

Практическая реализация волнового метода определения места повреждения в разветвленных распределительных электрических сетях 6(10) кВ

УДК 621.316.1

Волновые методы определения места повреждения (ВМОМП) вследствие развития средств радиоэлектроники находят все более широкое применение в электроэнергетике. Перспективно использование волнового метода в разветвленных сетях, где применение классических методов ОМП затруднено. В работе рассматриваются упрощенный и строгий алгоритмы волнового метода определения места повреждения в разветвленной распределительной сети. Приведены результаты экспериментальных измерений. Показана работоспособность разработанного волнового метода ОМП при его использовании в разветвленных воздушно-кабельных сетях.

Хузяшев Р.Г.,

к.ф.-м.н., доцент
кафедры ЭСИС КГЭУ

Кузьмин И.Л.,

к.т.н., доцент кафедры
РЗА КГЭУ

Васильев В.Д.,

магистрант кафедры
АСОИУ КНИТУ КИИ

Тукаев С.М.,

магистрант кафедры
ЭСИС КГЭУ

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое и точное определение места повреждения (ОМП) в линиях электропередачи (ЛЭП) является важной составляющей мероприятий по устранению аварийного режима в сети и скорейшему обеспечению электроснабжения потребителей. Все это позволяет улучшать показатели качества электроснабжения электросетевых организаций, такие как SAIDI, SAIFI. Распределительные сети 6(10) кВ обладают разветвленной топологией и зачастую используют заземление с изолированной нейтралью. Эти две особенности распределительной сети определяют невозможность использования классического дистанционного метода ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) [1], который широко распространен в системообразующих ЛЭП более высокого класса напряжения 110–500 кВ, имеющих магистральную топологию.

В последние десятилетия в сетях 110–500 кВ на смену метода ОМП по ПАР приходит волновой метод ОМП (ВМОМП) [2], [3], основанный на спутниковой синхронизации шкал времени и цифровой обработке аварийных сигналов. Основным преимуществом ВМОМП является его алгоритмическая простота, не зависящая от электрических свойств ЛЭП.

На сегодняшний день немалое количество отечественных и зарубежных публикаций посвящены исследованию ВМОМП [2–6]. Большинство из них описывают результаты математического моделирования сигналов переходных

процессов (ПП) в сетях разных классов напряжения для демонстрации работоспособности и эффективности волнового ОМП. Так, например, в [4] рассматривается волновой метод двухсторонних измерений для ОМП в ЛЭП напряжением 110 и 220 кВ, обладающей линейной структурой, то есть не имеющей отпаек. Автор приводит результаты моделирования ПП в ЛЭП в программе «EMTP», а также показывает, что абсолютная погрешность ВМОМП, при длине исследуемой ЛЭП 90 км, составляет не более 523 м. В [3] рассматривается моделирование ВМОМП в кабельно-воздушной ЛЭП 131 кВ общей длиной 38 миль. Приведена графическая иллюстрация алгоритма ВМОМП в сетях с кабельно-воздушными линиями. В [5, 6] описывается математическое моделирование ВМОМП в сетях среднего напряжения с воздушными линиями (ВЛ) в программе «MATLAB». В качестве выводов в работах выдвигается мнение о пригодности и эффективности ВМОМП в сетях с разветвленной структурой, имеющих большое количество отпаек. Авторами работы [2] были представлены результаты опытной эксплуатации датчиков ВМОМП «Бреслер-0107.090», разработанного в ООО «НПП Бреслер», на ЛЭП 220 кВ длиной 189,5 км. Полученные выводы свидетельствуют о том, что точность метода может быть действительно высока и измеряться десятками метров в случае тщательной адаптации комплекса ВМОМП к параметрам ЛЭП.

Удешевление микроконтроллеров (МК) наряду с увеличением их вычисли-

Ключевые слова:

переходной процесс,
сигнал, алгоритм,
погрешность,
повреждение



Рис. 1. Блок-схема устройства ПАК ВМОМП

тельных возможностей позволяет разрабатывать и внедрять программно-аппаратные комплексы (ПАК), использующие ВМОМП, в распределительных сетях среднего напряжения с разными видами заземления нейтрали [7]. В данной работе приводятся результаты опытной эксплуатации разработанного комплекса ВМОМП в разветвленной сети с кабельно-воздушными линиями 10 кВ.

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ПАК ВМОМП

Для реализации ВМОМП в древовидных электрических сетях среднего напряжения был создан ПАК, состоящий из устройств ВМОМП и программного обеспечения для отображения информации о расстоянии до места повреждения в сети на рабочем компьютере диспетчера. Структурная схема устройства ПАК изображена на рисунке 1.

В качестве входной цепи, изолирующей устройство от высоковольтного напряжения сети, используется фильтр высокой частоты, состоящий из высоковольтного тарельчатого изолятора емкостью 50 пф и резистора с сопротивлением 100 Ом. Изолятор крепится к шинам фазного напряжения, а нижний конец входной цепи заземляется. Частота среза фильтра составляет 31,8 МГц, что (на основе экспериментальных измерений и модельных расчетов [8]) оптимально подходит для выделения высокочастотных составляющих сигнала ПП в ЛЭП 10 кВ. Изолятор монтируется на высоковольтных

шинах внутри комплектных трансформаторных подстанций (КТП), что защищает его от возможного пробоя вследствие воздействия окружающей среды. Выходное напряжение со средней точки фильтра подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера (МК), который оцифровывает входной сигнал с частотой, равной примерно 1 МГц. При обнаружении сигнала переходного процесса считывается текущее спутниковое время с GPS-

модуля. Время регистрации сигнала ПП и дополнительная информация передаются на выделенный сервер с помощью GPRS-модуля. Все электронные комплектующие устройства ПАК получают электропитание через блок питания (БП), подключенный к системе собственных нужд КТП.

На выделенном сервере определяется временной сдвиг между сигналами ПП, зафиксированными всеми устройствами ПАК в разных точках распределительной сети. На основе схемы распределительной сети, координат расположения устройств ПАК, скорости распространения сигналов ПП и зарегистрированных интервалов времени программно определяется как поврежденное ответвление в сети, так и расстояние до места повреждения на ЛЭП. Вычисленная информация передается по «облачным» каналам связи в диспетчерское управление распределительных сетей по протоколу МЭК-104 и отображается на мнемощите рабочего места диспетчера.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАК ВМОМП

На сегодняшний день ПАК ВМОМП проходит опытную эксплуатацию в распределительной сети 10 кВ «Фидер № 3 КТП 68-5», находящейся на балансе филиала ОАО «Сетевая компания» (Тукаевские РЭС) в г. Набережные Челны. Схема сети изображена на рисунках 2 и 3. Она взята из поопорной схе-

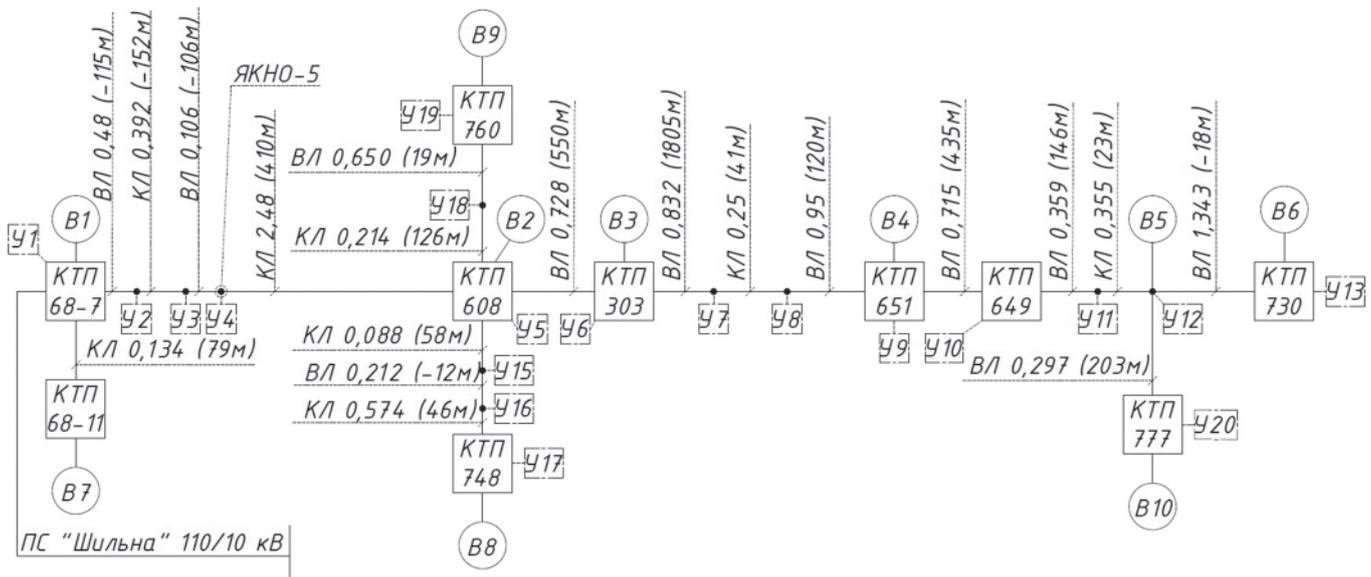


Рис. 2. Схема распределительной сети с указанием межзловых расстояний

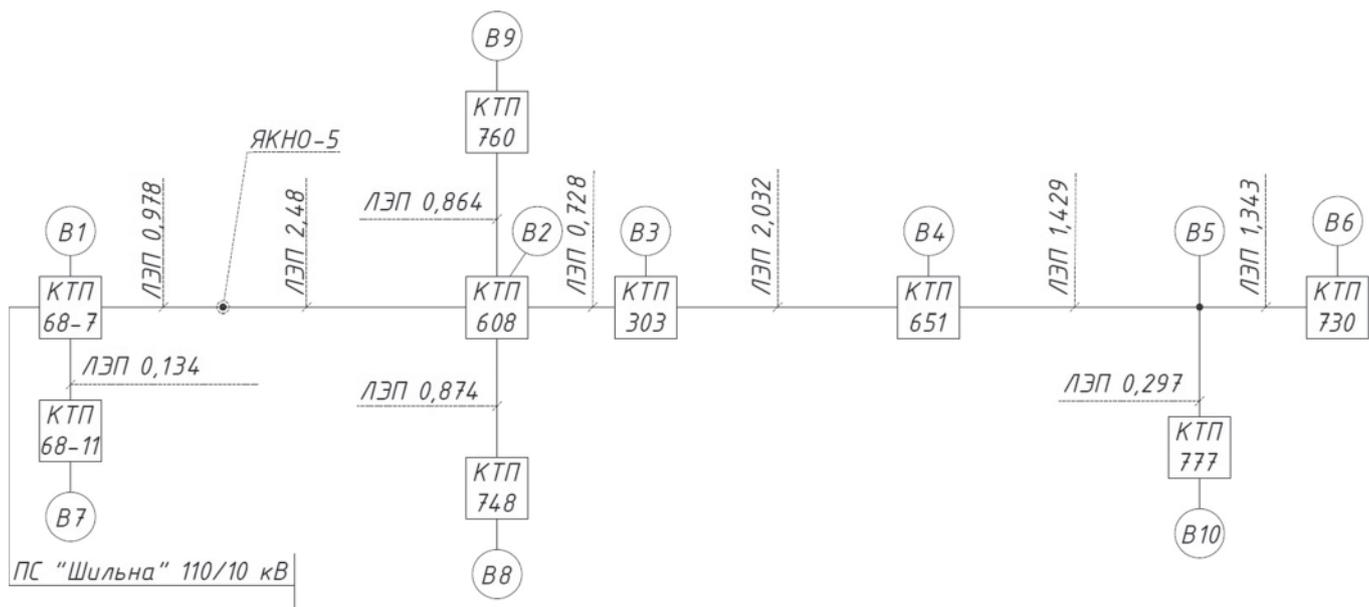


Рис. 3. Схема распределительной сети с указанием расстояний между вершинами

мы, которой пользуется эксплуатационная служба распределительных сетей.

От магистральной линии отходят ответвления на тупиковые КТП 10/0,4 кВ. Межузловые участки состоят из сегментов ВЛ, ВЛ с защищенными проводами (ВЛЗ) или кабельной линии (КЛ), каждый из которых характеризуется длиной и скоростью распространения сигнала ПП в ВЛ/ВЛЗ, $V_{ВЛ}$, или в КЛ, $V_{КЛ}$. Места соединения разнородных сегментов назовем узлами (У), а точки соединения магистрали и ответвлений, отходящих к КТП, и сами КТП — вершинами (В). Устройства ПАК располагаются в вершинах № 7, № 8, № 9, № 3, № 4, № 6, № 10. Длина межузловых участков определяется по имеющимся проектным поопорным схемам, по информации об охранных зонах ЛЭП на кадастровой карте [9] с участками зон с особыми условиями использования территории, а также по прямым замерам на местности. На рисунках 2 и 3 длины ЛЭП указаны в километрах (например, «ВЛ 0,48» — длина ВЛ равна 0,48 км).

В таблице 1 приведены межузловые длины сегментов, взятые из поопорной схемы и кадастровой карты, на которой нанесены охранные зоны ВЛ и КЛ. Данные из кадастровой схемы согласуются с измерениями на местности, они указаны на рисунках 2 и 3. Погрешность длин сегментов поопорной схемы указана в метрах в скобках на рисунке 2.

В таблице 2 представлены временные задержки всех плановых и аварийных коммутаций, зарегистрированных с апреля по сентябрь 2018 года в сети 10 кВ «Ф-3 КТП 68-5». Даты записаны в формате «дд.мм.»; места повреждения (МП) соответствует номерам узлов в сети; В3...В10 — номера вершин в сети; задержки времен регистрации сигналов ПП устройствами ПАК в разных вершинах показаны относительно устройства, зарегистрировавшего сигнал первым. Наибольшее число регистраций соответствуют плановым включениям выключателя «ЯКНО-5» (узел № 4). Благодаря близкому к устрой-

ствам ПАК расположению источников сигналов ПП разброс временных задержек в каждом устройстве сравним с величиной временной дискретизации АЦП сигнала ПП, равной 1,085 мкс. ПАК 10 апреля 2018 года шесть раз в интервале одного часа зафиксировал неустойчивые ОЗЗ, вызванные ава-

Табл. 1. Межузловые длины сегментов

Номера узлов	Вид линии	Длина сегментов на поопорной схеме, м	Длина сегментов на кадастровой карте, м
1–2	ВЛЗ	365	480
2–3	КЛ	240	392
3–4	ВЛ	0	106
4–5	КЛ	2890	2480
5–6	ВЛ	1200	650
6–7	ВЛ	2637	832
7–8	КЛ	291	250
8–9	ВЛ	1070	950
9–10	ВЛ	1150	715
10–11	ВЛ	505	359
11–12	КЛ	378	355
12–13	ВЛЗ/ВЛ/ВЛЗ	1325	1343
1–14	КЛ	213	134
5–15	КЛ	146	88
15–16	ВЛЗ	200	212
16–17	КЛ	620	574
5–18	КЛ	340	214
18–19	ВЛЗ	669	650
12–20	ВЛ	500	297

Табл. 2. Экспериментально определенные задержки сигналов ПП

Дата/ время	Причина ПП	МП	Экспериментально замеренные задержки сигнала, мкс						
			В7	В8	В9	В3	В4	В10	В6
24.05/ 12:40	КЗ на опоре № 1 от РП-17 на ПС «Шильна»	1	0,0	19,5	25,0	30,4	–	–	53,2
24.05/ 13:51	Вкл. выключателя в КТП 68-5	1	–	0,0	–	5,3	–	27,1	29,3
24.07/ 8:25	ОЗЗ на ПС «Шильна»	1	0,0	31,5	–	–	–	–	–
02.08/ 17:37	Плановая коммутация на ПС «Шильна»	1	0,0	–	–	5,3	–	–	–
04.08/ 04:03	Межфазное КЗ на ПС «Шильна»	1	0,0	23,9	–	39,1	–	–	–
05.08/ 0:02	Плановая коммутация на ПС «Шильна»	1	0,0	–	–	28,2	–	–	–
31.08/ 0:54	Плановая коммутация на ПС «Шильна»	1	–	0,0	–	14,1	–	–	–
09.09/ 23:17	Плановая коммутация на ПС «Шильна»	1	0,0	–	–	–	–	–	52,0
10.04/ 17:32	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	–	0,0	–	–	–	23,9	–
10.04/ 17:54	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	–	0,0	–	–	–	23,9	–
27.04/ 4:36	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	0,0	9,8	–	14,1	–	–	–
28.04/ 4:15	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	–	0,0	–	5,4	–	–	–
26.05/ 4:10	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	0,0	8,7	–	14,1	–	33,6	34,7
29.05/ 4:04	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	0,0	9,8	–	16,3	–	33,6	38,0
27.06/ 15:59	Вкл. «ЯКНО-5» при ремонте фидера	4	0,0	9,2	13,2	14,8	–	33,3	36,9
10.04/ 15:34	ОЗЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	22,8	0,0	–	–	–	13	–
10.04/ 15:57	ОЗЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	23,9	0,0	–	–	–	14,1	–
10.04/ 16:03	ОЗЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	–	0,0	–	–	–	14,2	–
10.04/ 16:07	ОЗЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	–	0,0	–	–	–	13	–
10.04/ 16:15	ОЗЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	–	0,0	–	–	–	14,4	–
10.04/ 16:20	КЗ на опоре № 14 от КТП 707, за узлом № 6	6	22,8	0,0	–	–	–	14,1	–
20.04/ 13:35	Вкл. разъединителя «9РО», расположенного на кольцевом ответвлении за узлом № 8, для электроснабжения от смежного фидера	8	–	0,0	–	–	–	1,1	–

рийными набросами веток деревьев на провода ВЛ. Разброс этих временных задержек также сравним с величиной временной дискретизации сигнала. Синхронные срабатывания, вызванные аварийными коммутациями на шинах ПС «Шильна», обладают наибольшим разбросом временных задержек.

В таблице 3 на основании таблицы 2 представлены усредненные по нескольким измерениям экспериментально зарегистрированные задержки времени регистрации сигналов ПП с известными номерами узлов их возникновения.

Табл. 3. Экспериментально определенные задержки сигналов ПП

МП	Экспериментально замеренные задержки сигнала, мкс						
	В7	В8	В9	В3	В4	В10	В6
1	0,0	19,5	25,0	30,4	–	–	53,2
4	0,0	9,2	13,2	14,8	–	33,3	36,9
6	23,3	0,0	–	–	–	13,6	–
8	–	0,0	–	–	–	1,1	–

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА ПП В РАЗНЫХ СЕКМЕНТАХ СЕТИ

Величину скорости распространения сигнала ПП на разных сегментах сети можно определить экспериментально путем анализа результатов, полученных при эксплуатации ПАК. Рассмотрим алгоритм обработки экспериментальных измерений временных интервалов для реальной распределительной сети 10 кВ (рисунок 2а) в целях определения скорости распространения сигналов ПП вдоль разных участков схемы.

В таблице 3 представлены экспериментально зарегистрированные усредненные временные задержки времени регистрации сигнала ПП, вызванные:

- плановыми включениями сети под нагрузку включением «ЯКНО-5», источник сигнала — узел № 4;
- повторяющимися аварийными срабатываниями (10.04.18) на отпайке (не показанной на схеме) за узлом № 6.
- Для вычисления скоростей распространения сигналов ПП использовались следующие предположения:
- скорость в КЛ в К0 раз меньше скорости в ВЛ/ВЛЗ;
- скорость на участке В2–В8 в К1 раз больше, чем на участке В2–В6;
- скорость на участке В2–В9 в К2 раз больше, чем на участке В2–В6;

Табл. 4. Результаты расчетов целевой функции

Параметры	Вариант расчета				
	1	2	3	4	5
$V_{ВЛ}$, м/мкс	219,0	182,0	212,0	220,0	201,0
K_0 , о.е.	1,5	1,1	1,4	1,5	1,1
K_1 , о.е.	1,0	1,0	6,29	7,19	3,5
K_2 , о.е.	1,0	1,0	1,0	1,7	1,2
K_3 , о.е.	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
$minF$, о.е.	105,79	86,95	16,28	13,25	11,01

- скорость на участке В1–В2 в К3 раз больше, чем на участке В2–В6.

Данные предположения о скоростях сигналов ПП на отдельных участках сети могут расходиться с классической теорией распространения сигналов вдоль ЛЭП, они были получены при расчетах с использованием информации о длинах ЛЭП в сети (таблица 1) и временных задержек сигналов ПП (таблица 2).

Для определения скорости распространения сигналов ПП использовалась целевая функция, равная сумме квадратов разностей экспериментальных временных задержек (таблица 3) и соответствующих расчетных задержек, полученных при варьировании $V_{ВЛ}$ от 160 до 300 м/мкс и $V_{КЛ}$ от 110 до 180 м/мкс. Путем перебора значений скорости и коэффициентов K_1, K_2, K_3 определялся минимум целевой функции, $minF$. Минимальное значение целевой функции без учета сигналов от первого узла равно 13,26 о.е. Оно получено при следующих значениях варьируемых параметров: $V_{ВЛ} = 220$ м/мкс; $V_{КЛ} = 146,7$ м/мкс; $K_1 = 7,19$; $K_2 = 1,7$; $K_3 = 1$. Результаты расчетов с поэтапным увеличением варьируемых параметров представлены в таблице 4.

Одинаковая скорость на всех участках ($K_1 = K_2 = K_3 = 1$) соответствует достаточно большой величине целевой функции или значительным отличиям экспериментальных и расчетных временных задержек. Разные скорости распространения сигнала ПП ($K_1 \neq K_2 \neq K_3$) соответствуют малым значениям целевой функции и малым отклонениям расчетных временных задержек от экспериментально зарегистрированных, хотя и сопровождаются физически невозможными значениями скоростей. Различие скоростей распространения сигнала ПП на разных участках, вероятно, обусловлены как механизмом дисперсии в неоднородных линиях, недостоверной информацией о длинах отдельных участков сети, так и другими причинами.

В таблице 5 показаны значения величины целевой функции при варьировании скорости распро-

Табл. 5. Целевая функция при МП — узел № 4 для пар устройств В7–В3, В7–В10, В7–В6 (о.е.)

$V_{КЛ} / V_{ВЛ}$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
110	308	243	192	152	120	95	75	59	46	36	29	23	19	15	13
115	256	197	151	115	88	66	49	36	27	20	14	11	9	7	7
120	213	159	118	87	63	44	31	21	14	9	6	4	4	5	6
125	178	129	92	64	44	28	18	10	6	3	2	2	4	6	9
130	148	104	71	47	29	17	9	4	1	1	2	4	7	11	15
135	124	83	54	33	19	9	4	1	0	2	4	8	13	18	23
140	103	67	41	23	12	5	1	1	2	5	9	15	20	27	34
145	87	54	31	16	7	2	1	2	6	10	16	23	30	37	45
150	73	43	24	11	5	2	3	6	11	17	24	32	40	49	58
155	62	35	18	8	4	4	6	11	17	25	33	42	52	62	72
160	52	29	15	7	5	6	11	17	25	34	43	54	64	75	86
165	45	24	12	7	7	10	16	24	33	43	54	65	77	89	100
170	39	21	11	8	10	15	22	31	42	53	65	78	90	103	115
175	35	19	12	10	14	20	29	40	51	64	77	90	103	117	130

Табл. 6. Целевая функция при МП — узел № 4 для пар устройств В7–В8, В7–В9, В7–В3, В7–В10, В7–В6 (о.е.)

$V_{кп} / V_{вл}$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
115	296	239	196	162	136	117	102	91	82	77	73	70	69	69	70
120	241	189	150	120	98	81	69	61	55	51	50	49	50	52	54
125	196	149	114	88	69	55	46	39	36	34	34	36	38	41	45
130	160	117	85	63	46	36	29	25	23	23	25	28	32	36	41
135	131	91	63	44	30	22	17	15	16	18	21	25	31	36	43
140	107	72	47	30	19	13	10	10	12	16	21	27	33	40	47
145	89	56	34	20	12	8	7	9	12	18	24	31	39	47	55
150	74	45	26	14	8	5	7	10	15	22	29	38	46	56	65
155	63	37	20	10	6	6	9	14	20	28	37	46	56	66	77
160	55	31	17	9	7	9	13	19	27	37	46	57	68	79	90
165	49	27	15	10	10	13	19	27	36	46	57	68	80	92	104
170	45	26	16	13	14	19	26	35	45	57	69	81	94	106	119
175	42	26	18	16	19	25	34	44	56	68	81	94	108	121	135
180	42	27	21	21	26	33	43	55	67	81	94	108	123	137	151

странения сигнала ПП в ВЛ и КЛ при МП — узле № 4 для пар устройств В7–В3, В7–В10, В7–В6. В данном случае минимум целевой функции сильно вытянут вдоль прямой, описываемой эмпирической формулой (1):

$$V_{вл} = -2 \cdot V_{кп} + 510, \quad (1)$$

которая пересекается с прямой $V_{вл} = 1,5 \cdot V_{кп}$ в точке с координатами $V_{вл} = 220$ м/мкс и $V_{кп} = 146,7$ м/мкс. Эти значения и используются далее при реализации алгоритмов ВМОМП.

В таблице 6 показаны значения величины целевой функции при варьировании скорости распространения сигнала ПП в ВЛ и КЛ при МП — узле № 4 для пар устройств В7–В8, В7–В9, В7–В3, В7–В10, В7–В6.

В таблице 7 показаны значения величины целевой функции при варьировании скорости распространения сигнала ПП в ВЛ и КЛ при МП — узлы № 4, № 6, № 8 для пар устройств В7–В8, В7–В9, В7–В3, В7–В10, В7–В6.

В таблицах 5, 6, 7 с увеличением слагаемых в целевой функции соответственно увеличивается ее минимальное значение, соответствующее диапазону $V_{вл} = 200–240$ м/мкс и $V_{кп} = 135–150$ м/мкс.

Учитывая результаты, представленные в таблице 5, а также принимая во внимание коэффициенты K_1, K_2, K_3 , определим скорости распространения сигналов ПП в разных участках сети (таблица 8), которые используются для реализации алгоритмов расчета расстояния до места повреждения.

Табл. 7. Целевая функция при МП — узлы № 4, № 6, № 8 для пар устройств В7–В8, В7–В9, В7–В3, В7–В10, В7–В6 (о.е.)

$V_{кп} / V_{вл}$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
120	305	241	192	155	126	105	90	78	71	66	63	62	62	63	66
125	251	192	147	114	90	72	59	51	46	43	42	43	45	49	53
130	208	153	113	84	63	48	38	32	29	29	30	33	37	42	47
135	173	123	87	61	43	31	24	21	20	22	25	29	35	41	48
140	146	100	68	45	30	21	16	15	16	20	25	31	38	45	54
145	126	83	54	35	22	16	13	14	17	22	29	36	45	54	63
150	110	71	45	29	19	15	14	17	22	29	37	46	55	65	76
155	99	63	40	26	19	17	18	23	29	38	47	57	68	79	91
160	91	59	38	27	22	22	25	31	39	49	60	71	83	95	108
165	86	57	39	30	27	29	34	42	51	62	74	87	100	113	126
170	84	57	42	35	34	38	44	54	65	77	90	104	118	132	146
175	84	60	47	42	43	48	56	67	79	93	107	122	137	152	167
180	85	64	53	50	53	60	69	81	95	109	125	140	156	172	188

Табл. 8. Расчетные скорости распространения сигналов ПП каждого сегмента

Межузловой сегмент	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13
Скорость, м/мкс	220,0	146,66	220,0	146,66	220,0	220,0	146,66	220,0	220,0	220,0	146,66	220,0

Табл. 8 (продолжение)

Межузловой сегмент	1–14	5–15	15–16	16–17	5–18	18–19	12–20
Скорость, м/мкс	220,0	1056,0	1584,0	1056,0	249,33	374,0	220,0

Из таблицы 8 видно, что в некоторых сегментах (5–15, 15–16, 16–17, 18–19) скорость распространения сигналов ПП превышает скорость света. Это связано с использованием коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 , которые были определены при поиске минимума целевой функции. Причины такого явления, систематически повторявшегося большое количество раз при опытной эксплуатации, неясны, здесь возможно влияние ряда факторов: механизма дисперсии в неоднородных линиях, недостоверной информации о длинах отдельных участков сети и др. Наибольшая неопределенность связана с физической длиной кабельных сегментов. Длины и кабельных и воздушных сегментов взяты с кадастровой карты, где указаны охранные зоны элементов электрической сети. Обозначение охранной зоны воздушного сегмента и его длины контролируется визуально, однако проверка

Табл. 9. Расчетные времена приходов сигналов ПП в вершины от узловых точек (мкс)

МП	Вершины						
	В7	В8	В9	В3	В4	В10	В6
1	0,9	23,0	24,8	25,6	35,4	43,9	48,8
2	3,1	20,8	22,7	23,4	33,2	41,8	46,6
3	5,8	18,2	20,0	20,7	30,5	39,2	43,9
4	6,3	17,7	19,5	20,2	30,0	38,7	43,4
5	23,2	0,8	2,6	3,3	13,1	21,8	26,5
6	26,5	4,1	5,9	0,0	9,8	18,5	23,2
7	30,3	7,9	9,7	3,8	6,0	14,7	19,4
8	32,0	9,6	11,4	5,5	4,3	13,0	17,7
9	36,3	13,9	15,7	9,8	0,0	8,7	13,4
10	39,5	17,1	19,0	13,1	3,3	5,4	10,2
11	41,2	18,8	20,6	14,7	4,9	3,8	8,5
12	43,6	21,2	23,0	17,1	7,3	1,4	6,1
13	49,7	27,3	29,1	23,2	13,4	7,5	0,0
14	0,0	23,6	25,5	26,2	36,0	44,5	49,4
15	23,2	0,7	2,7	3,3	13,1	21,1	26,6
16	23,4	0,5	2,8	3,5	13,3	22,0	26,7
17	23,9	0,0	3,4	4,1	13,9	22,5	27,3
18	24,0	1,6	1,7	4,2	14,0	22,6	27,4
19	25,8	3,4	0,0	5,9	15,7	24,4	29,1
20	44,9	22,5	24,4	18,5	8,7	0,0	7,5

расположения и длины кабельного сегмента затруднительна.

В таблице 9 приведены расчетные задержки времен регистраций сигналов ПП в разных

вершинах. Для расчета задержек использовались данные о длинах ЛЭП (таблица 1) и расчетных скоростях распространения сигналов на различных участках сети (таблица 8).

Результаты модификации таблицы 9, заключающейся в определении минимального времени в каждой строке и вычитании его из каждой ячейки этой строки, приведены в таблице 10.

АЛГОРИТМ ВМОМП № 1

Рассмотрим алгоритмы определения места повреждения в разветвленной распределительной сети. Алгоритм ВМОМП для ЛЭП линейной структуры достаточно прост и определяется по формуле (2):

$$X = \frac{L}{2} - \frac{V \cdot dT}{2}, \quad (2)$$

где L — расстояние между устройствами ПАК; V — скорость распространения сигнала ПП; dT — разница времени прихода сигнала ПП в устройства ПАК, расположенные по концам линии; X — расстояние от одного из концов линии до источника сигнала ПП.

Скорость распространения сигнала ПП зависит от величины постоянной распространения волнового канала, в котором возбуждается сигнал ПП. Для ЛЭП однородной линейной структуры эта скорость может быть замерена экспериментально, например, при включении ЛЭП под напряжение, то есть при нормальном коммутационном процессе или при аварийной коммутации с выявленным впоследствии МП.

Табл. 10. Расчетные временные задержки сигналов ПП (мкс)

МП	Вершины						
	В7	В8	В9	В3	В4	В10	В6
1	0,0	22,1	23,9	24,6	34,4	43,0	47,9
2	0,0	17,7	19,6	20,3	30,1	38,7	43,5
3	0,0	12,4	14,2	14,9	24,7	33,4	38,1
4	0,0	11,4	13,3	14,0	23,8	32,4	37,2
5	0,0	-22,4	-20,6	-19,9	-10,0	-1,4	3,4
6	22,4	0,0	1,8	-4,1	5,7	14,4	19,1
7	22,4	0,0	1,8	-4,1	-1,8	6,8	11,6
8	22,4	0,0	1,8	-4,1	-5,2	3,4	8,2
9	22,4	0,0	1,8	-4,1	-13,9	-5,2	-0,5
10	22,4	0,0	1,8	-4,1	-13,9	-11,7	-7,0
11	22,4	0,0	1,8	-4,1	-13,9	-15,0	-10,2
12	22,4	0,0	1,8	-4,1	-13,9	-19,8	-15,1

Табл. 11. Параметры алгоритма № 1 ВМОМП для схемы на рисунке 2

Пары вершин	7–8	7–9	7–3	7–4	7–6	7–10	8–9	8–3	8–4	8–6	
Усредненная скорость, м/мкс	187,6	173	163,2	175,1	183,7	179,8	536,0*	405,0*	264,1	235,8	
Расстояние между парами вершин, м	4466	4456	4320	6352	9124	8078	1738	1602	3634	6406	
Пары вершин	8–10	9–3	9–4	9–6	9–10	3–4	3–6	3–10	4–6	4–10	6–10
Усредненная скорость, м/мкс	239,2	269,6	230,7	219,7	219,6	207,3	207	203,6	206,8	199,5	220
Расстояние между парами вершин, м	5360	1592	3624	6396	5350	2032	4804	3758	2772	1726	1640

* Указанная скорость, превышающая скорость света, является фиктивной или кажущейся. Причины, порождающие такую величину, обсуждаются в разделе «Экспериментальное определение скорости распространения сигнала ПП в разных сегментах сети».

Простейшим алгоритмом ВМОМП (алгоритм №1) является использование средней скорости на участках между каждыми парами устройств ПАК (рисунок 2). Средняя скорость распространения сигнала ПП на каждом участке длиной L рассчитывается по формуле (3):

$$V_{\text{CP}} = LI \left[\frac{L_1}{V_{\text{ВЛ}}} - \frac{L_2}{V_{\text{КЛ}}} \right], \quad (3)$$

где L_1 — суммарная длина ВЛ на этом участке; L_2 — суммарная длина КЛ на этом участке; $L = L_1 + L_2$.

Эта средняя скорость используется в формуле (2) для определения расстояния до места возникновения сигнала ПП. После регистрации сигнала ПП всеми устройствами ПАК определяются два устройства, зарегистрировавшие этот сигнал первыми с временным интервалом dT . В таблице 11

приведены значения средней скорости и расстояния для всех пар вершин на рисунках 2 и 3. Для любых пар вершин определяется место повреждения по выражению (2) как расстояние от устройства, зарегистрировавшего сигнал первым, по направлению ко второму устройству.

В таблице 12 представлена расчетная зависимость погрешности упрощенного алгоритма ВМОМП от места возникновения сигнала ПП, определенная разными парами устройств (В7–В8, В7–В9, В7–В3, В7–В4, В7–В10, В7–В6), и экспериментально определенная погрешность для четырех точек места возникновения сигнала ПП: узел № 1, «ЯКНО-5» — узел № 4, узел № 6 и узел № 8.

Расчет погрешности производился вычитанием табличного расстояния до МП (таблица 1 и рисунок 2) из расстояния, определенного по выраже-

Табл. 12. Расчетная и экспериментальная погрешности ВМОМП, рассчитанные по алгоритму № 1

МП	Вершины											Среднее
	7–9	7–8	7–3	7–4	7–10	7–6	8–9	8–3	8–4	8–10	8–6	
Расчетная погрешность ОМП, м												
1	24	27	15	26	38	34	–	–	–	–	–	27
2	–78	–44	–109	–72	–57	–46	–	–	–	–	–	–68
3	–8	65	–65	4	31	53	–	–	–	–	–	14
4	–31	50	–92	–18	12	36	–	–	–	–	–	–7
5	415	742	188	464	572	661	487	443	–688	–723	–708	185
6	–	–	–	315	439	541	–	–	–542	–660	–656	–94
7	–	–	–	145	287	404	–	–	–376	–587	–596	–120
8	–	–	–	194	344	467	–	–	–175	–429	–444	–7
9	–	–	–	–	170	310	–	–	–	–346	–376	–61
10	–	–	–	–	40	192	–	–	–	–284	–325	–94
11	–	–	–	–	–26	132	–	–	–	–253	–299	–111
12	–	–	–	–	54	222	–	–	–	–29	–83	41
Экспериментальная погрешность ОМП, м												
1	–69	270	–455	–	–	–455	–	–	–	–	–	–177
4	–26	258	–160	–	–67	62	–	–	–	–	–	14
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–539	–	–539
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–135	–	–135

нию (2) с соответствующими параметрами — длина, скорость и временная задержка (таблица 11 и таблица 9). Усреднение по всем парам устройств позволяет уменьшить итоговую погрешность ВМОМП (см. столбец «Среднее» в таблице 12).

АЛГОРИТМ ВМОМП № 2

Более точным (алгоритм № 2) является алгоритм ВМОМП, учитывающий величину скорости распространения сигнала ПП в каждом сегменте. Опишем последовательность действий по определению места возникновения сигнала ПП:

1. При аппаратной регистрации сигналов ПП определяется номер КТП с устройством ПАК, первым зафиксировавшим сигнал ПП. Данное устройство и соответствующее ему время регистрации начала сигнала ПП определяется как опорное.
2. Вычисляются временные задержки dM_I начала сигналов ПП, экспериментально зарегистрированные остальными устройствами относительно опорного, где индекс I обозначает номер устройства ПАК.
3. По таблице 10 определяются две соседние строки, в которых расчетные временные задержки $T_{I,K-1}$ и $T_{I,K}$ являются смежными к экспериментальной временной задержке dM_I , где K — номер узла источника сигнала.
4. Для расчетных временных задержек $T_{I,K-1}$ и $T_{I,K}$ и соответствующих им расчетным расстояниям от опорного устройства происходит формирование линейной пропорции, из которой для экспериментальной временной задержки dM_I определяется реальное расстояние до места возникновения сигнала ПП от опорного устройства.
5. Определение расстояния до места возникновения сигнала ПП путем усреднения по всем I -м устройствам.

Рассмотрим на примере выполнение 1–4 пунктов приведенного выше алгоритма. Используем показания устройств, расположенных в вершинах № 3 и № 10. Предположим, что $dM_I = 2$ мкс, причем сигнал ПП был зарегистрирован первым в вершине № 3. Используем часть таблицы 9, в которой приведены расчетные времена регистраций сигналов ПП, сгенерированных в узлах, лежащих между вершинами № 3 и № 10 (таблица 13).

Табл. 13. Расчетные времена (мкс) прихода сигналов ПП в вершины № 3 и № 10 от МП — узловых точек № 7 — № 12 и № 20

Узел \ Вершина	В3	В10
7	3,8	14,7
8	5,5	13,0
9	9,8	8,7
10	13,1	5,4
11	14,7	3,8
12	17,1	1,4

Табл. 14. Расчетные временные задержки (мкс) сигналов ПП (или $T_{I,K-1}$ и $T_{I,K}$)

Узел \ Вершина	В3	В10
7	0,0	10,9
8	0,0	7,5
9	0,0	-1,1
10	0,0	-7,7
11	0,0	-10,9
12	0,0	-15,7
20	0,0	-18,5

В данном примере в качестве опорной взята вершина № 3, относительно которой в дальнейшем будут определяться расчетные задержки сигналов ПП и расстояние до места возникновения сигнала ПП между вершинами № 3 и № 10 (таблица 14 — модифицированная таблица 13).

Из таблицы 14 видно, что ближайшими к исходной экспериментальной задержке dM_I являются расчетные временные задержки, соответствующие МП в узлах № 8 и № 9. Отсюда следует, что реальное место повреждения находится между этими узлами. Согласно рисунку 2а узел № 8 расположен от опорной вершины № 3 на расстоянии 1082 м, а узел № 9 — на расстоянии 2032 м. Тогда, по рисунку 3, на основании канонического уравнения прямой на плоскости, можем записать:

$$X = X_1 + (dM_I - dT_1) \cdot \frac{X_2 - X_1}{dT_2 - dT_1}, \quad (4)$$

где (X_1, dT_1) и (X_2, dT_2) — границы однородного сегмента на рисунке 4. В данном примере X_1 и dT_1 — расстояние от опорной вершины № 3 до МП и расчетная временная задержка для МП — узел № 8; X_2 и dT_2 — при МП — узел № 9.

Согласно (4) реальное расстояние от вершины № 3 до МП, соответствующее экспериментальной временной задержке $dM_I = 2$ мкс, равно

$$1082 + (2 - 7,5) \cdot (1082 - 2032) / (7,5 + 1,1) = 1690 \text{ (м)}.$$

Алгоритмическая погрешность алгоритма № 2 равна нулю, однако погрешность при его практическом использовании определяется отличием реальной скорости распространения от расчетной, отличием реальной длины сегментов от расчетных и погрешностью регистрации временного интервала. Экспериментальная погрешность алгоритма № 2 представлена в таблице 15.

В обоих алгоритмах ОМП пренебрегали погрешностями определений временного интервала, длин разных сегментов и скоростей распространения сигналов ПП, которые можно минимизировать организационными мероприятиями, однако они всегда остаются конечными величинами, отличными от нуля.

ВЫВОДЫ

1. Сопоставление расчетных и экспериментальных измерений временных задержек сигналов ПП позволяет рассчитать эффективные скорости рас-

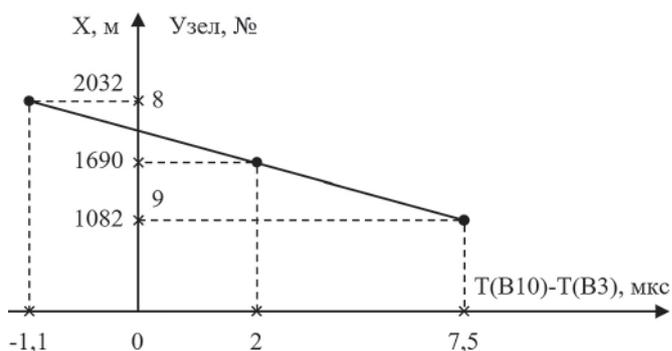


Рис. 3. Линейная пропорция для ОМП согласно алгоритму № 2

Табл. 15. Экспериментальные погрешности ВМОМП, рассчитанные по двум алгоритмам

МП	Вершины											
	7-9	7-8	7-3	7-4	7-10	7-6	8-9	8-3	8-4	8-10	8-6	Среднее
Экспериментальная погрешность ВМОМП по алгоритму № 1, м												
1	-69	270	-455	-	-	-455	-	-	-	-	-	-177
4	-26	258	-160	-	-67	62	-	-	-	-	-	14
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-539	-	-539
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-135	-	-135
Экспериментальная погрешность ВМОМП по алгоритму № 2, м												
1	284	-123	-647	-	-	-578	-	-	-	-	-	-266
4	161	7	-94	-	-95	22	-	-	-	-	-	0
6	-	-	-	-	88	-	-	-	-	-	-	88
8	-	-	-	-	254	-	-	-	-	-	-	254

пространения сигналов ПП в разнородных сегментах сети с заданной длиной.

2. Рассмотренные в работе алгоритмы ВМОМП имеют прикладное значение при разработке ПАК ВМОМП.

3. Погрешность ВМОМП обоих алгоритмов уменьшается за счет усреднения при использовании временных задержек от нескольких пар устройств ПАК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
2. Козлов В.Н., Бычков Ю.В., Ермаков К.И. О точности современных устройств ОМП // Релейная защита и автоматизация, 2016, № 1. С. 42–46.
3. Kasztenny B., Guzman A., Mangapathirao V.M., Titiksha J. Locating Faults Before the Breaker Opens – Adaptive Autoreclosing Based on the Location of the Fault / 44th Annual Western Protective Relay Conference, 2017, pp. 1–15.
4. Смирнов А.Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110–220 кВ. URL: <https://www.twirpx.com/file/2376241>.
5. Thomas D.W.P., Carvalho R.J.O., Pereira E.T. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. IEEE Bologna PowerTech Conference. Bologna, Italy. 2003.
6. Wang J., Liu X., Pan Z. A New Fault Location Method for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory // Advanced Materials Research, 2015. Vols. 1070–1072, pp. 718–725.
7. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л. Способ определения места однофазного замыкания на землю в разветвленной воздушной линии электропередачи. Патент № 2372624, 01.10.2009.
8. Хузяшев Р.Г., Тукаев С.М., Кузьмин И.Л. Исследование изменения временных параметров сигналов переходного процесса при распространении в распределительной сети 6(10) кВ для задачи определения места повреждения волновым методом // Энергобезопасность и энергосбережение, 2018, № 6(84). С. 5–17.
9. Публичная кадастровая карта. URL: <https://pkk5.rosreestr.ru/#x=5839098.391943796&y=7517489.811466659&z=16&app=toc&opened=1>.

REFERENCES

1. Arzhannikov E.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikanov M.Sh. *Opreделение mesta korotkogo zamykaniya na vysokovolnykh liniyakh ehlektroperedachi* [Determination of short circuit location on high-voltage power transmission lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 272 p.
2. Kozlov V.N., Bychkov Yu.V., Ermakov K.I. On the accuracy of modern devices for detecting damage location. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [RELAY PROTECTION AND AUTOMATION], 2016, no. 1, pp. 42–46. (in Russian)
3. Kasztenny B., Guzman A., Mangapathirao V.M., Titiksha J. Locating Faults Before the Breaker Opens – Adaptive Autoreclosing Based on the Location of the Fault / 44th Annual Western Protective Relay Conference, 2017, pp. 1–15.
4. Smirnov A.N. The wave method of two-sided measurements for determining 110-220 kV overhead transmission line fault location. URL: <https://www.twirpx.com/file/2376241>.
5. Thomas D.W.P., Carvalho R.J.O., Pereira E.T. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. IEEE Bologna PowerTech Conference. Bologna, Italy. 2003.
6. Wang J., Liu X., Pan Z. A New Fault Location Method for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory // Advanced Materials Research, 2015. Vols. 1070–1072, pp. 718–725.
7. Khuzyashev R.G., Kuzmin I.L. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v razvzvetvlennoy vozdushnoy linii ehlektroperedachi* [The method of determining a single-phase short circuit location on extensive overhead power line]. Patent RF, no. 2372624, 2009.
8. Khuzyashev R.G., Tukaev S.M., Kuzmin I.L. Investigation of transient signal temporal parameters when its transmitting in 6-10 kV distribution network to determine fault location by means of wave method. *Energobezopasnost i energosberezheniye* [Energy Safety and Energy Economy], 2018, no. 6 (84), pp. 5-17. (in Russian)
9. Public cadastral map. URL: <https://pkk5.rosreestr.ru/#x=5839098.391943796&y=7517489.811466659&z=16&app=toc&opened=1>.