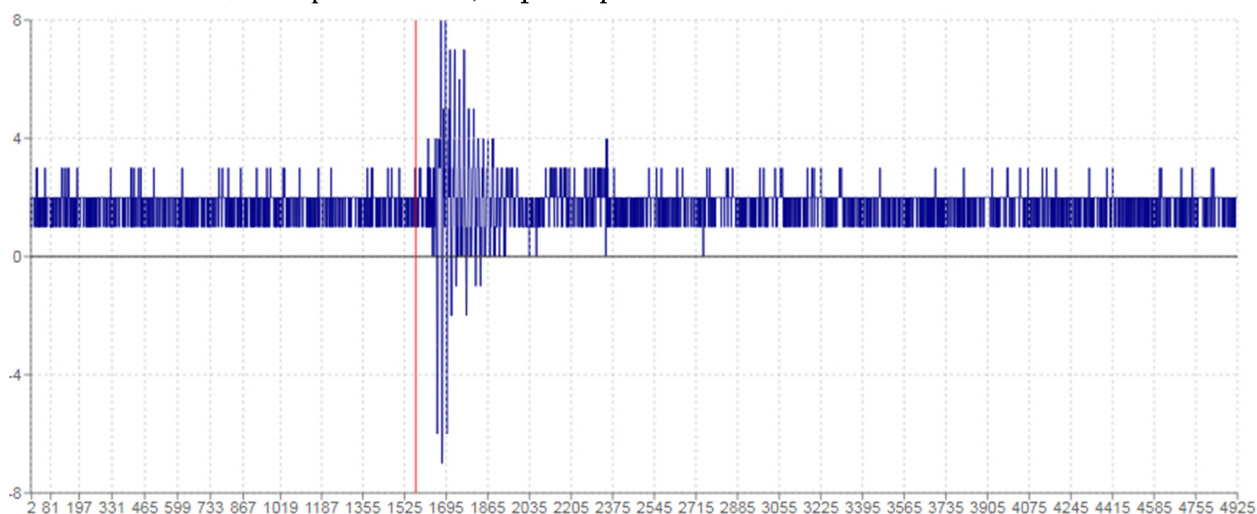


Рис.5б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 27.07.19 в 23:29 на ПК Центральная

Большая амплитуда СПП и высокая частота свободных колебаний, зафиксированного на ПК Восточная СПП (рис.5а), которая составляет около 500кГц, указывает на источник этого СПП расположенный на шинах ПК Восточная. Наличие сигнала предвестника, амплитуда которого монотонно увеличивается и переходит в резкое нарастание, на рис.5а хорошо объясняется моделью развития грозового перенапряжения. Сформировавшаяся, в следствии протекающих атмосферных процессов, большая величина напряженности электрического поля инициирует увеличение количества частичных разрядов в виде стримеров, токи разряда которых создают сигнал помехи в электрической сети. В какой-то момент времени каналы бесчисленных мелких стримеров соединяются в молниевый разряд той или иной интенсивности, что проявляется в резком нарастании амплитуды СПП. После молниевых разряда напряженность электрического поля в атмосфере уменьшается до нормальных значений и помехи от стримеров пропадают. Однако в сети еще долго существуют свободные колебания частотой около 5кГц, вызванные молниевым возмущением. Относительная величина временной задержки начал СПП, замеренная по максимальному приращению амплитуды СПП, относительно друг друга составляет 65,1мкс (на ПК Восточная СПП зафиксирован раньше).

04.10.19 в 19:34 произошло пятое синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.6

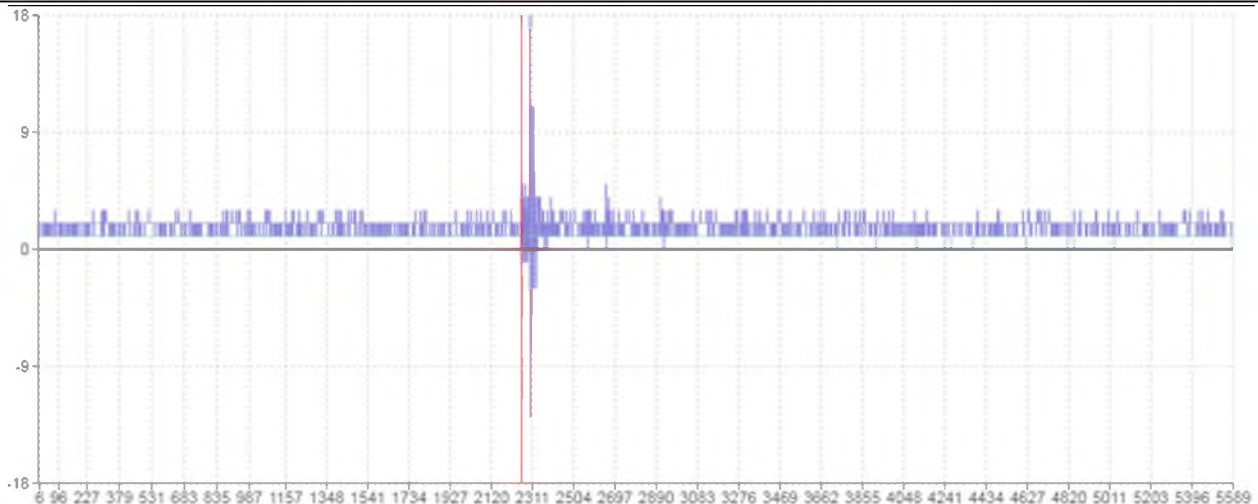


Рис.6а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 04.10.19 в 19:34 на ПС Центральная

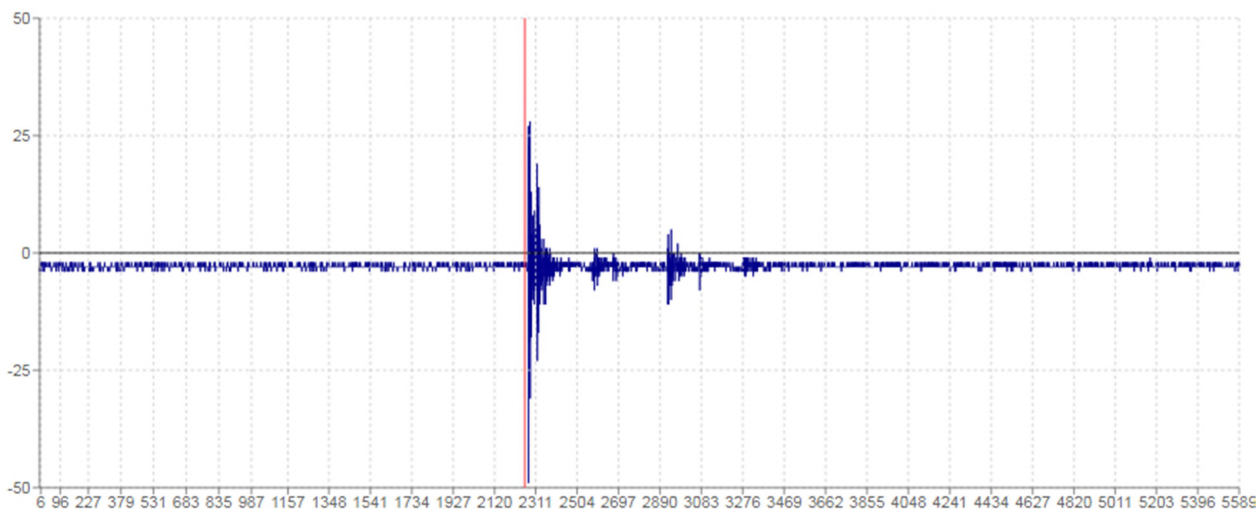


Рис.6б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 04.10.19 в 19:34 на ПС Восточная

Относительно невысокая амплитуда СПП и высокая частота свободных колебаний, зафиксированных на обоих ПС (рис.6), которая составляет около 500кГц, предположительно указывает на источник этого СПП как частичные разряды в дефектной соединительной муфте. На это же указывает и наличие сигнала предвестника, амплитуда которого сперва мала, а затем резко увеличивается. К такому же выводу приводит и наличие СПП лишь на одной из наблюдаемых фаз кабельной линии. Во всех предыдущих случаях, когда источник СПП находился вне кабельной линии, СПП регистрировался в обоих наблюдаемых фазах. Относительная величина временной задержки начал СПП, замеренная с учетом начала сигнала предвестника, 17,4мкс (на ПС Центральная раньше). По определенной ранее скорости распространения СПП $V=179,85\text{м/мкс}$ и длине КЛ $L=11,058\text{км}$ определяем место повреждения относительно ПС Центральная по выражению:

$$X = \frac{L}{2} - v \cdot \frac{\Delta T}{2} = \frac{11,058}{2} - 0,17985 \cdot \frac{17,4}{2} = 3,96\text{км}$$

Место повреждения относительно ПС Восточная:

$$X = \frac{L}{2} + v \cdot \frac{\Delta T}{2} = \frac{11,058}{2} + 0,17985 \cdot \frac{17,4}{2} = 7,97\text{км}$$

Таким образом, с погрешностью в 170м, ОМП указывает на частичные разряды в муфте-тройнике.

06.02.20 в 19:48 произошло шестое синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.7.б.

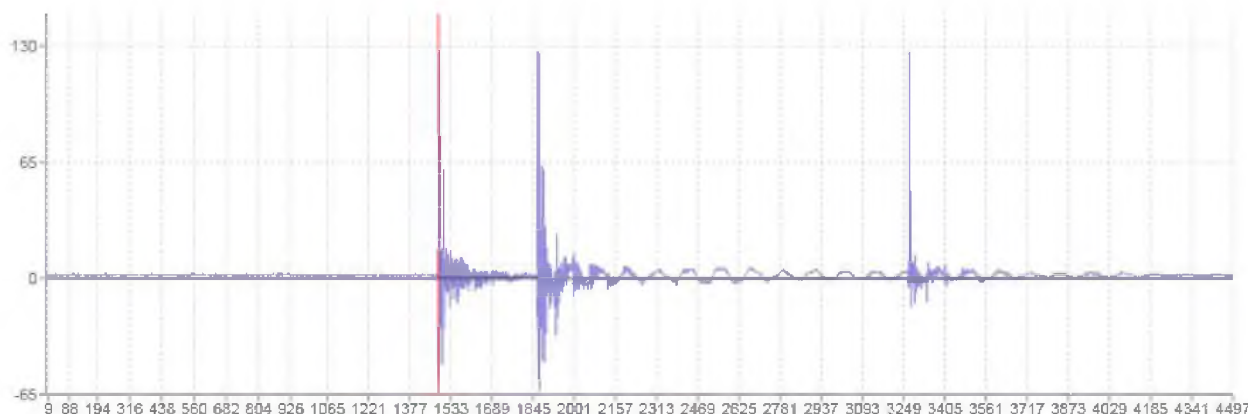


Рис.7а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 06.02.20 в 19:48 на ПК Центральной

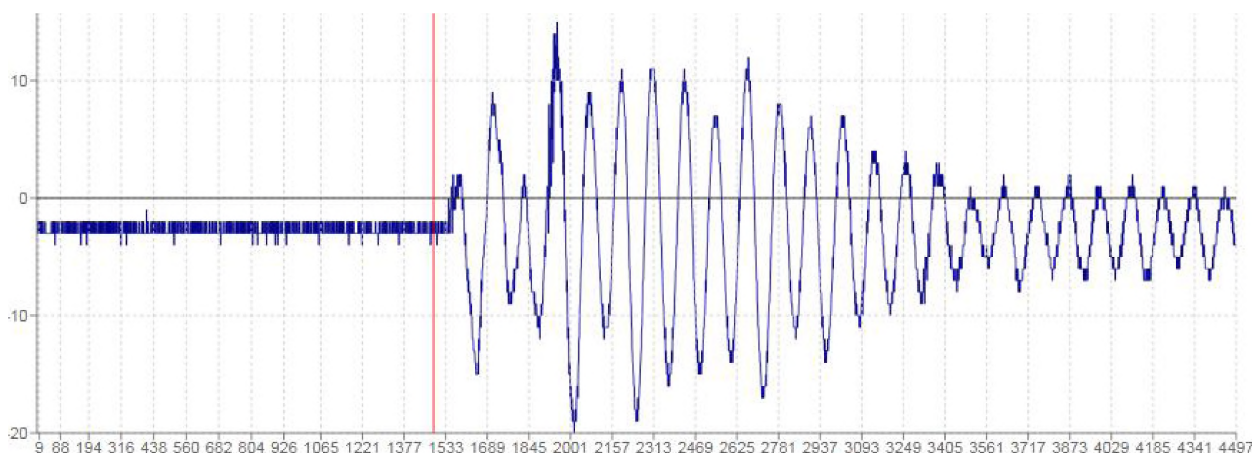


Рис.7б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 06.02.20 в 19:48 на ПК Восточная

Шестое событие определяется как плановая коммутация со стороны ПК Центральной. Интервал между началами СПП равен 60,76мкс. На ПК Восточная доминируют свободные колебания с периодом около 120мкс или частотой 8,6кГц.

15.04.20 в 11:46 произошло седьмое синхронное срабатывание, осциллограммы СПП которого изображены на рис.8.



Рис.8а. Осциллограмма СПП, зафиксированная 15.04.20 в 11:46 на ПК Центральной

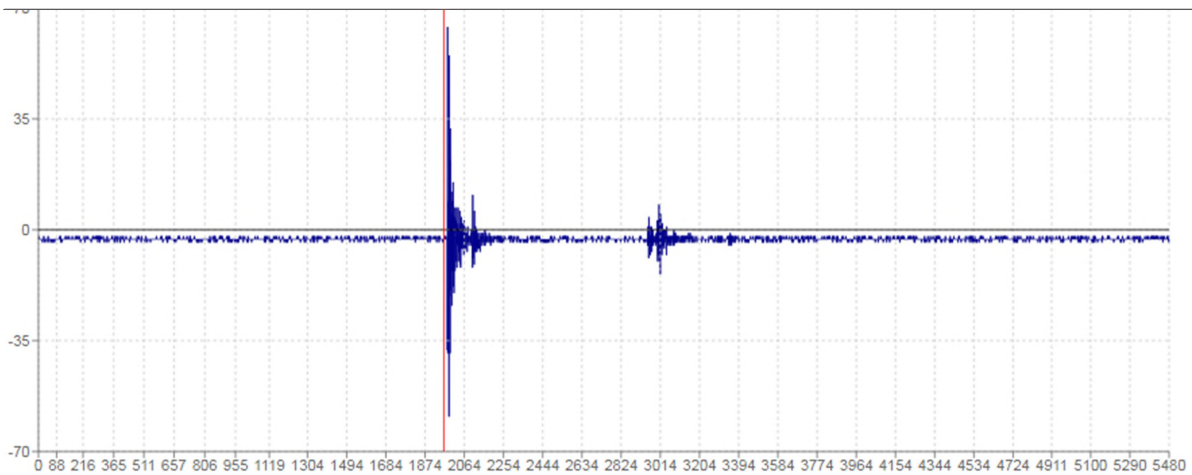


Рис.8б. Осциллограмма СПП, зафиксированная 15.04.20 в 11:46 на ПС Восточная

На ПС Центральная СПП наблюдается лишь в фазе «А», а на ПС Восточная в обоих фазах, причем свободные колебания находятся в противофазе. Это синхронное событие определяется как частичный разряд, произошедший ближе к ПС Центральная. Интервал между началами СПП равен 17,4мкс, что, так-же как и пятое событие, указывает на частичные разряды в муфте-тройнике.

3. Анализ осциллограмм

Причины и параметры зарегистрированных синхронных событий представлены в таблице 1.

Табл.1 Параметры синхронных событий

Дата-время	Место возникновения	Причина
23.04.19-17:28	ПС Центральная	Плановая коммутация
27.04.19-00:23	ПС Центральная	Аварийная
08.05.19-16:04	ПС Восточная	Плановая коммутация
27.07.19-23:29	ПС Восточная	Грозовые перенапряжения
04.10.19-19:34	Муфта-тройник(3,79км от ПС Цент)	Частичные разряды
06.02.20-19:48	ПС Центральная	Плановая коммутация
15.04.20-11:46	Муфта-тройник(3,79км от ПС Цент)	Частичные разряды

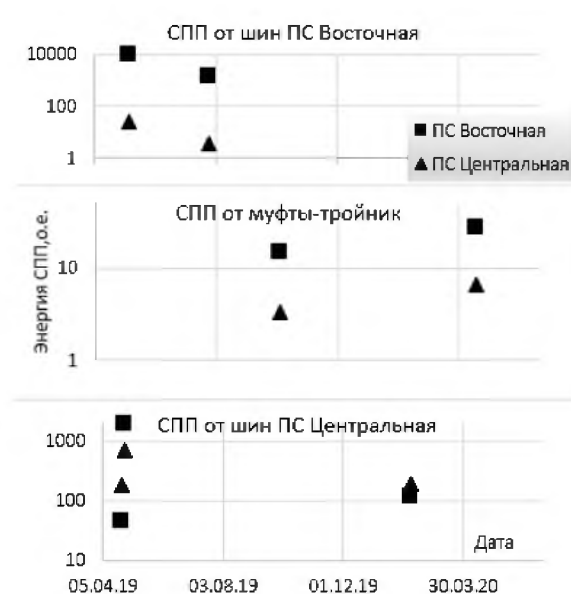


Рис.9. Зависимость величин нормированных энергий СПП, зарегистрированных на ПС Восточная и ПС Центральная, для разных мест возникновения СПП.

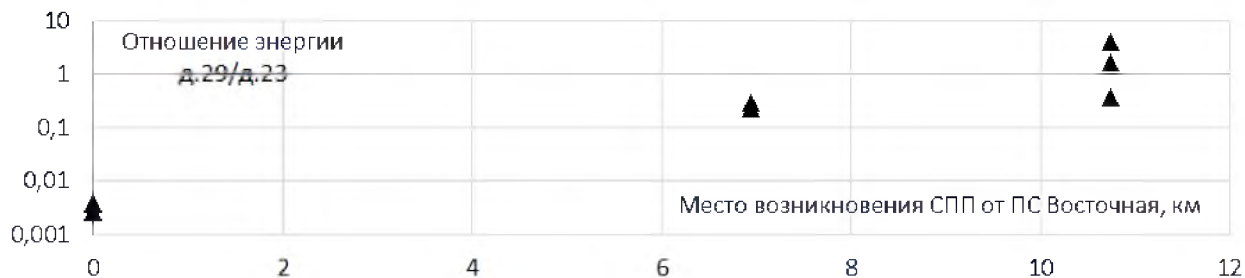


Рис.10. Отношение энергий СПП, зарегистрированных на ПС Центральная и ПС Восточная в зависимости от их места возникновения.

Значения энергий СПП (рис.9) и их отношений (рис.10) подтверждает проявление механизма дисперсии, проявляющийся в ослаблении энергии сигнала по мере его распространения вдоль линии. Это видно в пропорциональном увеличении отношения энергий с изменением места возникновения СПП (рис.10). Однако величина ослабления, как показывает рис. 9,10 зависит от места возникновения СПП. Например, 27.04.19 энергия СПП, возникшего со стороны шин ПС Центральная меньше энергии этого-же СПП, дошедшего до шин ПС Восточная (рис.3). Динамика изменения энергии СПП, возникших от частичных разрядов в муфте-тройнике (рис.9) в осенне-весенний период, что коррелирует с увеличением влажности в почве, указывает на ее увеличение, что может служить ценной информацией при мониторинге состояния высоковольтной изоляции.

4. Заключение

Приведенные результаты анализа осциллограмм и их параметров указывают на перспективность использования разработанного комплекса при поиске места повреждения и места дефектов высоковольтной изоляции, проявляющихся в виде частичных разрядов. Мониторинг динамики изменения места возникновения и параметров частичных разрядов, безусловно, актуален для безаварийной эксплуатации КЛ. Комплекс способен синхронно регистрировать на обеих сторонах КЛ частичные разряды, генерирующие энергию СПП выше определенных величин, которая в первую очередь определяется их длительностью, начиная с десятков микросекунд. Многочисленные частичные разряды меньшей длительности не представляют реальной опасности для функционирования КЛ. Для эффективного использования получаемой информации необходимо разрабатывать интеллектуальные методы обработки осциллограмм регистрируемых СПП.

Литература

1. Лямец, Ю.Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1. Распознаваемость места повреждения / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, А.О. Павлов, Е.Б. Ефимов, Я. Законьшек // Электричество. – 2001. – №2. – С. 16-23.
2. Козлов В.Н. О точности современных устройств ОМП / В.Н. Козлов, Ю.В. Бычков, К.И. Ермаков // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1. – С. 42–46.
3. Терминал определения места повреждения Бреслер 0107.090. Руководство по эксплуатации / ООО «НПП Бреслер». – Чебоксары, 2016. – 147 с
4. Mychal Kistler, Frank Heleniak and Tanvi Varshney. Practical Experience With High-Impedance Fault Detection in Distribution Systems, 46th Annual Western Protective Relay Conference, October 2019
5. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Васильев В.Д., Тукаев С.М. Практическая реализация

- волнового метода определения места повреждения в разветвленных распределительных электрических сетях 6(10) кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. Т. 2, № 53. С. 98-107.
6. Khuzyashev R.G., Kuzmin I.L., Vasilyev V.D., Tukaev S.M. System of the traveling-wave fault location in 6(10) kV treelike distribution electric grids , 2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019,DOI:10.1109/PTC.2019.8810663
 7. Иванов Р.В. Указатели поврежденного участка как интеллектуальные устройства мониторинга, фиксации и локализации аварийных процессов в распределительных сетях 6-10 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. Т. 3, № 54. С. 114-119