

Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов

КУЛИКОВ А.Л., ЛОСКУТОВ А.А., ПЕЛЕВИН П.С.

Для задачи автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи (КВЛ) необходимо с высокой точностью определить поврежденный участок. Протекание волнового процесса, возникшего в результате повреждения, зависит от места на линии электропередачи (ЛЭП). Регистрируя высокочастотные переходные составляющие, можно сформировать «волновой портрет» ЛЭП, а точное определение поврежденного участка обеспечить распознаванием соответствующих волновых портретов. Представлены алгоритм обработки высокочастотных сигналов и его результаты моделирования для распознавания волновых портретов на КВЛ.

Ключевые слова: кабельно-воздушные линии, повреждение, определение места повреждения, автоматическое повторное включение, цифровая обработка сигналов, имитационное моделирование

Внедрение современных средств вычислительной техники и коммуникаций приводит к усложнению систем релейной защиты и автоматики (РЗА). Однако предоставляемая новая информация и вычислительные ресурсы стимулируют разработку и внедрение новых алгоритмов функционирования устройств РЗА [1]. В частности, перспективен подход, представляющий релейную защиту как распознающую систему, целью которой является выявление аварийных ситуаций в электрических сетях [2]. Такая система может функционировать на основе как общепринятых алгоритмов распознавания образов и обработки изображений [2, 3], так и использовать специальные методы [4], ориентированные на соответствующую цифровую обработку сигналов релейной защиты [5].

Предлагается распространение техники распознавания изображений на задачу определения места повреждения (ОМП) на КВЛ для реализации автоматического повторного включения (АПВ). Предполагается применение «волновых портретов» при повреждениях КВЛ, под которыми понимается реализация высокочастотного переходного (волнового) процесса на некотором коротком отрезке времени, фиксируемая устройствами релейной защиты (ОМП) на одной из сторон линии. С точки зрения реализации системы распознавания, можно провести аналогию между «волновыми портретами», осциллограммами акустических колебаний, видеосигналами, фотографическими изображениями и др., поскольку все они являются носителями информации, необходимой для принятия решения. Применение процедур распознавания «волновых портретов» направлено на выявление поврежден-

ного участка КВЛ (кабельного или воздушного), от однозначности которого прямым образом зависит успешность АПВ. Следует отметить, что аналогичные алгоритмы распознавания для задач ОМП и АПВ ЛЭП ранее не применялись.

Актуальность АПВ КВЛ. В крупных городах в последние годы существенно возросло число смешанных (кабельно-воздушных) высоковольтных ЛЭП 110–220 кВ и возникли проблемы, связанные с отсутствием в электротехнической практике типовых технических решений, обеспечивающих АПВ на таких линиях. Согласно [6] должно предусматриваться АПВ воздушных и КВЛ всех типов напряжением выше 1 кВ. Отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован.

Реализуемые на практике алгоритмы АПВ воздушных ЛЭП неэффективны на КВЛ, так как могут приводить к значительным повреждениям и дорогостоящему ремонту кабельной части. Действительно, повторная подача высокого напряжения на высоковольтный кабель, проходящий в зоне жилых построек, может привести к существенному ущербу, травмированию и даже гибели людей. На высоковольтных кабелях, как правило, отсутствует явление самоустранения повреждения, и перед повторной подачей напряжения кабель необходимо испытывать [7]. Поэтому при повреждении на кабельном участке КВЛ включать линию повторно под напряжение нельзя. В связи с этим для эффективного АПВ высоковольтных КВЛ необходимо с высокой точностью определить, на каком из участков (воздушном или кабельном) произошло повре-

ждение. При устранении повреждения на воздушном участке следует реализовать АПВ ЛЭП.

В настоящее время известно только одно техническое решение, выполненное в рамках НИОКР [7] и внедренное на объекте ПАО «МОЭСК». В разработанном устройстве АПВ поврежденный участок определяется с помощью методов, основанных на сравнении токов по концам кабельных участков (дифференциальный принцип), а ОМП ЛЭП реализуется как по параметрам аварийного режима, так и локационными методами (активное зондирование) [7].

Указанные способы требуют установки для АПВ дополнительного оборудования как на подстанциях (ПС), так и в месте кабельно-воздушного перехода (датчики тока, устройство сбора и передачи информации, GPS/ГЛОНАС модули), организации канала связи, что является дорогим решением и снижающим общую надежность. В связи с этим целесообразен поиск более простых вариантов реализации АПВ КВЛ, например, с использованием замеров токов и напряжений только в одном конце ЛЭП. Таким образом, актуальна разработка недорогих эффективных устройств АПК КВЛ, выполняющих идентификацию поврежденного участка и формирующих разрешающий или запрещающий сигнал.

Основная идея предлагаемого технического решения состоит в том, чтобы определять поврежденный участок на основе анализа волнового процесса, возникающего в результате повреждения, с помощью специальных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Это становится возможным, поскольку протекание волнового процесса качественно и количественно зависит от того, на каком участке произошло повреждение. Эффективное распознавание обеспечивается существенными отличиями волновых характеристик у кабельного и воздушного участков ЛЭП.

Получение волнового портрета. Как известно, короткое замыкание (КЗ) сопровождается электромагнитным процессом, который можно разделить на две стадии разной продолжительности [8]. Первая (короткая) стадия характеризуется распространением электромагнитных волн по электрической сети, эту стадию часто называют «волновым процессом». Место КЗ можно рассматривать как источник волн. Когда волна (падающая) достигает места неоднородности в сети (участок с другим волновым сопротивлением), часть волны отражается обратно (отраженная волна), а другая часть проходит за место неоднородности (прошедшая волна). В месте неоднородности ток и напряжение переходного процесса резко (скачком) изменяются, и в результате в соответствующий момент времени в сигнале тока и напряжения появляются высокочастотные переходные составляющие [9, 10].

Применяя в устройстве цифровой обработки сигналов фильтр высоких частот или полосовой фильтр с достаточно широкой полосой пропускания, можно выделить переходные волновые составляющие, момент появления которых соответствует времени прибытия волны к месту наблюдения. На рис. 1 в качестве примера изображена модель КВЛ, временная диаграмма распространения волн напряжения (тока) по линии, а также волновые составляющие, зарегистрированные по концам ЛЭП.

Анализ рис. 1 показывает, что в зависимости от того, на каком участке КВЛ произошло КЗ, волны по-разному распространяются по электрической сети, отражаясь и проходя через места резкой неоднородности (шины ПС, кабельно-воздушный переход и т.д.). Таким образом, волновые переходные составляющие, зарегистрированные на определенном временном промежутке, формируют волновой портрет, характеризующий конкретное место КВЛ. Следует отметить, что волновые портреты, зафиксированные по разным сторонам КВЛ, существенным образом отличаются друг от друга (рис. 1).

Принципы функционирования предлагаемых алгоритмов.

Разработанные алгоритмы распознавания волновых портретов основаны на применении корреляционных функций, которые используют для характеристики случайных процессов, при этом различают автокорреляционную и взаимную корреляционную (кросскорреляционную) функции. В теории непрерывных случайных процессов автокорреляционная функция $R_{x,x}(\tau)$ является мерой взаимной связи функции $x(t)$ и функции $x(t+\tau)$, смещенной по отношению к $x(t)$ на время τ [11]:

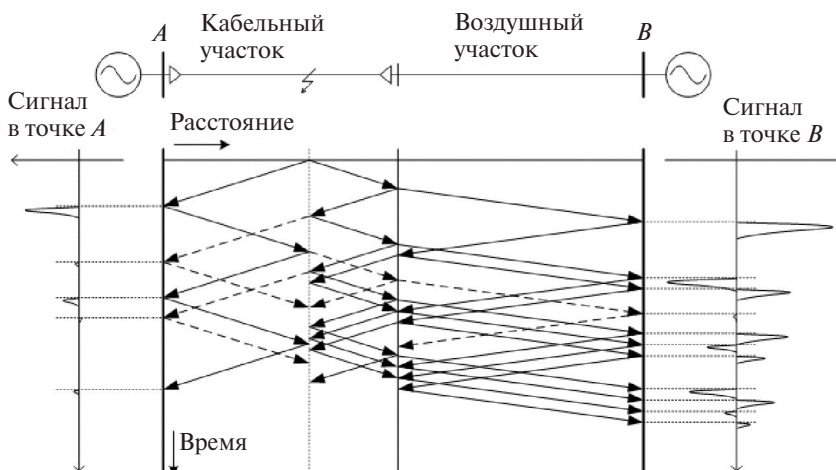


Рис. 1. Формирование волнового портрета при повреждении КВЛ

$$R_{x,x}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt \right]. \quad (1)$$

Кросскорреляционная функция $R_{xy}(\tau)$ является мерой взаимной связи двух случайных функций времени $x(t)$ и $y(t)$ и определяется следующим образом:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt \right]. \quad (2)$$

Для дискретных функций (сигналов) уравнения (1) и (2) принимают вид [11]:

$$R_{x,x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)x(n+k); \quad (3)$$

$$R_{xy}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)y(n+k). \quad (4)$$

Используя кросскорреляционную функцию двух сигналов, можно установить степень их соответствия или «похожести» [2]. Соответственно распознавание поврежденного участка целесообразно реализовать на основе вычисления взаимной корреляции полученных в результате повреждения КВЛ «волновых портретов» с аналогичными «эталонными портретами» повреждений на разных участках линии [12, 13].

Как распознаваемый, так и эталонный волновой портрет формируется посредством цифровой фильтрации сигнала напряжения (тока), снятого с вторичных цепей измерительных трансформаторов напряжения ТН (тока ТТ) или высокочастотного присоединения ЛЭП. Следует отметить, что при применении традиционных измерительных трансформаторов предпочтительно использовать сигналы с выходов ТТ, поскольку они обладают более широкой полосой пропускания и практически не искажают высокочастотные сигналы [8, 14, 15]. Также целесообразно получение модальных составляющих, соответствующих высокочастотным сигналам, распространяющимся по волновым каналам ЛЭП. Такие составляющие устойчивы к воздействию помех и изменению параметров воздушных участков КВЛ [8, 9, 16–18].

Моделирование. Распространение волновых процессов по КВЛ в результате повреждения моделировалось в программном комплексе PSCAD, а цифровая обработка высокочастотных сигналов осуществлялась отдельно с применением программного обеспечения Mathcad.

В PSCAD была создана имитационная модель КВЛ «Жегалово–Кислородная 2» ПАО «МОЭСК» (рис. 2) с учетом её реальных параметров [12]. В модель также были включены шины смежных подстанций, тип и число присоединений, а также узлы нагрузки и генерации выбрались произвольно.

Все элементы имитационной модели представляют собой встроенные стандартные компоненты программного обеспечения PSCAD. Воздушный и кабельный участки КВЛ (рис. 1) замещались детальными частотно-зависимыми математическими моделями (The Frequency-Dependent (Phase) Model). В такой модели учитывается зависимость всех параметров ЛЭП от частоты сигналов. Модель линии алгебраически преобразуется в три независимые однофазные электрические цепи, однако при этом сохраняется зависимость матрицы распределенных параметров ЛЭП от частоты [19].

Формируемые на основе имитационной модели волновые сигналы тока и напряжения выделялись с помощью высокочастотных фильтров Баттерворта и подвергались модальному преобразованию с последующим сохранением в виде осциллограмм (рис. 3). Частота дискретизации осциллограмм волновых портретов составляла 0,5 мкс.

На исследуемой КВЛ в PSCAD имитировались 12 однофазных КЗ на кабельном участке и 11 однофазных КЗ на воздушном участке. Эталонные волновые портреты формировались с шагом 100 м вдоль всей длины КВЛ. На расстоянии 500 м до края каждого из участков (кабельного и воздушного) шаг был снижен до 50 м. Осциллограммы волновых портретов записывались в текстовые файлы в виде последовательности выборок и затем обрабатывались в Mathcad. При обработке определялась максимальная корреляция между эталонными и зафиксированными при повреждении волновыми портретами.

Корреляционный алгоритм. На рис. 4 представлена структурная схема реализованного корреляционного алгоритма распознавания волновых портретов.

Исходный дискретный сигнал, формируемый при повреждении КВЛ (ИС на рис. 4), со вторичных цепей преобразователей (ТТ,ТН) подвергается

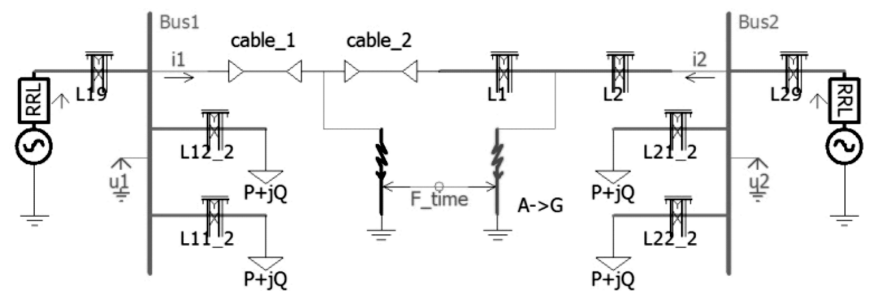


Рис. 2. Имитационная модель КВЛ в PSCAD

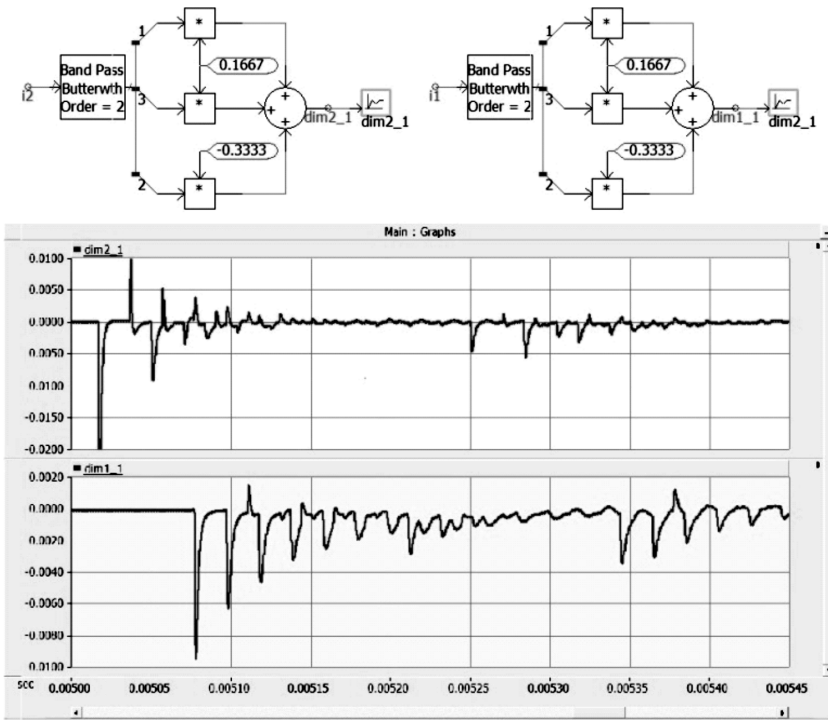


Рис. 3. Схемы фильтров модальных составляющих тока и напряжения в PSCAD, а также осциллограммы волновых портретов

первичной цифровой обработке, заключающейся в выделении полосовым фильтром (ПФ) высокочастотных составляющих в широком спектре частот. Затем проводится нормировка сигнала по амплитуде в блоке БО1 относительно первого импульса волнового портрета, а в последующем – по энергии в блоке БО2. Такие операции необходимы для сравнения результатов корреляционной обработки, поскольку амплитуда и энергия волнового портрета зависят от фазы (момента) возникновения КЗ. При этом энергия волнового сигнала определяется согласно уравнению

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} [x(k)^2]. \quad (5)$$

Поскольку основная часть информации волнового портрета содержится во временной последова-

тельности импульсов, их продолжительности и полярности, то целесообразен переход от портретов вида рис. 3 к упрощенной форме – рис. 5. Поэтому согласно алгоритму (рис. 4) обработанный сигнал поступает на пороговый элемент (формирователь-детектор), который осуществляет требуемое преобразование волнового портрета. На рис. 5 показаны сигнал на входе детектора 1 и сигнал на его выходе 2; 3 – уставка детектора.

Далее проводится вычисление корреляционных сумм между модифицированным волновым портретом с выхода детектора-формирователя и аналогичными эталонными волновыми портретами, полученными для воздушного и кабельного участков КВЛ (блок ВК на рис. 4). Значения рассчитанных корреляционных сумм сравниваются между собой по значению в блоке сравнения (БС на рис. 4).

Вывод о поврежденном участке формируется по эталонному портрету, которому соответствует наибольшее из рассчитанных значений корреляционных сумм. В зависимости от принятого решения относительно поврежденного участка (кабельный или воздушный) выдается команда о запрете/разрешении АПВ КВЛ.

На рис. 6 приведены зависимости максимумов кросс-корреляционных сумм для воздушного участка и кабельного участка от длины линии (номера эталонного портрета).

Результаты моделирования показали, что преимуществами разработанного алгоритма распознавания волновых портретов являются: меньшая зависимость от искажения формы волнового портрета помехами, а также более высокая чувствитель-

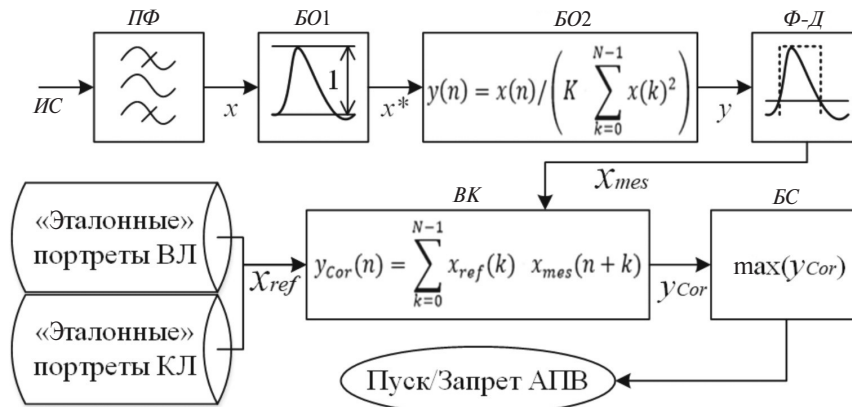


Рис. 4. Структурная схема корреляционного алгоритма

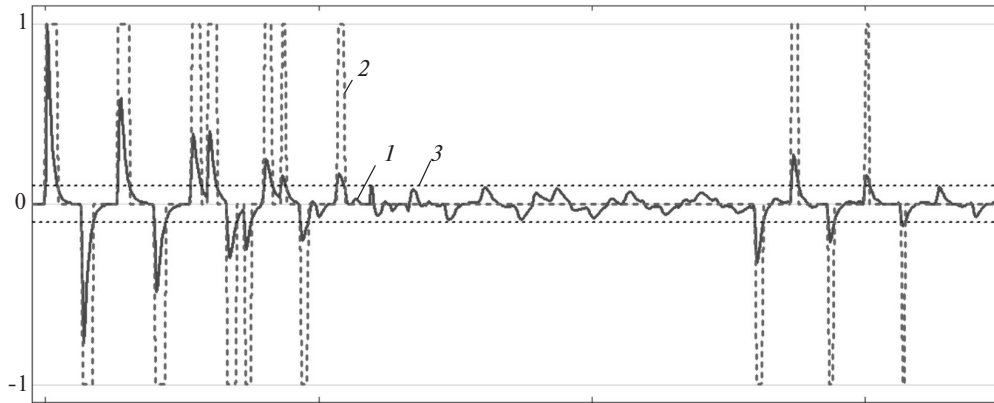


Рис. 5. Работа детектора

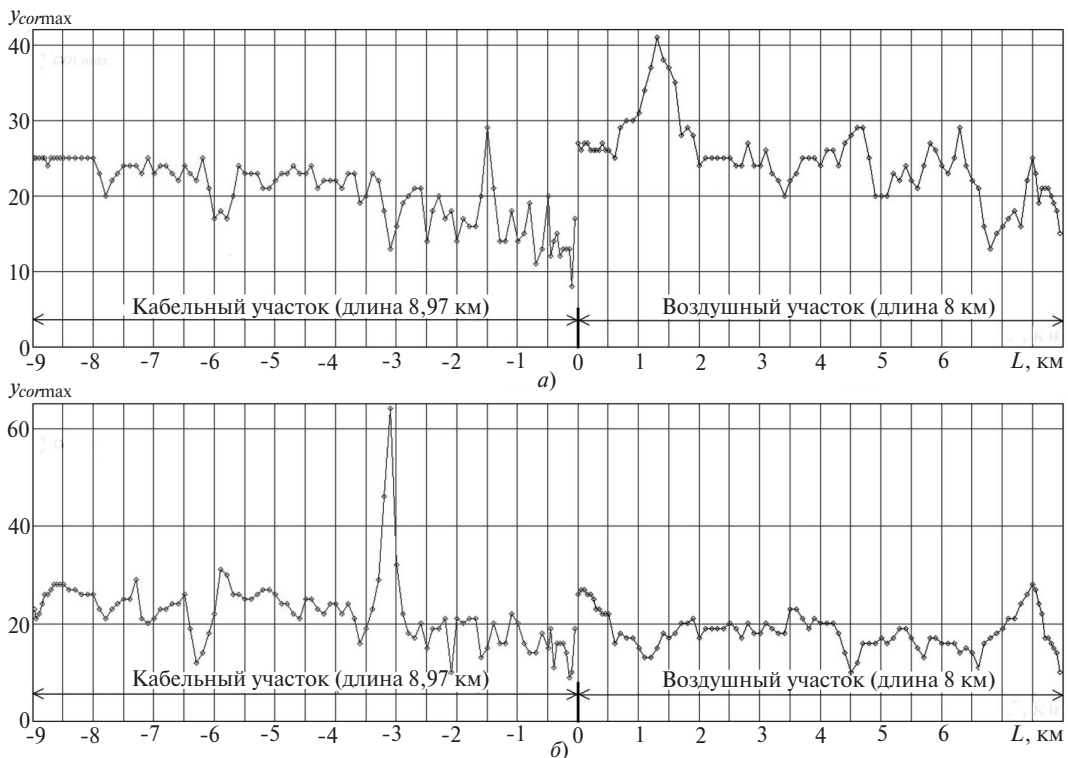


Рис. 6. Зависимость значений максимумов кросс-корреляционных функций от длины линии (номера эталонного портрета): а – КЗ на воздушном участке на расстоянии 1,34 км от перехода; б – КЗ на кабельном участке на расстоянии 3,13 км от перехода

ность. При моделировании процесса распознавания не было выявлено ни одной ошибки в определении поврежденного участка.

В таблице представлены результаты функционирования алгоритма распознавания волновых портретов КВЛ (значения расстояний в таблице: от места кабельно-воздушного перехода ЛЭП).

Как видно из таблицы, во всех случаях был верно определен поврежденный участок, а также с точностью до шага моделирования эталонных волновых портретов было определено место повреждения КВЛ.

Выводы. 1. Важной задачей для электрических сетей мегаполисов, не имеющей устоявшегося технического решения, является АПВ КВЛ 110-220 кВ. Целесообразна ее реализация на основе распознавания волновых портретов, формируемых при повреждениях кабельного или воздушного участков ЛЭП.

2. Волновые портреты представляют собой высокочастотные составляющие переходного процесса, зарегистрированные на одном из концов ЛЭП на определенном временном промежутке и характеризующие повреждение линии. Разработанный алгоритм распознавания волновых портретов состоит в вычислении корреляционных сумм с эталонными портретами, полученными путем имитационного моделирования.

3. Результаты моделирования показали безошибочное функционирование корреляционного алгоритма распознавания и определение поврежденного участка КВЛ с точностью до шага выбора эталонных портретов. Наряду с АПВ КВЛ перспективно применение разработанного алгоритма цифровой волновой релейной защиты и ОМП ЛЭП [20].

Номер КЗ	Расстояние до точки КЗ	Определенное место повреждения
Кабельный участок линии, 8,97 км		
1	0,04	0
2	0,53	0,5
3	0,97	1,0
4	1,34	1,3
5	2,58	2,6
6	3,13	3,1
7	4,18	4,2
8	5,05	5,0
9	6,19	6,2
10	7,10	7,1
11	7,91	7,9
12	8,53	8,55
Воздушный участок линии, 8 км		
1	0,04	0,1
2	0,53	0,5
3	0,97	1,0
4	1,34	1,3
5	2,58	2,6
6	3,13	3,1
7	4,18	4,2
8	5,05	5,1
9	6,19	6,2
10	7,1	7,1
11	7,91	7,9

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кобец, Б.В., Волкова И.О.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010, 208 с.
2. **Ya-Gang Zhang, Zeng-Ping Wang, Iin-Fan Zhang, Iing Ma.** Fault localization in electrical system: A pattern recognition approach. – Intern. Journal of Electrical Power & Energy System, March 2011, vol. 33, iss. 3, pp. 791–798.
3. **Dong X. Z., Kong W., Cui T.** Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave. – IEEE Trans. Power Deliv, 2009, 24, pp. 552–559.
4. **Ei Phyo Thwe, Min Min Oo.** Fault detection and classification for transmission line protection system using artificial neural Network. – Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2016, vol. 4, No. 5, pp. 89–96.
5. **Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш.** Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 2007, 198 с.
6. **Правила устройства электроустановок (ПУЭ).** Изд. 7-е. Утв. Приказом Минэнерго № 204 от 08.07.2012.
7. **Догадкин Д., Марин Р., Ширшова Е., Исмуков Г., Куликов А., Линг М., Подшивалин А.** Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2016, № 5 (38), с. 114–119.
8. **Лачугин В.Ф.** Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: Дисс.... д-ра техн. наук. Защищена 17.06.2016. – Иваново, 2016, 437 с.
9. **Костенко М.В.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973.
10. **Johns A.T., Salman S.K.** Digital protection for power systems.– Peter Peregrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers. – London (UK), 1995, 203 p.
11. **Опшенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./Под ред. А.С. Ненашева. – М.: Техносфера, 2006, 856 с.
12. **Куликов А.Л., Лачугин В.Ф., Ананьев В.В., Вуколов В.Ю., Платонов П.С.** Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения. – Электрические станции, 2015, № 7, с. 45–53.
13. **Куликов А.Л., Ананьев В.В.** Повышение точности многостороннего волнового определения места повреждения линий электропередачи за счет использования разностно-дальномерного метода. – Электротехника, 2016, № 1, с. 25–30.
14. **Spoor D. J., Zhu J., Nichols P.** Filtering Effects of Substation Secondary Circuits on Power System Traveling Wave Transients. – Proc. of the 8th Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS). September 2005, vol. 3, pp. 2360–2365.
15. **Elhaffar A.M.** Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves. Doct. Dissertation. – Helsinki University of Technology (Finland), March 2008.
16. **Crossley P.A., McLaren P.G.** Distance protection based on traveling waves. – IEEE Trans. Power Apparatus Syst. 102 (1983), pp. 2971–2983.
17. **Hedman D.E.** Propagation on Overhead Transmission Lines I: Theory of Modal Analysis. – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. March 1965, vol. 84, iss. 3, pp. 200–205.
18. **Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С.** Высокочастотная связь по линиям электропередачи: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987, 448 с.
19. **Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation: EMTDC user's guide, vol. 4.6.** Manitoba HVDC Research Centre, a division of Manitoba Hydro International Ltd.
20. **Shehab Eldin E., McLaren P.** Traveling wave distance protection problem areas and solutions. – IEEE Trans. Power Delivery, 1988, vol. 3, pp. 894–902.

[29.11.2017]

А в т о р ы: Куликов Александр Леонидович в 1982 г. окончил Горьковское (Нижегородское) высшее зенитное ракетное командное училище ПВО. В 1992 г. окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО им. Говорова Л.А. В 2007 г. защитил докторскую диссертацию «Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов» в Ивановском государственном энергетическом университете. Профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ).

Лоскутов Антон Алексеевич в 2011 г. окончил НГТУ им. Р.Е. Алексеева. В 2015 г. защитил в СГТУ кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование топологии интеллектуальных городских распределительных сетей среднего напряжения». Доцент НГТУ.

Пелевин Павел Сергеевич в 2016 г. окончил НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Инженер кафедры НГТУ.

Algorithm for Identifying the Faulty Section in Combined Cable and Overhead Power Lines Based on Surge Portrait Recognition

KULIKOV Aleksandr L. (Nizhnii Novgorod State Technical University named R. Ye. Alekseyev (NNSTU), Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

LOSKUTOV Anton A. (NNSTU, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

PELEVIN Pavel S. (NNSTU, Russia) – Graduate Student

For setting up automatic reclosing of combined cable and overhead power lines (COPL), the faulty line section must be determined with high accuracy. The pattern of a surge process triggered by a fault depends on the fault location in the power line. By recording the high-frequency transient components, it is possible to construct the power line surge portrait, and the damaged section can be exactly determined by recognizing the corresponding surge portraits. The article presents an algorithm for processing high-frequency signals and the results of its simulation for recognizing surge portraits in COPLs.

Key words: combined cable and overhead power lines, fault, fault location, automatic reclosing, digital processing of signals, simulation

REFERENCES

- Kobets B.V., Volkova I.O.** *Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* (Innovative Development of Power Industry on the Basis of the Concept of Smart Grid). Moscow, Publ. IATs Energiya, 2010, 208 p.
- Ya-Gang Zhang, Zeng-Ping Wang, Iin-Fan Zhang, Iing Ma.** Fault localization in electrical system: A pattern recognition approach. – Intern. Journal of Electrical Power & Energy System, March 2011, vol. 33, iss. 3, pp. 791–798.
- Dong X. Z., Kong W., Cui T.** Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave. – IEEE Trans. Power Deliv, 2009, 24, pp. 552–559.
- Ei Phyo Thwe, Min Min Oo.** Fault detection and classification for transmission line protection system using artificial neural Network. – Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2016, vol. 4, No. 5, pp. 89–96.
- Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh.** *Vvedeniye v metody tsifrovoy releinoi zashchity vysokovol'tnykh linii: uchebnoye posobiye* (Introduction to methods of digital relay protection of high voltage power lines: a tutorial). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 2007, 198 p.
- Pravila ustroystva elektroustanovok. 7ye izdaniye. Prikaz Minenergo No. 204 ot 08.07.2012** (Rules of electrical devices. 7th edit. The order of Ministry of energy No. 204 from 08.07.2012).
- Dogadkin D., Marin R., Shirshova Ye., Ismukov G., Kulikov A., Lint M., Podshivalin A.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electric Power Transmission and distribution)*, 2016, № 5 (38), c. 114–119.
- Lachugin V.F.** *Releynaya zashchita ob'yektov elektroenergeticheskikh sistem...* (Relay defence of objects of the electroenergy systems...). Diss. for the Degree of Dr. Sci. (Eng.). Ivanovo, 2016, 437 p.
- Kostenko M.V.** *Volnovyye protsessy i elektricheskiye pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* (Wave processes and electric hindrances are in the multiple-wire lines of high voltage). Moscow, Publ. Energiya, 1973.
- Johns A.T., Salman S.K.** Digital protection for power systems. – Peter Peregrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers. – London (UK), 1995, 203 p.
- Oppengeim A., Shafer R.** Tsifrovaya obrabotka signalov: Perevod s angl./Pod red. A.S. Nenashcheva (Digital treatment of signals. Trans. from Engl./Edit. by A.S. Nenashchev) Moscow, Publ. «Tekhnosfera», 2006, 856 p.
- Kulikov A.L., Lachugin V.F., Anan'yev V.V., Vukolov V.Yu., Platonov P.S.** *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power stations)*, 2015, No. 7, pp. 45–53.
- Kulikov A.L., Anan'yev V.V.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2016, No. 1, pp. 25–30.
- Spoor D. J., Zhu J., Nichols P.** Filtering Effects of Substation Secondary Circuits on Power System Traveling Wave Transients. – Proc. of the 8th Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS). September 2005, vol. 3, pp. 2360–2365.
- Elhaffar A.M.** Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves. Doct. Dissertation. – Helsinki University of Technology (Finland), March 2008.
- Crossley P.A., McLaren P.G.** Distance protection based on traveling waves. – IEEE Trans. Power Apparatus Syst. 102 (1983), pp. 2971–2983.
- Hedman D.E.** Propagation on Overhead Transmission Lines I: Theory of Modal Analysis. – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. March 1965, vol. 84, iss. 3, pp. 200–205.
- Mikutskii G.V., Skital'tsev V.S.** *Vysokochastotnaya svyaz' po liniyam elektroperedachi: Uchebnik dlya tekhnikumov* (High-frequency connection on the lines of electricity transmission: textbook for college). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1987, 448 p.
- Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation: EMTDC user's guide**, vol. 4.6. Manitoba HVDC Research Centre, a division of Manitoba Hydro International Ltd.
- Shehab Eldin E., McLaren P.** Traveling wave distance protection problem areas and solutions. – IEEE Trans. Power Delivery, 1988, vol. 3, pp. 894–902.