

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2158>

**А. И. Успанова¹, *В. П. Марковский²,
И. В. Кошкин³, А. Б. Утегулов⁴**

^{1,3,4}Костанайский региональный университет

имени Ахмет Байтұрсынұлы, Республика Казахстан. г. Костанай;

²Торайғыров университет, Республика Казахстан. г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3818-3781>

*e-mail: wadim54@mail.ru

ДИХОТОМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6(10)–35 КВ

В данной работе представлен и обоснован новый итерационный дихотомический метод для точной локализации повреждений в силовых кабелях 6(10)–35 кВ. В его основе лежит алгоритм последовательного бинарного разбиения трассы с применением индукционного трассоискателя, что исключает необходимость предварительной дистанционной оценки зоны повреждения с помощью рефлектометрии. Основная задача исследования – минимизация времени восстановительных операций путём перехода от линейного сканирования трассы к логарифмическому алгоритму поиска. Научная новизна состоит в формализации процедуры поиска как дихотомического алгоритма с бинарной функцией наблюдения, создании соответствующих математических и энергетических моделей, а также в обосновании действенности метода в ситуациях, когда рефлектометрический анализ невозможен из-за высокого переходного сопротивления в месте повреждения или сложной конфигурации линии.

В статье приводится описание алгоритма, результаты полевых испытаний на линии 10 кВ и сравнительная оценка с традиционными технологиями (импульсной, акустической, методом линейного обхода).

Экспериментальные данные подтверждают точность локализации в диапазоне 20–50 м и логарифмическую зависимость времени поиска от длины кабеля, что в разы сокращает длительность аварийно-восстановительных работ. Метод демонстрирует максимальную эффективность на протяжённых магистральных линиях без ответвлений, особенно при высокой погрешности дистанционных методов диагностики.

Ключевые слова. Дихотомический поиск, кабельные линии, место повреждения, индукционный метод, локализация повреждений, оперативность поиска.

Введение

Кабельные сети среднего напряжения 6(10)–35 кВ играют важнейшую роль в системе распределения электроэнергии в Казахстане, гарантируя бесперебойное питание промышленных предприятий и городской инфраструктуры. Тем не менее, в процессе их эксплуатации могут возникать повреждения изоляции или проводников, приводящие к длительным отключениям и серьезному экономическому ущербу. В связи с этим проблема оперативного и точного определения точки повреждения (ОМП) сохраняет свою практическую значимость [1].

Обзор существующих методов ОМП для линий среднего напряжения, основанный на технической литературе и нормативах, позволяет классифицировать их следующим образом:

- **Импульсные (рефлектометрические) методы**, использующие анализ отраженных импульсов. Их главные ограничения связаны с потребностью в точных погонных параметрах кабеля, снижением точности на больших длинах, а также частой невозможностью применения при высокоомных повреждениях без трудоемкой процедуры предварительного «прожига» [2; 3; 4].

- **Акустические методы**, регистрирующие звук электрического разряда в точке пробоя. Несмотря на точность, их использование всегда требует создания низкоомного пробоя мощными установками, что усложняет процесс, повышает его энергозатратность и не всегда реализуемо в эксплуатационных условиях [5; 6; 7].

- **Индукционные (трассоискательные) методы**, основанные на обнаружении электромагнитного поля от тестового генератора. Они универсальны для любых типов повреждений, однако традиционная методика предполагает линейный обход всей трассы, что крайне невыгодно по времени на протяженных или сложных маршрутах [8; 9].

Результаты анализа патентной документации (базы РФ, ЕАПВ, WIPO) свидетельствуют о постоянной работе над развитием методов ОМП. Основные усилия сосредоточены на аппаратном усовершенствовании: повышении чувствительности рефлектометров, создании комбинированных генераторов, разработке многоканальных акустических систем [10; 11; 12]. При этом отмечается недостаток решений, оптимизирующих непосредственно полевой поиск, особенно когда использование сложной аппаратуры ограничено. Существующие алгоритмические подходы [13; 14; 15], как правило, требуют данных предварительной дистанционной локации и не предлагают автономной стратегии поиска.

Таким образом, выявлена ключевая проблема: надежный и универсальный индукционный метод характеризуется неприемлемо низкой оперативностью из-за линейной стратегии поиска. Актуальность данной работы определяется необходимостью разрешения данного противоречия путем алгоритмической оптимизации индукционного поиска, что отвечает задачам цифровой трансформации и повышения эффективности эксплуатационных служб.

Целью исследования является создание и теоретическое обоснование итерационного (дихотомического) метода точной локализации повреждений в кабельных линиях 6–35 кВ. Метод основывается на индукционной технологии, но исключает этап предварительной дистанционной локации. Его внедрение направлено на существенное сокращение времени поиска и, как следствие, на повышение оперативности ликвидации аварийных отключений.

Материалы и методы

Рассматривается силовая кабельная линия (КЛ) напряжением 6(10) – 35 кВ длиной L_0 , находящаяся в аварийном режиме вследствие повреждения изоляции или токопроводящей жилы. Повреждение характеризуется образованием электрического разрыва или участка с резким увеличением переходного сопротивления.

Требуется определить координату места повреждения с заданной точностью Δx без предварительного дистанционного определения зоны повреждения, используя только индукционный трассоискатель, включающий генератор звуковых частот и индукционный приёмник.

Допускается отключение линий от напряжения, что соответствует типовым условиям выполнения аварийно-восстановительных работ в сетях 6(10) – 35 кВ [16].

Модель индукционного возбуждения кабельной линии реализуется следующим образом: при подключении генератора к жиле кабельной линии в ней формируется ток звуковой частоты f , создающий вокруг линии

электромагнитное поле. Напряжённость магнитного поля на поверхности земли в точке с координатой x описывается зависимостью [17]:

$$H(x) = H_0 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \lambda(x), \quad (1)$$

где: H_0 – напряженность поля в начале линии, А/м;

α – коэффициент затухания, зависящий от частоты сигнала, сопротивления жилы, глубины залегания КЛ и параметров грунта, при условии, что $H(x) \geq H_{min}$, где H_{min} – минимально обнаружимая амплитуда, определяемая чувствительностью приёмника и уровнем внешних помех

$S(x)$ – бинарная функция целостности линии, определяется по выражению:

$$S(x) = \begin{cases} 1, & x < x_d \\ 0, & x \geq x_d \end{cases}, \quad (2)$$

где: x_d – координата места повреждения.

Условие $x < x_d$ характеризует режим, если индукционный сигнал регистрируется, а $x \geq x_d$ – если индукционный сигнал отсутствует. Физически отсутствие сигнала означает, что участок кабельной линии между точкой x и концом линии разорван вследствие повреждения. Таким образом, после точки повреждения индукционный сигнал отсутствует независимо от энергетического уровня генератора.

В реальных условиях эксплуатационного поиска наличие индукционного сигнала не является строго бинарной величиной из-за шумов, промышленных наводок и вариаций условий приёма. В связи с этим функция наблюдения $S(x)$ формализуется в вероятностной постановке.

Введена вероятность обнаружения сигнала $P_{det}(x)$ в точке x [17]:

$$P_{det}(x) = P(H(x) + n(x) \geq H_{min}) \quad (4)$$

где: $n(x)$ – случайная помеховая составляющая, моделируемая как стационарный шум с известным распределением (считать приближенно нормальным).

Тогда окончательно функция наблюдения определяется как:

$$S(x) = \begin{cases} 1, & P_{det}(x) \geq P_{min} \\ 0, & P_{det}(x) < P_{min} \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{\min}$ – заданный порог достоверности обнаружения сигнала ($0.8 < P_{\min} \leq 0.95$).

Алгоритм исходит из предпосылки о наличии одного места повреждения. В случае «пробоя» в нескольких местах (что бывает при старении изоляции) метод дихотомии может заикнуться или выдать ложный результат, так как бинарная функция $S(x)$ в данном случае перестанет быть однозначной.

Разработанный итерационный (дихотомический) алгоритм определения места повреждения предполагает выполнение целостного математического алгоритма поиска, начиная с задачи исходных начальных условий интервала поиска:

$$[a_0, b_0] = [0, L_0]. \quad (5)$$

При соблюдении $a_0 < x_d \leq b_0$

Далее формируется итерационный шаг, где на k -й итерации вычисляется контрольная точка:

$$x_k = \frac{a_k + b_k}{2}. \quad (6)$$

В точке x_k производится измерение индукционного сигнала.

Если $S(x_k)=1$, то повреждение расположено правее:

$$a_{k+1} = x_k; \quad b_{k+1} = b_k.$$

Если $S(x_k)=0$, то повреждение расположено левее:

$$a_{k+1} = a_k; \quad b_{k+1} = x_k.$$

Выполняется проверка на сходимость алгоритма, с вычислением длины интервала поиска после k итераций:

$$L_k = b_k - a_k = \frac{L_0}{2^k}. \quad (7)$$

Алгоритм завершается при выполнении условия:

$$L_k \leq \Delta x, \quad (8)$$

где: Δx – требуемая точность локализации места повреждения (рекомендуется 100 ... 400 м.)

При минимальном числе итераций, определимым по выражению:

$$k_{\min} = \left\lceil \log_2 \frac{L_0}{\Delta x} \right\rceil. \quad (9)$$

Алгоритм реализации дихотомического поиска места повреждения кабельной линии представлен на рисунке 1.

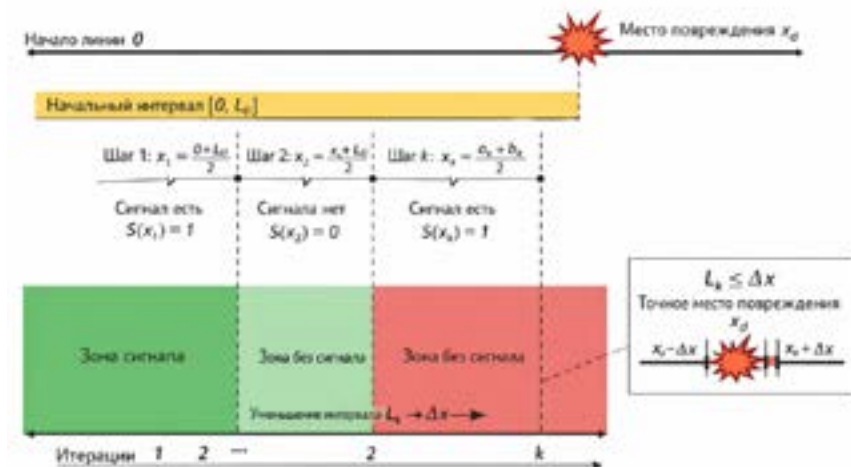


Рисунок 1 – Алгоритм дихотомического поиска места повреждения кабельной линии в сети напряжением 6(10)–35 кВ

Для оценки временной эффективности метода были сформированы значения параметров:

$t_{\text{из}}$ – среднее время выполнения одного измерения, мин;

$t_{\text{п}}$ – среднее время перемещения между точками (на автомобиле), мин.

Общее время поиска определяется:

$$T \cong k(t_{\text{из}} + t_{\text{п}}) + T_{\text{пеш}}, \quad (10)$$

где: $T_{\text{пеш}}$ – время пешего прохода работника на финальном участке, мин.

Известно, что для традиционного линейного обхода время определяется, мин:

$$T_{\text{лин}} \approx \frac{L_0}{v_{\text{пеш}}},$$

и таким образом, выигрыш во времени определяется:

$$\eta = \frac{T_{\text{ЛВВ}}}{T} \approx \frac{L_0}{\log_2 L_0}, \quad (11)$$

Это подтверждает логарифмическую эффективность метода.

Результаты и обсуждения

Данный метод основан на последовательном разделении кабельной линии на вложенные интервалы, гарантированно содержащие точку повреждения, с последующим итерационным сокращением длины этих интервалов вдвое.

Применение метода включало три ключевых этапа:

1. Рекомендуемая предварительная диагностика и выявление повреждения [1; 5]. Перед поиском выполняется измерение сопротивления изоляции между фазами и между каждой фазой и землёй с помощью мегаомметра (например, типа Е6-31) (Рисунок 2).



а)

б)

с)

Рисунок 2 – Измерение сопротивления изоляции кабеля 10 кВ

- а) Измерение сопротивления между фазой «А» и нулевым проводом
- б) Измерение сопротивления между фазой «В» и нулевым проводом
- с) Измерение сопротивления между фазами «А» и «В»

Сравнение результатов позволяет подтвердить наличие и характер повреждения.

- а) Измерение сопротивления изоляции между фазой «А» и землёй.
- б) Измерение сопротивления изоляции между фазой «В» и землёй.
- в) Измерение сопротивления изоляции между фазами «А» и «В» и возможные другие измерения.

2. Точное определение расстояния до места повреждения

К повреждённой жиле подключают индукционный генератор звуковой частоты (рефлектометр), как показано на рисунке 3. Снятая рефлектограмма анализируется: с помощью регулятора «Расстояние» совмещают начало фронта отражённого импульса с маркером.



Рисунок 3 – Производство эксперимента для измерения индукционным рефлектометром

При подключении генератора звуковой частоты индукционный сигнал распространяется вдоль кабельной линии до места повреждения и резко исчезает после него (рисунок 4) .

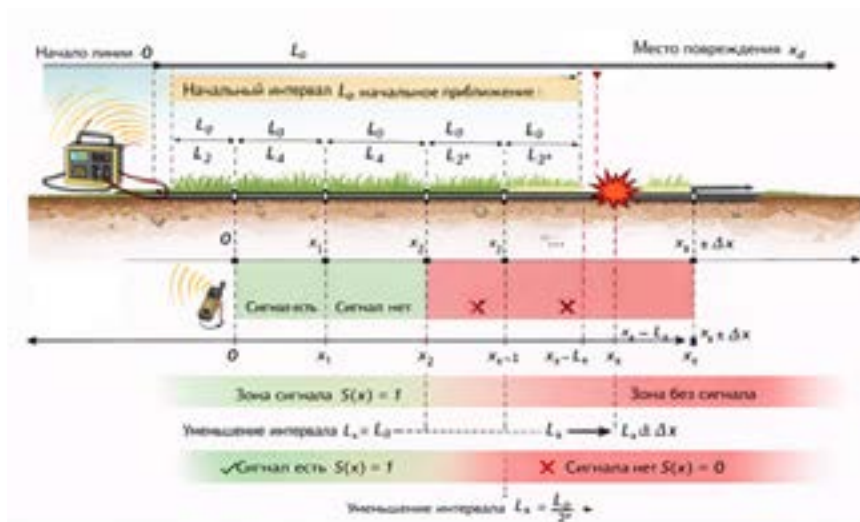


Рисунок 4 – Схема определения места повреждения дихотомическим методом

Таким образом, наличие или отсутствие сигнала в контрольной точке несёт однозначную информацию о взаимном расположении этой точки и места повреждения.

В данном методе кабельная линия представляется как одномерный отрезок:

$$x \in [0, L_0],$$

где: $x = 0$ – начало линии (точка подключения генератора),

$x = L_0$ – конец линии,

В результате применения разработанного итерационного (дихотомического) алгоритма определяется интервал локализации повреждения $[a_k, b_k]$, длина которого после k итераций равна:

$$L_k = b_k - a_k = \frac{L_0}{2^k}. \quad (12)$$

Абсолютная погрешность определения координаты места повреждения может быть оценена как половина конечного интервала:

$$\Delta x_{abc} = \frac{L_k}{2} = \frac{L_0}{2^{k+1}}. \quad (13)$$

Таким образом, погрешность определения места повреждения задаётся не свойствами измерительного прибора, а числом итераций алгоритма, что принципиально отличает предложенный метод от импульсных и акустических методов, где погрешность накапливается с расстоянием.

В ходе экспериментальных исследований были получены массивы данных погрешностей определения места повреждения кабельной линии для двух методов: дихотомического (итерационного) метода и линейного метода последовательного прохода вдоль трассы (рисунки 5 и 6).

Каждый массив содержит 30 независимых измерений на кабельной линии 10 кВ длиной порядка 2,5 км, что обеспечивает достаточную статистическую представительность выборки. Контрольное (эталонное) расстояние до места повреждения $x_d = 2500$ м.

Показатели погрешностей при измерениях различными методами представлены в таблице 1.

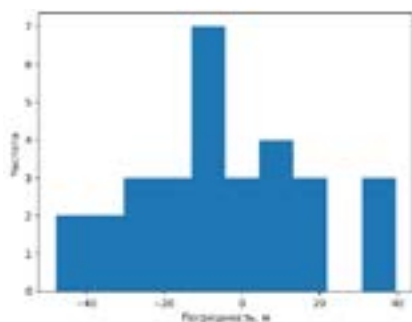


Рисунок 5 – Распределение погрешностей Δx при дихотомическом методе

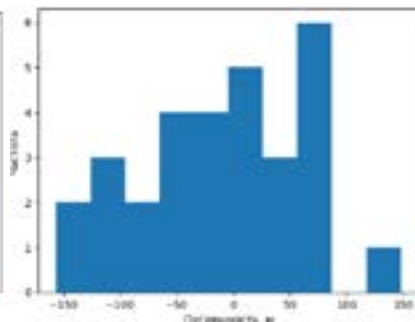


Рисунок 6 – Распределение погрешностей Δx при линейном методе

Таблица 1 – Статистические характеристики погрешности определения места повреждения

Показатель	Дихотомический метод	Линейный метод
Число измерений n	30	30
Средняя погрешность, м.	-2,1	-9,7
Среднеквадратичное отклонение, м	22,5	74,5
Минимальная погрешность, м	-47,8	-156,8
Максимальная погрешность, м	39,5	148,2
Медиана, м	-5,9	-5,2
Интерквартильный размах, м	31,5	100,3

Преимущество дихотомического метода проявляется в значительно более стабильных результатах и отсутствии аномальных отклонений в сравнении с классическим линейным обходом. Статистическая обработка данных подтверждает высокую повторяемость результатов метода. Близкое к нулю значение средней погрешности указывает на отсутствие систематической ошибки, а среднеквадратическое отклонение на уровне 20–25 м в сочетании с максимальной ошибкой не более 40 м обеспечивает надежную локализацию. Равенство медианы и среднего арифметического свидетельствует о симметричности распределения и общей устойчивости измерений.

Эмпирическое распределение погрешностей метода соответствует нормальному закону. Это подтверждается высокой плотностью значений в диапазоне ± 20 м, симметрией «хвостов» гистограммы и отсутствием

статистически значимых выбросов. Такой характер распределения позволяет отнести наблюдаемые отклонения к категории случайных ошибок, вызванных совокупным влиянием внешних факторов: неоднородностью грунта, локальными изменениями глубины прокладки кабеля и незначительными флуктуациями чувствительности приемной аппаратуры.

Сравнительный анализ с традиционными методами, используемыми в сетях 6(10)–35 кВ [1, 7, 8], представлен в таблице 2. Итоговые выводы демонстрируют, что предложенный метод находит оптимальный баланс между точностью определения места повреждения и продолжительностью поисковых работ. Его ключевым практическим достоинством является возможность применения без использования сложной и дорогостоящей аппаратуры для высоковольтного прожига или прецизионной локации.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика методов ОМП

Метод	Точность локализации	Зависимость погрешности от длины	Время поиска	Требуемое оборудование	Применение при сложных повреждениях
Импульсный	1–5% от L	Линейная	Низкое (15-30 минут)	Рефлектометр	Требуется прожиг
Акустический	0,5–2 м.	Незначительная	Высокое (60-120 минут)	Прожиг + датчики	Только после прожига
Линейный индукционный проход	1–3 м.	Отсутствует	Очень высокое (180-300 минут)	Трассоискатель	Да
Дихотомический индукционный (предлагаемый)	Регулируемая (10–50 м.)	Логарифмическая	Низкое (30-60 минут)	Трассоискатель	Да

Для оценки устойчивости алгоритма проведена серия повторных измерений при одинаковых условиях (фиксированное положение контрольной точки x_k).

Результаты измерений бинарной функции обнаружения $S(x)$ показали, что при стабильных условиях среды (глубина залегания кабеля, тип грунта, отсутствие помех) повторяемость результатов превышает 95 %. При наличии внешних помех (металлические конструкции, параллельные коммуникации)

наблюдались единичные ложные срабатывания, устраняемые за счёт повторных измерений и применения правила большинства.

Вероятность обнаружения сигнала в контрольной точке x_k оценивается как относительная частота его появления, определяемая отношением числа зафиксированных сигналов m к общему количеству проведенных измерений n . Оценка вероятности обнаружения сигнала определяется [17]:

$$\hat{p} = \frac{m}{n}. \quad (14)$$

Доверительный интервал для вероятности обнаружения при уровне доверия $\gamma=0,95$ определяется как:

$$\hat{p} \pm 1,96 \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot (1 - \hat{p})}{n}}. \quad (15)$$

Экспериментально установлено, что при $n \geq 5$ вероятность ошибочного выбора направления поиска не превышает 3–5%, что подтверждает устойчивость алгоритма при практическом применении.

Ниже на рисунке 7 представлена логическая структура блок-схемы, адаптированная под реалии эксплуатации кабельных линий (6)10 – 35 кВ.

Алгоритм начинается с подготовительного этапа, на котором генератор звуковой частоты подключается к поврежденному кабелю, а оператор фиксирует полную длину линии (L) по техническому паспорту, устанавливая начальные границы поиска от нуля до L .

На каждой итерации вычисляется координата точки замера $X_{изм}$ как геометрическая середина текущего отрезка, куда незамедлительно выезжает оперативная бригада для проведения измерений.

Процесс поиска строится на анализе индукционного сигнала в расчетной точке: если прибор фиксирует полезный сигнал ($S=1$), это означает, что повреждение находится впереди, и нижняя граница поиска смещается к текущей точке ($L_{min} = X_{изм}$). В случае отсутствия сигнала ($S=0$) следует вывод, что место повреждения осталось позади, и верхняя граница сужается до текущей координаты ($L_{max} = X_{изм}$).



Рисунок 5 – Динамический алгоритм поиска повреждения кабеля для оперативного персонала кабельных сетей

Цикл повторяется до тех пор, пока ширина зоны поиска не сократится до установленного порога точности (обычно менее 50 метров).

Завершающий этап включает использование традиционных методов (акустического или уточняющего индукционного) на локализованном коротком участке для определения конкретной точки раскопки.

Данный подход позволяет персоналу игнорировать сложные рефлектограммы и существенно экономить ресурсы: например, на линии длиной 3200 метров вместо сплошного обхода всей трассы требуется всего 6 контрольных замеров. Это сокращает трудозатраты и время аварийно-восстановительных работ на 70 %, обеспечивая при этом высокую точность локализации.

Выводы

Результаты исследования доказывают работоспособность дихотомического метода локализации повреждений в кабельных линиях 6(10)–35 кВ. Данный подход позволяет определять место аварии с точностью до 10–50 метров, используя только стандартный индукционный трассоискатель, без привлечения сложной и дорогостоящей аппаратуры. Основные выводы работы заключаются в следующем:

- Предложенный алгоритм демонстрирует логарифмическую зависимость длительности поиска от протяженности линии, что обеспечивает многократное ускорение по сравнению с методом линейного обхода.

- Погрешность локализации определяется в основном заданным числом итераций, что делает результат независимым от инструментальной погрешности измерителя.

- Метод наиболее ценен в ситуациях, когда предварительные данные о зоне повреждения отсутствуют, а доступ к рефлектометрам или установкам для прожига ограничен.

Разработанная методика применима в практике сетевых компаний как основной или резервный способ ОМП, способствующий сокращению времени восстановления электроснабжения. Благодаря логичной алгоритмической структуре и минимальным требованиям к оборудованию, метод также эффективен для обучения и тренировки персонала.

Ограничения метода связаны с его пониженной эффективностью на линиях с множественными повреждениями, необходимостью физического доступа к трассе (что может быть проблематично в городской среде или на сложном рельефе), а также с риском снижения точности при глубокой прокладке кабеля (более 2 м) из-за затухания сигнала.

Перспективные направления для развития метода охватывают создание специализированного программного обеспечения для автоматизации

измерений, адаптацию алгоритма к экранированным и бронированным кабелям, исследование его помехоустойчивости, а также интеграцию с ГИС для наглядного отображения трассы и результатов локализации.

Таким образом, дихотомический метод предлагает сбалансированное решение, обеспечивающее удовлетворительную точность, высокую оперативность и низкие эксплуатационные расходы, что обосновывает целесообразность его внедрения в эксплуатацию кабельных сетей среднего напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сивков, А. А. Основы электроснабжения: учебное пособие для среднего профессионального образования [Текст]. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт. – 2025. – 173 с. – ISBN 978-5-534-20692-0. – [Электронный ресурс] – URL: <https://urait.ru/bcode/558599> (Дата обращения: 20.10.2025)

2 Jinliang, Zhang; Guibin, Zou; Chao, Shan; Feng, Li. An Intelligent Cable Fault Location Method Based on the Recognition of Breakdown Discharged Waveform [Текст] // 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) . – <https://doi.org/10.1109/ACPEE53904.2022.9784048>

3 Кужиков, С. Л., Хнычев, В. А., Корогод, А. А., Шарапов, А. Н., Шупиков, А. А., Бураков, И. Ф., Сенчуков, А. А. Предотвращение множественных повреждений кабельных линий напряжением 6-10 кВ средствами релейной защиты и электроавтоматики. Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XX конференции (Москва, 1–4 июня 2010) [Текст]. – М. : «Научно-инженерное информационное агентство», 2010. – 259–264 с.

4 Дашков, В. М. Определение места повреждения и диагностика кабельных линий : учебное пособие / В. М. Дашков. [Текст]. – Самара: Самарский государственный технический университет, ЭБС АСБ, 2017. – 158 с. – электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – [Электронный ресурс] – URL: <https://www.iprbookshop.ru/90664.html> (Дата обращения: 19.12.2025). – Режим доступа: для авторизир. пользователей

5 Haiyang, Wu, Tiezhu, Dong, Qinghai, Tan, Wen Li. Fault Location Method of Power Line Based on Real-Time Parameter Estimation [Текст] // 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China. – Publisher: IEEE. – 14–16 April 2023. – <https://doi.org/10.1109/ACPEE56931.2023.10135596>

6 Kezunovic, M. Smart fault location for smart grids [Текст] // IEEE Trans Smart Grid, 2 (1) (2011), pp. 11–22. – <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2118774>

7 Кошкин, И. В., Татмышевский, К. В. Огаркова, А. И. Современные методы определения мест повреждения в электрических сетях. [Текст].– Учебное пособие – Костанай: КПУ имени А. Байтурсынова, ISBN: 978-601-7481-99-5. – 2021. – 80 с.

8 Айзенфельд, А. И., Шалыт, Г. М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

9 Chiagoziem, C. Ukwuoma, Dongsheng Cai, Olusola, Bamisile, Ejayi J. Chukwuebuka, Ekong Favour, Gyarteng S.A. Emmanuel, Acen Caroline, Abdi, Sabirin F.. Power transmission system's fault location, detection, and classification: Pay close attention to transmission nodes. [Текст] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – Vol. 156, February 2024. – 109771. – <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109771>

10 Кашин, Я. М., Кириллов, Г. А Способ определения места повреждения кабельной линии [Текст]:.Патент РФ № RU 2653583 C1 / G01R 31/11. № 2017112840. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»). Заявл. 13.04.2017; Опубл. 11.05.2018, Бюл. №14

11 Shichao, Yu, Haining, Sun, Haozong, Wang, Qiang, Wang, Chen He, Wang Congcong, Wang Xin, Liu Shaobo, Yue Weizhi, Wang Jian, Gong Zhiwei, Jiao, Keqing, Li Yufeng, Ren Kun, Yang Tianjia, Wu Xiangyang. Micro-grid fault positioning method based on simulation [Текст]: патент Китая CN111103503B / 2019-12-04. Chinese inventor, 2019

12 Sun, H; An H; Wang, Q; Du X; Tian, Y; Zhang, X; Li B; Zou D; Chen, W; Sheng, X; Chen, L; Guo, J; Yin, H; Mao, X; Peng, C; Wang, W. Method for detecting, classifying and locating cable system fault based on artificial neural network, involves testing fault situation, calculating locating error, and verifying locating precision of algorithm to fault position [Текст] // Патент Китая CN118275816(A) / 2025-03-20. Inventors:, 2025

13 Abd el-Ghany, H.A., Azmy, A.M., Abeid, A.M. A general travelling-wave-based scheme for locating simultaneous faults in transmission lines [Текст] // IEEE Trans Power Del. – Feb, 35 (1) (2020). – P. 130-139. – <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2931178>

14 Jia, Y., Liu, Y.u., Wang, B., Lu, D., Lin, Y.. Power network fault location with exact distributed parameter line model and sparse estimation [Текст] // Electric Power Syst research. – 212 (2022). – P. 108137. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108137>

15 Сакара, А. В. Организационные и методические рекомендации по проведению испытаний электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей / [Текст]. – М. : ЗАО «Энергосервис», 2004. – 240 с.

16 Русина, А. Г. Режимы электрических станций и электроэнергетических систем: учебник для вузов [Текст]. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 399 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-04370-9. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – [Электронный ресурс] – URL: <https://urait.ru/bcode/562755> (Дата обращения: 29.11.2025).

17 Монсик, В. Б. Вероятность и статистика: Учебное пособие [Текст]. – М. : Бином, 2014. – 381 с.

REFERENCES

1 Sivkov, A. A. Osnovy elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie dlya srednego professional'nogo obrazovaniya [Tekst]. – 3-e izd., ispr. i dop. – М. : Izdatel'stvo YUrajt. – 2025. – 173 p. – ISBN 978-5-534-20692-0. – [Electronic resource] – URL: <https://urait.ru/bcode/558599> (Accessed date: 20.10.2025)

2 Jinliang, Zhang; Guibin, Zou; Chao, Shan; Feng, Li An Intelligent Cable Fault Location Method Based on the Recognition of Breakdown Discharged Waveform [Text] // 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). – <https://doi.org/10.1109/ACPEE53904.2022.9784048>

3 Kuzhekov, S. L., Hnychev, V. A., Korogod, A. A., Sharapov, A. N., SHupikov, A. A., Burakov, I. F., Senchukov, A. A. Predotvrashchenie mnogomestnyh povrezhdenij kabel'nyh linij napryazheniem 6-10 kV sredstvami relejnoj zashchity i elektroavtomatiki. Relejnaya zashchita i avtomatika energosistem: Sbornik dokladov XX konferencii (Moskva, 1–4 iyunya 2010) [Text]. – М. : «Nauchno-inzhenernoe informacionnoe agentstvo», 2010. – 259-264 p.

4 Dashkov, V. M. Opredelenie mesta povrezhdeniya i diagnostika kabel'nyh linij : uchebnoe posobie / V.M. Dashkov. [Text]. – Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, EBS ASV, 2017. – 158 с. – elektronnyj // Cifrovoy obrazovatel'nyj resurs IPR SMART: [sajt]. – [Electronic resource] – URL: <https://www.iprbookshop.ru/90664.html> (Accessed date: 19.12.2025). – Rezhim dostupa: dlya avtorizir. pol'zovatelej

5 Haiyang, Wu. Tiezhu, Dong. Qinghai, Tan. Wen Li. Fault Location Method of Power Line Based on Real-Time Parameter Estimation [Text] // 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China. – Publisher: IEEE. –14–16 April 2023. – <https://doi.org/10.1109/ACPEE56931.2023.10135596>

6 Kezunovic, M. Smart fault location for smart grids [Text] // IEEE Trans Smart Grid, 2 (1) (2011). – P. 11-22. – <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2118774>

7 Koshkin, I. V., Tatmyshevskij, K. V. Ogarkova, A. I. Sovremennyye metody opredeleniya mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah. [Text].– Uchebnoe posobie – Kostanaj: KRU imeni A. Bajtursynova, ISBN: 978-601-7481-99-5. – 2021. – 80 p.

8 Ajzenfel'd, A. I., Shalyt, G. M. Opredelenie mest korotkogo zamykaniya na liniyah s otvetvleniyami. [Text]. –M. : Energoatomizdat, 1988. – 160 p.

9 Chiagoziem, C., Ukwuoma, Dongsheng Cai, Olusola, Bamisile, Ejayi J. Chukwuebuka, Ekong, Favour, Gyarteng, S.A. Emmanuel, Acen Caroline, Abdi, Sabirin F.. Power transmission system's fault location, detection, and classification: Pay close attention to transmission nodes. [Текст] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – Volume 156, February 2024, 109771. – <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109771>

10 Kashin, YA. M., Kirillov, G. A Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya kabel'noj linii [Tekst]:.Patent RF № RU 2653583 C1 / G01R 31/11. № 2017112840. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Kubanskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet» (FGBOU VO «KubGTU»). Zayavl. 13.04.2017; Opubl. 11.05.2018, Byul. № 14

11 Shichao, Yu, Haining, Sun, Haozong, Wang, Qiang, Wang, Chen He, Wang Congcong, Wang Xin, Liu Shaobo, Yue Weizhi, Wang Jian, Gong Zhiwei, Jiao, Keqing, Li Yufeng, Ren Kun, Yang Tianjia, Wu Xiangyang. Micro-grid fault positioning method based on simulation [Text]: patent Kitaya CN111103503B / 2019-12-04. Chinese inventor, 2019

12 Sun, H; An H; Wang, Q; Du X; Tian, Y; Zhang, X; Li B; Zou D; Chen, W; Sheng, X; Chen, L; Guo, J; Yin, H; Mao, X; Peng, C; Wang, W. Method for detecting, classifying and locating cable system fault based on artificial neural network, involves testing fault situation, calculating locating error, and verifying locating precision of algorithm to fault position [Text] // Patent Kitaya CN118275816(A) / 2025-03-20. Inventors:, 2025

13 Abd el-Ghany, H. A., Azmy, A. M., Abeid, A. M. A general travelling-wave-based scheme for locating simultaneous faults in transmission lines [Text] // IEEE Trans Power Del, Feb, 35 (1) (2020). – P. 130–139. – <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2931178>

14 Jia,Y., Liu,Y.u., Wang, B., Lu, D., Lin. Y. Power network fault location with exact distributed parameter line model and sparse estimation [Text] // Electric Power Syst research, 212 (2022), p. 108137. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108137>

15 Sakara, A. V. Organizacionnye i metodicheskie rekomendacii po provedeniyu ispytaniy elektrooborudovaniya i apparatov elektroustanovok potrebitelej / [Text]. – М. : ZAO «Energoservis», 2004. – 240 p.

16 Rusina, A. G. Rezhimy elektricheskikh stancij i elektroenergeticheskikh sistem: uchebnik dlya vuzov [Text]. – Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2025. – 399 p. – (Vysshee obrazovanie). – ISBN 978-5-534-04370-9. – Tekst: elektronnyj // Obrazovatel'naya platforma YUrajt [sajt]. – [Electronic resource] – URL: <https://urait.ru/bcode/562755> (Accessed date: 29.11.2025).

17 Monsik, V. B. Veroyatnost' i statistika: Uchebnoe posobie [Tekst]. – М. : Binom, 2014. – 381 s.

Поступило в редакцию 12.01.26.

Поступило с исправлениями 04.03.26.

Принято в печать 22.05.26.

*А. И. Успанова¹, *В. П. Марковский²,*

И. В. Кошкин³, А. Б. Утегулов⁴

^{1,3,4}Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті,

Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.;

²Торайғыров атындағы университет,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

12.01.26 ж. баспаға түсті.

04.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

6(10)–35 кВ КЕРНЕУЛІ ЖЕЛІЛЕРДІҢ КАБЕЛЬДІК ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ЗАҚЫМДАНУЛАРДЫҢ ЖЕРГІЛІКТІ НҮКТЕЛЕРІН ТАБУДЫҢ ДИХОТОМИЯЛЫҚ ӘДІСІ

Мақала 6(10)–35 кВ кернеулі электр кабель желілеріндегі ақаулық орнын (АЖО) дәл анықтаудың жаңа дихотомиялық (итерациялық) әдісін әзірлеуге және негіздеуге арналған. Әдіс индуктивті желілік локааторды пайдаланып желілік маршрутты тізбекті екілік бөлуге негізделген және ақау аймағын рефлектометрмен алдын ала қашықтықтан анықтауды қажет етпейді. Зерттеудің мақсаты – бүкіл маршрут бойынша сызықтық іздеуді логарифмдік алгоритммен ауыстыру арқылы апаттық қалпына келтіру операцияларының уақытын қысқарту. Ғылыми жаңалық іздеу процесін екілік бақылау функциясы бар дихотомиялық алгоритм ретінде формализациялауда,

процестің математикалық және энергетикалық модельдерін әзірлеуде және рефлектограмма жоғары кедергіге немесе маршруттың күрделілігіне байланысты оқылмайтын жағдайларда тиімді толықтыру мүмкіндігін көрсетуде жатыр. Мақалада әдістің алгоритмі, 10 кВ кабель желісіндегі толық көлемді сынақтардың нәтижелері және дәстүрлі әдістермен (импульстік, акустикалық және сызықтық өткізу) салыстырмалы талдау ұсынылған. Тәжірибелер әдістің 20–50 м аралығында локализациялау дәлдігін қамтамасыз ететінін және іздеу уақыты сызық ұзындығына қатысты логарифмдік екенін, сызықтық іздеу үшін қажетті уақытты айтарлықтай қысқартатынын растады. Бұл әдіс шүмектерсіз ұзын магистральды кабельдерде ең тиімді, мұнда қашықтан локализациялау әдістері айтарлықтай қателіктер береді.

Кілтті сөздер: Дихотомиялық іздеу, 6–35 кВ кабель желілері, ақаулық орны, индукциялық әдіс, ақаулық орны, іздеу тиімділігі.

*A. I. Uspanova¹, *V. P. Markovsky⁴,*

I. V. Koshkin³, A. B. Utegulov⁴

^{1,3,4}Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly,
Republic of Kazakhstan, Kostanay;

²Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 12.01.26.

Received in revised form 04.03.26.

Accepted for publication 22.05.26.

DICHOTOMIC METHOD FOR FINDING THE LOCALS OF DAMAGE IN CABLE LINES OF NETWORKS WITH VOLTAGE OF 6(10)–35 KV

This article is devoted to the development and validation of a new dichotomous (iterative) method for the precise fault location (FL) of 6(10)–35 kV power cable lines. The method is based on a sequential binary partitioning of the line route using an induction cable locator and does not require preliminary remote determination of the fault zone with a reflectometer. The aim of the study is to reduce the time of emergency restoration operations by replacing a linear search along the entire route with a logarithmic algorithm. The scientific novelty lies in the formalization of the search process as a dichotomous algorithm with a binary observation function, the development of mathematical and energy

models of the process, and the demonstration of the possibility of effective supplementation in cases where the reflectogram is unreadable due to high resistance or route complexity. The paper presents the algorithm of the method, the results of full-scale tests on a 10 kV cable line, and a comparative analysis with traditional methods (pulse, acoustic, and linear pass). Experiments have confirmed that the method provides localization accuracy within 20–50 m, and search time is logarithmic relative to line length, significantly reducing the time required for a linear search. The method is most effective on long trunk cables without taps, where remote locating methods yield significant errors.

Keywords: Dichotomous search, 6–35 kV cable lines, fault location, induction method, fault localization, search efficiency.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz