

УДК 621.311.1

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

© 2023 г. А. Л. Куликов¹, П. В. Илюшин², *, А. А. Лоскутов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева”,
Нижегород, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 23.06.2023 г.

Определение мест повреждений (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) за минимально возможное время позволяет сократить время отключения ВЛЭП при аварии, что содействует повышению надежности работы энергосистем. Устройства ОМП ВЛЭП по параметрам аварийного режима (ПАР) получили широкое распространение, так как имеют меньшую стоимость. Однако они имеют большую погрешность, чем устройства ОМП ВЛЭП, регистрирующие волновые процессы. Большинство известных алгоритмов ОМП ВЛЭП по ПАР предполагают равномерное распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП, что в реальных условиях не так. Применение этих алгоритмов в устройствах ОМП ВЛЭП на ВЛЭП, имеющих неоднородности, приводит к существенным погрешностям при расчете расстояния до места повреждения. Авторами предложено применение алгоритмов поиска при безусловной одномерной оптимизации для повышения быстродействия реализации итерационных процедур в устройствах ОМП ВЛЭП по ПАР. Авторами разработаны рекомендации по выбору критериев оптимизации, а также варианты реализации вычислительных процедур. На примере двухстороннего ОМП ВЛЭП показано, что применение алгоритмов поиска позволяет существенно (от десятков до сотен раз) сократить число шагов вычислительной итерационной процедуры. Реализация алгоритмов поиска возможна в программном обеспечении типовых терминалов релейной защиты и автоматики без проведения их аппаратной модернизации.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, определение места повреждения, параметры аварийного режима, алгоритмы поиска

DOI: 10.31857/S00022331023050059, **EDN:** TVBQRB

ВВЕДЕНИЕ

Методы оптимизации входят в состав разделов прикладной математики, объединяющих алгоритмические реализации эффективного управления различными системами. В общем случае задача оптимизации сводится к нахождению экстремума некоторой целевой функции. Исходя из целевой функции, технические приложения методов оптимизации в задачах электроэнергетики могут быть различными [1–3].

Одной из важных эксплуатационных задач электросетевых компаний, решаемой на основе методов оптимизации, является определение мест повреждений (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) [4, 5]. По магистральным и распределительным ВЛЭП осуществляется передача электроэнергии от электростанций до удаленных потребителей. В ряде стран мира ВЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения имеют протяженность в десятки и даже сотни километров, проходят по пересеченной местности, а также эксплуатируются в условиях сложных климатических условий. Поэтому нахождение мест повреждений на ВЛЭП посредством обходов и осмотров для проведения аварийно-восстановительных работ занимает много времени. Начиная с 50-х годов прошлого столетия, в электросетевых компаниях массово внедряются устройства ОМП ВЛЭП, устанавливаемые на подстанциях [6–10]. Это позволяет значительно сократить время отключения ВЛЭП при аварии за счет быстрого нахождения и устранения повреждения. В конечном итоге это оказывает влияние на надежность функционирования энергосистем [11].

Большинство алгоритмов ОМП ВЛЭП, реализованные в терминалах релейной защиты и автоматики (РЗА), пренебрегают неравномерностью и неоднородностью распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП. Такая неоднородность ВЛЭП возникает по следующим причинам:

- наличие кабельных вставок с переходными пунктами;
- применение разных типов опор на отдельных участках;
- изменение сопротивления заземления опор, вызванного прохождением ВЛЭП по участкам с разными грунтами, пересечениями рек, болот и водоемов;
- сближение с другими ВЛЭП в коридорах совместного прохождения;
- наличие или отсутствие грозотроса на отдельных участках ВЛЭП;
- различная длина пролетов ВЛЭП;
- использование проводов разных типов и сечений на участках ВЛЭП;
- другие факторы.

Существует два основных класса методов ОМП ВЛЭП, реализованных в терминалах РЗА: методы, основанные на оценке параметров токов и напряжений аварийного режима (ПАР) [12–14] и волновые методы [15–17]. Причем волновые методы включают использование активного зондирования ВЛЭП, а также пассивную регистрацию волновых процессов, распространяющихся к концам ЛЭП и возникающих при ее повреждениях.

На практике устройства ОМП ВЛЭП по ПАР обладают более высокой погрешностью, чем устройства, регистрирующие волновые процессы. Однако устройства ОМП ВЛЭП по ПАР получили наиболее широкое распространение, так как имеют меньшую стоимость. Это обусловлено более простой технической реализацией, так как в устройствах ОМП ВЛЭП используются составляющие токов и напряжений промышленной частоты, при этом не требуется применять аналого-цифровые преобразователи с высокой частотой дискретизации, а также высокопроизводительные процессоры. В таких устройствах могут быть реализованы алгоритмы ОМП ВЛЭП по ПАР, предполагающие односторонние и двусторонние (многосторонние) изменения токов и напряжений. Односторонние алгоритмы не требуют применения каналов связи для обмена информацией об измеренных токах и напряжениях, но обладают более высокой погрешностью по сравнению с двухсторонними [18].

Неоднородность ВЛЭП требует применения сложных и, как правило, итерационных алгоритмов с последовательной пошаговой организацией вычислений. Для обеспечения меньшей погрешности ОМП ВЛЭП величина шага итерационной процедуры должна быть малой, чтобы не превышать максимально допустимую погрешность расчета расстояния до места повреждения. Для протяженных ВЛЭП число шагов итерационной процедуры ОМП может находиться в пределах от сотен до тысяч единиц.

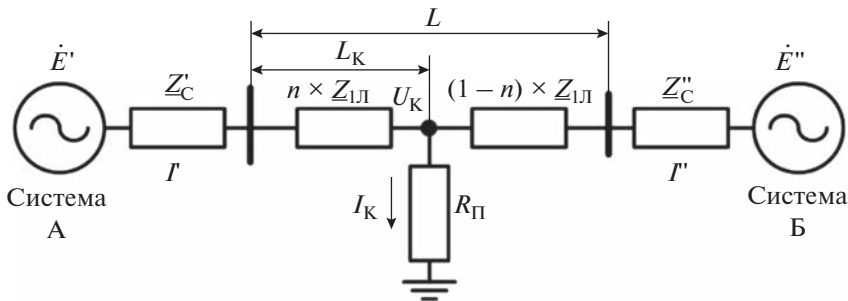


Рис. 1. Упрощенная схема одиночной ВЛЭП с двухсторонним питанием при КЗ.

В условиях децентрализации генерирующих мощностей с массовой интеграцией в магистральные и распределительные сети объектов распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, решение задачи ОМП ВЛЭП еще усложняется. Как правило, указанные объекты генерации подключаются к ВЛЭП отпайками, что существенно усложняет их конфигурацию. Кроме того, в ВЛЭП фиксируются разнонаправленные потоки мощности и их отпайках из-за быстроменяющихся режимов генерации и электропотребления в узлах сети.

Авторами предложено применение алгоритмов поиска при безусловной одномерной оптимизации для повышения быстродействия реализации итерационных процедур в устройствах ОМП ВЛЭП. В статье приведены рекомендации по выбору критериев оптимизации, а также варианты реализации вычислительных процедур. На примере двухстороннего ОМП ВЛЭП показано, что применение алгоритмов поиска позволяет существенно сократить число шагов вычислительной итерационной процедуры.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОЦЕДУРЕ ОМП ВЛЭП АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

Выполним анализ реализации процедуры ОМП ВЛЭП на примере ВЛЭП длиной L с двухсторонним питанием. На рис. 1 приведена упрощенная схема одиночной ВЛЭП с двухсторонним питанием при повреждении.

На рис. 1 ВЛЭП имеет следующие параметры: $Z_{1Л}$, $Z_{2Л}$ и $Z_{0Л}$ — полные комплексные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, при этом $Z_{1Л} = Z_{2Л}$; $Z'_{1С}$ и $Z''_{1С}$, $Z'_{2С}$ и $Z''_{2С}$, $Z'_{0С}$ и $Z''_{0С}$ — эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей со стороны системы А и со стороны системы Б соответственно; E' и E'' — эквивалентные ЭДС со стороны системы А и со стороны системы Б соответственно; $R_П$ — переходное сопротивление в месте повреждения; L_K — расстояние до места повреждения от начала ВЛЭП (система А); $n = L_K/L$.

При коротком замыкании (КЗ) терминалы РЗА, установленные по концам ВЛЭП, регистрируются по три тока и три напряжения. Ток КЗ в месте повреждения может быть вычислен по уравнению (2):

$$I_K = I' + I'' \quad (1)$$

Если известно расстояние до места повреждения L_K , то можно составить шесть уравнений (для трех фаз и трех последовательностей):

$$\dot{U}'_v - \Delta \dot{U}'_v + \Delta \dot{U}''_v - \dot{U}''_v = 0, \quad (2)$$

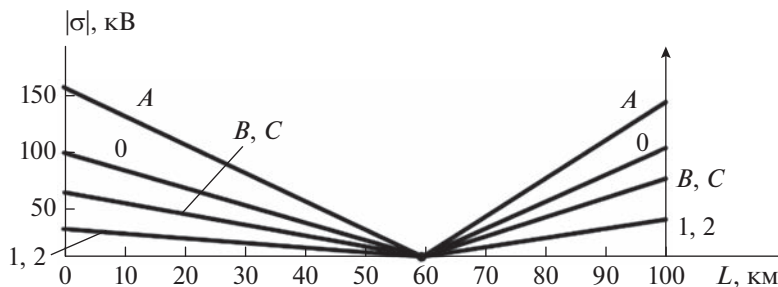


Рис. 2. График зависимости невязок уравнения (2) от расстояния до места повреждения.

где v — индекс фазы (A , B или C) или индекс последовательности (1, 2 или 0); $\Delta \dot{U}'_v$ и $\Delta \dot{U}''_v$ — падения напряжения на участке слева и справа от места КЗ, которые, например, для отдельных последовательностей определяются по уравнениям (3):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_1 &= n \dot{I}'_1 Z_{1Л}; \quad \Delta \dot{U}'_2 = n \dot{I}'_2 Z_{2Л}; \quad \Delta \dot{U}'_0 = n \dot{I}'_0 Z_{0Л}; \\ \Delta \dot{U}''_1 &= (1 - n) \dot{I}''_1 Z_{1Л}; \quad \Delta \dot{U}''_2 = (1 - n) \dot{I}''_2 Z_{2Л}; \quad \Delta \dot{U}''_0 = (1 - n) \dot{I}''_0 Z_{0Л}. \end{aligned} \quad (3)$$

Известны различные варианты решения уравнений (2). Наиболее общее решение связано с получением целевой функции и применением специальной вычислительной процедуры [19]. Общим критерием ОМП ВЛЭП с минимальной погрешностью является условие достижения целевой функцией глобального минимума на множестве варьируемых параметров. Простейшей целевой функцией может служить невязка уравнений (2), то есть отличие их правой части от нуля. Формирование значений невязок $|\sigma|$ реализуется изменением расстояния до места повреждения n (например, при $L_K \in [0; L]$) с последующим определением модуля правой части в зависимости от предполагаемого места повреждения. На рис. 2 приведен пример шести зависимостей при $R_{П} = 0$ для ВЛЭП напряжением 220 кВ длиной 100 км [9].

Наряду с общим подходом известно множество частных критериев для одно-, двух- и многосторонних методов ОМП ВЛЭП, где могут быть применены критерии оптимизации:

- минимум (равенство нулю) реактивной мощности в месте повреждения [20];
- минимум (равенство нулю) реактивного сопротивления в месте повреждения [19];
- соответствие коэффициента токораспределения зарегистрированным токам по концам ЛЭП [21];
- соответствие напряжения в месте повреждения значениям, рассчитанным с разных сторон ЛЭП по зарегистрированным токам и напряжениям [22];
- критерии, основанные на теории дистанционного замера [9];
- критерии, основанные на использовании мгновенных значений токов и напряжений;
- другие критерии, применяемые для воздушных ЛЭП различных конфигураций [23].

Варианты практического применения оптимизационных итерационных процедур при ОМП ВЛЭП по ПАР могут быть различными [24–27]. Однако следует выделить широкое применение алгоритма Ньютона–Рафсона [28–31]. Такой выбор обоснован тем, что даже в простых задачах одно- и двухстороннего ОМП целесообразна минимизация погрешности расчета расстояния до места повреждения ВЛЭП в условиях неизвестного сопротивления повреждения. Поэтому необходима реализация оптимизации

ционных алгоритмов, одновременно достигающих экстремума целевой функции минимум по двум параметрам.

Известен другой подход к ОМП ВЛЭП на основе оптимизационных процедур, применяемый на ВЛЭП с ответвлениями [32–34], где реализуется итерационный алгоритм:

- реализация имитационного моделирования анализируемой ВЛЭП;
- перемещение точки повреждения при моделировании вдоль ВЛЭП и фиксация на каждой итерации токов и напряжений по концам ВЛЭП;
- сопоставление параметров токов и напряжений, полученных при моделировании с осциллограммами аварийного режима, зафиксированным по концам ВЛЭП в момент повреждения;
- вычисление отклонений моделируемых параметров токов и напряжений от полученных по результатам обработки осциллограмм аварийного режима;
- нахождение места повреждения на ВЛЭП минимизацией отклонений параметров токов и напряжений с помощью алгоритмов оптимизации.

В состав параметров токов и напряжений могут входить амплитуды и фазы [34], коэффициенты токораспределения, потокораспределения и др. Для реализации оптимизационных процедур могут применяться как традиционные параметрические алгоритмы, так и непараметрические: генетический алгоритм [34], алгоритм, основанный на методах оптимизации китов [33] и др.

Проведенный анализ показал, что в публикациях недостаточно внимания уделено методам одномерной оптимизации и, в частности, алгоритмам поиска. Например, использование методов «золотого сечения» [35] и касательных [36] может позволить сократить число шагов вычислительной итерационной процедуры. При реализации ОМП ВЛЭП по ПАР с использованием простых методов одномерной оптимизации может содействовать созданию эффективных устройств ОМП ВЛЭП по следующим причинам:

- существуют устойчивые алгоритмы ОМП ВЛЭП по ПАР, у которых погрешность расчета расстояния до места повреждения не зависит от переходного сопротивления в месте повреждения [37, 38];
- методы одномерной оптимизации существенно проще, с точки зрения технической реализации, требуют меньшего числа вычислительных операций, времени на вычисление экстремума целевой функции и др. Поэтому их применение в устройствах ОМП ВЛЭП не приведет к усложнению и удорожанию аппаратного и программного обеспечения;
- подавляющее большинство алгоритмов ОМП ВЛЭП предполагают равномерное и однородное распределение удельного сопротивления вдоль ВЛЭП. Однако на практике ВЛЭП всегда имеют неоднородные участки. Поэтому алгоритмы многопараметрической оптимизации существенно усложняются, а их применение в устройствах ОМП неоднородных ВЛЭП становится затруднительной, а порой невозможной [39].

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВДОЛЬ ВЛЭП

В соответствии с требованиями стандарта организации [40] разрешается пренебрегать неоднородностью распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП, если погрешность ОМП ВЛЭП возрастает не более, чем на 2%.

Участки протяженных ВЛЭП, находящихся в эксплуатации в электросетевых компаниях, могут включать провода разных марок, подвешенных на опорах различных типов, при этом трасса линии часто проходит по местности с отличающимися характеристиками грунтов [41, 42].

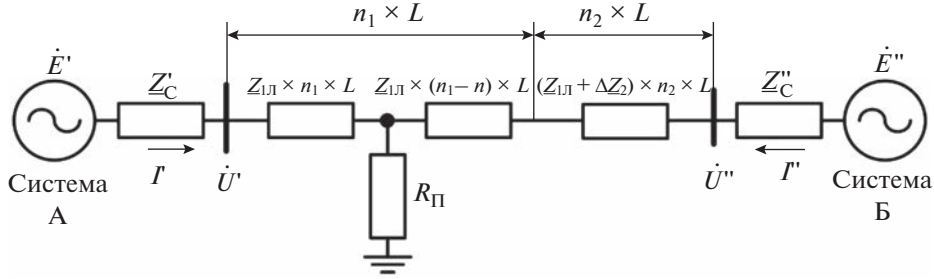


Рис. 3. Схема замещения неоднородной одноцепной ВЛЭП с двумя участками.

Схема замещения одноцепной ВЛЭП, состоящей из двух неоднородных участков разной длины $n_1 L$ и $n_2 L$ с сопротивлениями $Z_{1Л} n_1 L$ и $(Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) n_2 L$, приведена на рис. 3.

С учетом металлического КЗ ($R_{П} = 0$), а также однородного удельного сопротивления участков ВЛЭП, погрешность расчета расстояния до места повреждения на участке $n_1 L$ будет определяться по уравнению (4):

$$\Delta n_1 = [(Z_{1Л}/Z_{Л}) - 1]n, \quad (4)$$

где $Z_{Л} = Z_{1Л} n_1 + (Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) n_2$.

При этом максимальное значение погрешности ОМП ВЛЭП достигается, когда КЗ имеет место в конце участка $n_1 L$ и соответствует уравнению (5):

$$\Delta n_{1\max} = [(Z_{1Л} - (Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л})) n_1 + (Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) n_2] / Z_{Л} = [(Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) n_2 - Z_{2Л} n_1] / Z_{Л}. \quad (5)$$

При КЗ на втором участке ВЛЭП погрешность расчета расстояния до места повреждения следует определять по уравнению (6):

$$\Delta n_2 = [(Z_{1Л} - (Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л})) n_1 + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) - Z_{Л}) n] / Z_{Л}, \quad (6)$$

которая принимает максимальное значение при $n = n_2$

$$\Delta n_{2\max} = [(Z_{1Л} - Z_{Л}) n_1 + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{2Л}) - Z_{Л}) n_2] / Z_{Л}. \quad (7)$$

Анализ уравнений (4), (6) показывает, что величина погрешности изменяется по линейному закону, причем $\Delta Z_{2Л}$ может иметь как положительный, так и отрицательный знак. На рис. 4 представлена зависимость погрешности расчет при ОМП ВЛЭП для случаев, когда $\Delta Z_{2Л} < 0$ и $\Delta Z_{2Л} > 0$, а максимальное значение погрешности достигается в конце первого участка ВЛЭП.

Обобщая подходы к расчету погрешности ОМП ВЛЭП, включающую N неоднородных участков, перейдем к уравнению (8) для расчета погрешности при КЗ на N -ом участке ВЛЭП:

$$\begin{aligned} \Delta n_N = & [(Z_{1Л} - (Z_{1Л} + \Delta Z_{NЛ})) n_1 + \sum_{i=2}^{N-1} \{(Z_{1Л} + \Delta Z_{iЛ}) - (Z_{1Л} + \Delta Z_{NЛ})\} n_i + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{NЛ}) - \\ & - Z_{Л}) n] / Z_{Л} = \left[\sum_{i=2}^{N-1} (\Delta Z_{iЛ} - \Delta Z_{NЛ}) n_i - \Delta Z_{NЛ} n_1 + ((Z_{1Л} + \Delta Z_{NЛ}) - Z_{Л}) n \right] / Z_{Л}. \end{aligned} \quad (8)$$

Исходя из требований [40] при оценке величины максимальной погрешности необходимо рассматривать КЗ в конце каждого участка ВЛЭП и выбирать наибольшее из

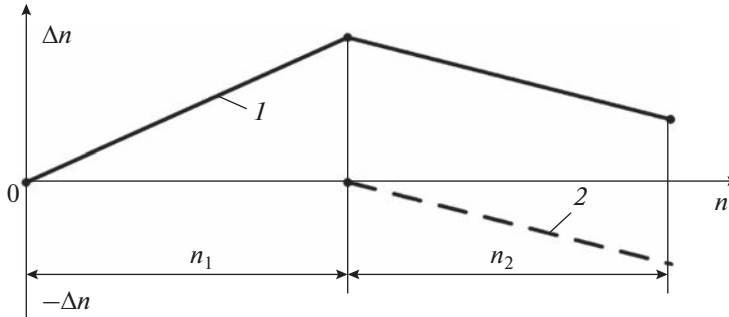


Рис. 4. Зависимость погрешности расчета при ОМП ЛЭП: 1 — соответствует $\Delta Z_{Л2} < 0$; 2 — соответствует $\Delta Z_{Л2} > 0$.

них, которое и определяет допустимость пренебрежения неоднородностью ВЛЭП. Величина максимальной погрешности на N -м участке следует определять по уравнению (9):

$$\Delta n_{N\text{макс}} = [(\underline{Z}_{Л1} - \underline{Z}_{Л})n_1 + \sum_{i=2}^{N-1} \{(\underline{Z}_{Л1} + \Delta \underline{Z}_{Лi}) - \underline{Z}_{Л}\}n_i + ((\underline{Z}_{Л1} + \Delta \underline{Z}_{ЛN}) - \underline{Z}_{Л})n_N] / \underline{Z}_{Л}. \quad (9)$$

Для ОМП ВЛЭП с меньшей погрешностью следует учитывать неоднородные участки. При повреждениях на каждом из участков имеет место индивидуальная погрешность ОМП ВЛЭП (уравнение (8)), зависящая от соотношений удельных значений сопротивления отдельных участков ВЛЭП. Это существенно усложняет процедуру расчета расстояния до места повреждения.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОДНОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ОМП ВЛЭП

Рассмотрим применение численных методов одномерной оптимизации для ОМП ВЛЭП. Задача ОМП ВЛЭП может быть сведена к отысканию наименьшего значения некоторой функции, которая выбирается в качестве целевой. Такой подход является универсальным и может быть применен как для однородных, так и для неоднородных ВЛЭП. Можно принять, что целевые функции, характеризующие распределение параметров ВЛЭП, зарегистрированных токов и напряжений, являются непрерывными и дифференцируемыми.

Пусть $f(x)$ непрерывная функция на отрезке $[a, b]$. Задачу отыскания минимума функции запишем в виде:

$$f(x) \rightarrow \min; \quad x[a, b]. \quad (10)$$

Решение задачи (10) обозначим через $x_{\text{опт}}$:

$$f(x_{\text{опт}}) = \min_{[a, b]} f(x). \quad (11)$$

Отметим, что максимизация целевой функции ($f(x) \rightarrow \max$) эквивалентна минимизации противоположной величины ($-f(x) \rightarrow \min$), поэтому без ущерба для общности будем рассматривать только задачи минимизации.

В силу специфических особенностей ОМП ВЛЭП при решении задачи оптимизации имеют место, как правило, унимодальные функции, у которых локальный минимум является одновременно и глобальным, поэтому $f(x)$ — выпуклая функция (вторая производная $f''(x) \geq 0$ на участке $[a, b]$).

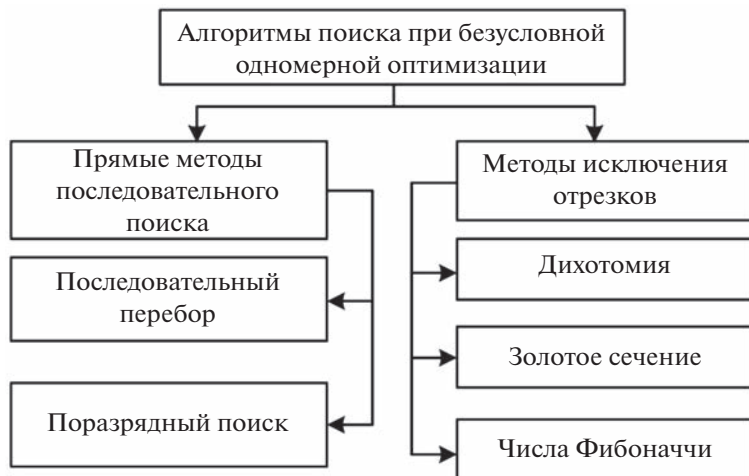


Рис. 5. Классификация алгоритмов поиска при безусловной одномерной оптимизации.

Использование некоторых методов одномерной оптимизации возможно только в том случае, когда скорость изменения целевой функции $f(x)$ на любых участках отрезка $[a, b]$ ограничена некоторым числом, одним и тем же для всех участков. Тогда говорят, что $f(x)$ удовлетворяет условию Липшица, которое соблюдается, если существует такое число $\Theta > 0$ (константа Липшица), что:

$$f(x') - f(x'') \leq \Theta |x' - x''| \quad (12)$$

для всех x' и x'' , принадлежащих $[a, b]$.

Методы, использующие только значения функции, и не требующие вычисления производных называют прямыми методами оптимизации. В этом случае функция $f(x)$ может не задаваться в аналитическом виде, но важно, чтобы имелась возможность определения функции $f(x)$ в заданных точках. На рис. 5 приведена классификация алгоритмов поиска при безусловной одномерной оптимизации, основанных на различных математических методах.

Простейшим способом решения задачи является метод последовательного перебора (рис. 5), а характерным примером его использования последовательного перебора является итерационный метод ОМП по ПАР при односторонних измерениях на ВЛЭП [21]. Такой метод применим не только к однородным ВЛЭП, но и при некоторой его модернизации к ВЛЭП, включающим неоднородные участки. Поясним реализацию итерационного ОМП ВЛЭП на примере одиночной однородной ВЛЭП (рис. 1).

При КЗ на ВЛЭП в устройствах ОМП ВЛЭП фиксируются токи $\dot{I}'$ (со стороны Системы А) и $\dot{I}''$ (со стороны Системы Б) и напряжения $\dot{U}'$ (на шинах Системы А) и $\dot{U}''$ (на шинах системы Б). Полный ток КЗ через переходное сопротивление $\dot{I}_K$ складывается из составляющих тока КЗ от Системы А $\dot{I}'_{Kав}$ и от Системы Б $\dot{I}''_{Kав}$ в аварийном режиме.

Напряжение в устройствах ОМП ВЛЭП в начале ВЛЭП $\dot{U}'$ равно сумме падений напряжений на ВЛЭП до места повреждения $\Delta \dot{U}'_{л}$ и на переходном сопротивлении $\Delta \dot{U}'_{RP}$, которое рассчитывается по уравнению (13):

$$\dot{U}' = \Delta \dot{U}'_{л} + \Delta \dot{U}'_{RP} = \dot{I}' n Z_{лл} + \dot{I}_K R_{П}, \quad (13)$$

где $n = L_K/L$ — расстояние от Системы А до места повреждения, о.е.

В уравнении (13) значения $\dot{U}'$, $\dot{I}'$ и $\dot{I}_K$ определяются в зависимости от вида повреждения в соответствии с рекомендациями [9, 12].

В уравнении (13) присутствует два неизвестных — это расстояние до места повреждения l и ток в месте повреждения $\dot{I}_K$, для определения которого необходим ток не только со стороны Системы А, но и со стороны Системы Б. Поэтому точное расстояние до места повреждения на ВЛЭП по уравнению (13) может быть определено только при помощи итерационного процесса, в ходе которого уточняется значение тока в месте повреждения путем приближения к истинному значению коэффициента токораспределения.

Задача ОМП ВЛЭП может быть решена при помощи алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 6, названного методом полного сопротивления [21].

Поясним последовательность реализации шагов при ОМП ВЛЭП методом полного сопротивления (рис. 6).

1. Для выполнения процедуры ОМП в устройство ОМП ВЛЭП должны быть введены следующие характеристики: полная длина ЛЭП — L ; величина δ , определяющая погрешность расчета (снижение погрешности ведет к увеличению количества итераций); полные продольные сопротивления прямой и нулевой последовательностей ЛЭП ($Z_{1Л}$ и $Z_{0Л}$); сопротивление со стороны Системы А (места установки устройства ОМП ВЛЭП). Эти сопротивления рассчитываются по параметрам аварийного режима по уравнению (14):

$$Z'_{1C} = Z'_{2C} = \dot{U}'_2 / \dot{I}'_2; \quad Z'_{0C} = \dot{U}'_0 / \dot{I}'_0. \quad (14)$$

2. Сопротивление со стороны Системы Б (противоположный конец ВЛЭП по отношению к месту установки устройства ОМП) — Z''_{1C} , в отличие от сопротивления со стороны Системы А — Z'_{1C} (начало ВЛЭП), не может быть рассчитано по параметрам аварийного режима. Это обусловлено тем, что при одностороннем методе ОМП по ПАР не используются каналы связи для передачи информации с противоположного конца ВЛЭП. Поэтому данное сопротивление должно задаваться заранее или изменяться в зависимости от токов и напряжений в начале ВЛЭП, исходя из накопленных эмпирических данных. При этом возникает погрешность, так как в момент КЗ сопротивление со стороны Системы Б отличается от сопротивления в предаварийном режиме из-за работы автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов на электростанциях и изменения конфигурации сети.

3. В момент повреждения на ВЛЭП на основе введенных уставок определяется в первом приближении расстояние до места повреждения $n_{(i)}$ при использовании допущения, что коэффициент токораспределения $\underline{C}'_{1(i)}$ — действительное число (при $i = 0$).

4. Запускается итерационный процесс, в ходе которого уточняется коэффициент токораспределения $\underline{C}'_{1(i+1)}$, а также расстояние до места повреждения $n_{(i+1)}$, где i — номер итерации.

5. По окончании каждой итерации проверяется соблюдение условия:

$$|n_{(i)} - n_{(i+1)}| \leq \delta. \quad (15)$$

Если условие неравенства (15) не соблюдается, то процесс переходит на следующую итерацию и повторяет п. 3. Если условие неравенства (15) соблюдается, то итерационный процесс заканчивается и расстояние до места повреждения в относительных единицах определяется по уравнению (16):

$$L_k = n_{(i+1)} L. \quad (16)$$

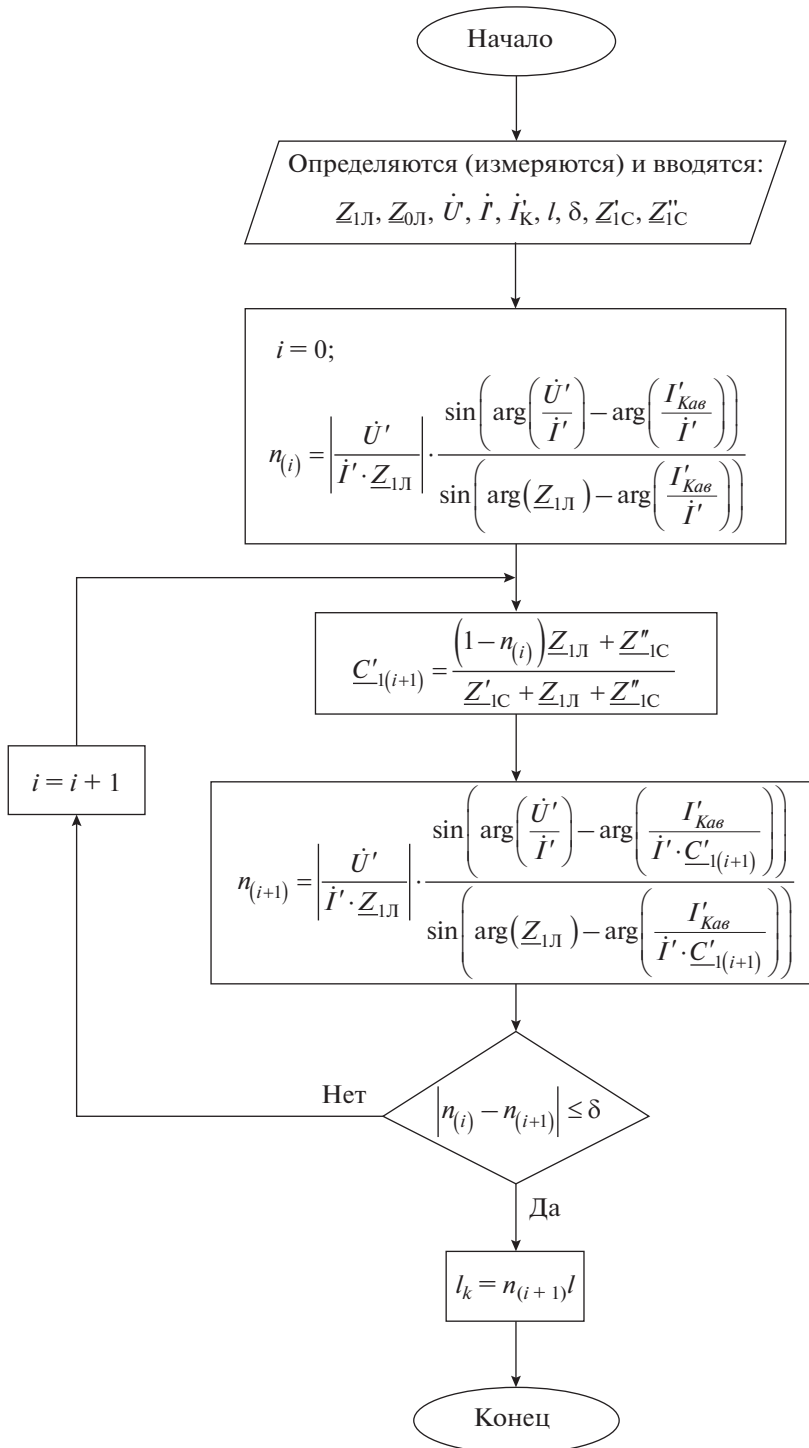


Рис. 6. Блок-схема алгоритма ОМП ВЛЭП на основе метода полного сопротивления для одноцепной ВЛЭП с двухсторонним питанием.

Высокая точность итерационного способа ОМП ВЛЭП подтверждается результатами имитационного моделирования [21].

Усовершенствованный метод последовательного перебора называется методом поразрядного поиска и характеризуется уменьшенным количеством значений $f(x)$, которые необходимо находить в процессе поиска экстремума функции. Если $f(x_i) \leq f(x_{i+1})$, то отпадает необходимость вычислять $f(x)$ в точках x_{i+2} , x_{i+3} и т.д., поскольку из унимодальности функции следует, что $x_{\text{опт}} \leq x_{i+1}$.

Целесообразно сначала определить участок ВЛЭП, содержащий точку $x_{\text{опт}}$ с большой точностью, а затем искать ее на этом участке с меньшим шагом. Именно такая логика реализована в методе поразрядного поиска, в котором перебор точек участка происходит сначала с шагом $\Delta x = x_{i+1} - x_i > \delta$ до тех пор, пока не выполнится условие $f(x_i) \leq f(x_{i+1})$ или пока очередная из этих точек не совпадет с концом участка ВЛЭП. После этого шаг уменьшается (обычно в четыре раза), и перебор точек с новым шагом производится в противоположном направлении до тех пор, пока значения $f(x)$ не перестанут уменьшаться, или очередная точка не совпадет с концом участка ВЛЭП. Блок-схема алгоритма ОМП ВЛЭП на основе метода поразрядного поиска приведена на рис. 7а.

Процесс расчета расстояния до места повреждения завершается тогда, когда перебор в заданном направлении закончен, а использованный при этом шаг дискретизации не превышает погрешность δ .

Рассмотрим вопрос применения методов исключения участков при ОМП ВЛЭП. Один из наиболее эффективных путей поиска $x_{\text{опт}}$ при организации процедуры ОМП ВЛЭП следует из определения унимодальных функций.

Пусть $a < x_1 < x_2 < b$, тогда сравнив значения $f(x_1)$ и $f(x_2)$ можно сократить участок поиска $x_{\text{опт}}$, переходя к участку $[a, x_1]$, если $f(x_1) < f(x_2)$, или к участку $[x_1, b]$, если $f(x_1) > f(x_2)$.

Приведенную процедуру можно повторить несколько раз, последовательно уменьшая участок ВЛЭП, содержащий точку минимума. В зависимости от способа выбора анализируемых точек применяются различные методы (рис. 5) исключения отрезков (дихотомии, золотого сечения, чисел Фибоначчи и др.).

Рассмотрим применение методов исключения отрезков на примере дихотомии. При этом выбирается малая величина E , принадлежащая промежутку $E \in [0; 2\delta]$, где δ — погрешность ОМП ВЛЭП (рис. 7б).

Относительно середины отрезка $[a, b]$ определяют точки по уравнению (17):

$$x_1 = (a + b)/2 + E/2, \quad x_2 = (a + b)/2 - E/2, \quad (17)$$

а также значения функции $f(x)$ в этих точках $f_1 = f(x_1)$, $f_2 = f(x_2)$.

Проверим условие $f_1 \leq f_2$ (рис. 7б) и в зависимости от соотношения f_1 и f_2 произведем выбор точек для формирования отрезка для последующего анализа. Отношение длины нового отрезка к длине предыдущего будет следующим:

$$(b - x_1)/(b - a) = (x_1 - a)/(b - a) \approx 0.5. \quad (18)$$

Итерационный процесс завершается, когда для очередного отрезка длина составит $(b - a) < 2\delta$. На последнем шаге итерационного процесса определяется оптимальное значение аргумента функции $f(x)$, составляющее $x_{\text{опт}} = (a + b)/2$.

Необходимое число итераций при использовании метода дихотомии [41] для обеспечения заданной погрешности δ ОМП ЛЭП определяется из условия:

$$m \geq \log_2[(b - a - E)/(2\delta - E)]. \quad (19)$$

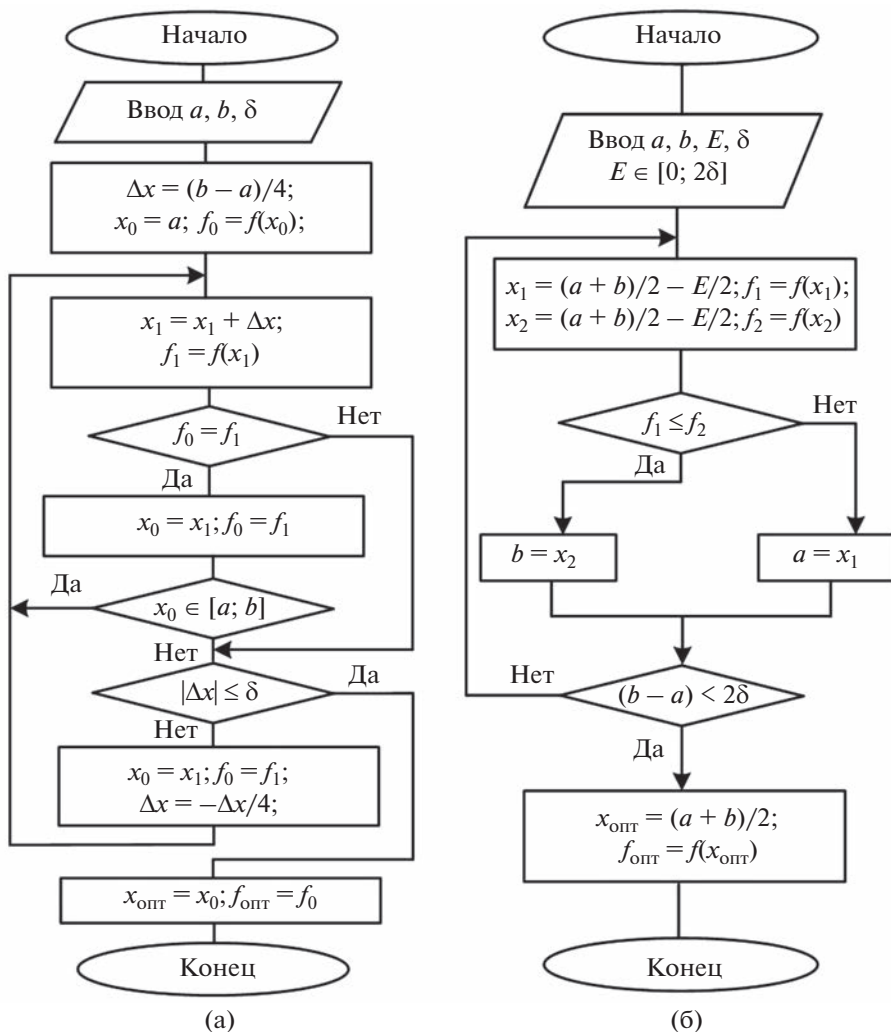


Рис. 7. Блок-схемы алгоритмов ОМП ВЛЭП на основе методов: (а) – поразрядного поиска; (б) – дихотомии.

Требуемое количество вычислений целевой функции $f(x)$ должно быть $M = 2m$, а гарантированная погрешность расчетов после m итераций составит:

$$\delta(m) = (b - a)/(2^{m+1}). \quad (20)$$

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПОРАЗРЯДНОГО ПОИСКА И ДИХОТОМИИ ПРИ ОМП НЕОДНОРОДНОЙ ВЛЭП

Рассмотрим примеры применения методов поразрядного поиска и дихотомии при ОМП ВЛЭП на неоднородной ВЛЭП.

Выше отмечалось, что для точного ОМП ВЛЭП необходимо учитывать ее неоднородные участки. При повреждениях на каждом из участков ВЛЭП имеет место индивидуальная погрешность ОМП ВЛЭП, зависящая от соотношения удельных значений

сопротивлений отдельных участков ВЛЭП, и существенно усложняющая процедуру расчета расстояния до места повреждения.

В [42] установлены следующие требования для определения зоны осмотра ВЛЭП. После аварийного отключения ВЛЭП по данным устройств ОМП ВЛЭП протяженность зоны осмотра должна быть не более:

- $\pm 15\%$ длины ВЛЭП при ее протяженности до 50 км включительно;
- $\pm 10\%$ для ВЛЭП протяженностью более 50 км до 100 км включительно;
- $\pm 7\%$ для ВЛЭП протяженностью от 100 до 300 км включительно;
- $\pm 5\%$ для ВЛЭП протяженностью от 300 км и более.

Допускается принимать величину зоны осмотра на основе опыта эксплуатации и статистических данных показаний устройств ОМП ВЛЭП в данной электросетевой компании.

Поэтому на ВЛЭП с неоднородным распределением удельного сопротивления вдоль ВЛЭП следует увеличивать зону осмотра на величину максимальной погрешности (уравнение (9)). Это необходимо для исключения случаев, когда место повреждения на ВЛЭП окажется за пределами зоны осмотра. Для реализации быстрогодействующего и точного ОМП ВЛЭП наиболее перспективным является подход, при котором сначала рассчитывается расстояние до места повреждения по уравнению для однородных ВЛЭП, определяется расширенная зона осмотра с учетом погрешности ОМП ВЛЭП из-за неоднородного распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП. Далее в пределах расширенной зоны осмотра реализуется алгоритм ОМП ВЛЭП для неоднородной ВЛЭП с целью уточнения величины зоны осмотра.

Для иллюстрации применения численных методов одномерной оптимизации воспользуемся данными, полученными с эксплуатируемой ВЛЭП напряжением 220 кВ, протяженностью $L = 120$ км при КЗ на ней. ВЛЭП является неоднородной, состоящей из трех участков, причем:

$$\underline{Z}_L = \underline{Z}_{1L}n_1 + (\underline{Z}_{1L} + \Delta\underline{Z}_{L2})n_2 + (\underline{Z}_{1L} + \Delta\underline{Z}_{L3})n_3,$$

где $n_1 = n_2 = n_3 = 1/3$; $\Delta\underline{Z}_{L2} = -0.15\underline{Z}_{1L}$; $\Delta\underline{Z}_{L3} = -0.3\underline{Z}_{1L}$.

Для простоты расчетов перейдем от комплексных значений к амплитудным значениям токов и напряжений. Зафиксированные фактические значения амплитуд токов и напряжений по концам реальной ВЛЭП составили: $I = 2.0$ кА, $I'' = 0.56$ кА, $U' = 40$ кВ, $U'' = 28$ кВ. Реализуем расчет расстояния до места повреждения с использованием двухсторонних измерений токов и напряжений.

На первом этапе не будем учитывать неоднородности сопротивлений на участках ВЛЭП (фиг. 1). Основные расчетные соотношения метода ОМП сформируем, исходя из измерений модулей токов и напряжений по концам ВЛЭП I , I'' , U' , U'' , а также уравнений (21):

$$I' n \underline{Z}_L + U' = U_K; \quad I''(1 - n) \underline{Z}_L + U'' = U_K, \quad (21)$$

где U_K – напряжение в месте КЗ.

Расчет по уравнению (21) выполним по составляющим нулевой последовательности, при этом удельное сопротивление $z_0 = 3 \times 0.426 = 1.278$ Ом/км, а $\underline{Z}_L = Lz_0$. Выполним расчет расстояния до места повреждения на ВЛЭП посредством совместного решения уравнений (21), с подстановкой z_0 , что соответствует расчетным уравнениям:

$$n = [U'' - U' + I'' z_0] / [(I' + I'') z_0] = [28 - 40 + 0.56 \times 1.278] / [(2.0 + 0.56) \times 1.278] = 0.188; \quad (22)$$

$$L_K = nL = 22.582 \text{ км.}$$

Зададим допустимую погрешность расчета расстояния до места повреждения на ВЛЭП с неоднородным распределением удельного сопротивления на основании опыта эксплуатации ВЛЭП. Оперативно-технологический персонал электросетевых компа-

ний считает низкой погрешность расчета расстояния до места повреждения на ВЛЭП, если она не превышает длину одного пролета ВЛЭП. Длина одного пролета ВЛЭП напряжением 220 кВ составляет 250–350 м, поэтому допустимую погрешность расчета расстояния до места повреждения зададим в виде $\delta = 0.3$ км.

Примем, что по результатам предварительных расчетов ОМП ВЛЭП, с учетом неоднородности участков ВЛЭП, среднее расстояние до места повреждения составило $L'_K = 19.2$ км. При имитационном моделировании для получения среднего расстояния до места повреждения могут учитываться множественные случайные факторы, а его результаты могут отличаться от реальных величин из-за текущего сочетания случайных факторов. Поэтому погрешность реализации ОМП ВЛЭП из-за неучета неоднородного распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП будет равна:

$$\Delta L_K = L_K - L'_K = 22.582 - 19.2 = 3.382 \text{ км.}$$

Сформируем расширенную зону осмотра ВЛЭП линейной бригадой для рассматриваемого примера ($\pm 7\%$) для ВЛЭП протяженностью от 100 до 300 км включительно ($\pm 120 \times 0.07 = 8.4$ км) с учетом погрешности ОМП ВЛЭП величиной $\pm \Delta L_K = 3.382$ км. Расширенная зона осмотра ВЛЭП составит ± 12.382 км, а относительно места повреждения $L_K = 22.582$ км она будет соответствовать участку ВЛЭП с 10.2 км по 34.964 км.

При реализации разработанного способа ОМП ВЛЭП воспользуемся итерационным алгоритмом на основе метода поразрядного поиска, обеспечивающего расчет расстояния до места повреждения на ВЛЭП с неоднородным распределением удельного сопротивления вдоль ВЛЭП с заданной допустимой погрешностью $\delta = 0.3$ км. Вычислительный алгоритм итерационной процедуры поразрядного поиска (рис. 7а) реализуется в пределах расширенной зоны осмотра ВЛЭП в пределах $a = 10.2$ км и $b = 34.964$ км.

Применение критерия равенства напряжений, рассчитанных с двух сторон ВЛЭП, позволяет сформировать требуемую целевую функцию итерационного алгоритма $f(x) = \Delta U$, обеспечивающую минимум модуля разности напряжений ΔU в точке КЗ (U_K) (уравнение (21)), рассчитанных с разных сторон ЛЭП:

$$\Delta U = [I' n Z_L + U'] - [I''(1 - n) Z_L + U'']. \quad (23)$$

Уравнение (23) справедливо для однородной ВЛЭП, поэтому при наличии участков с неоднородным сопротивлением необходимо специально учитывать падение напряжения на этих участках.

Выполним пошаговый расчет расстояния до места повреждения для неоднородной ВЛЭП с применением метода поразрядного поиска при выбранной целевой функции (23).

На первом шаге: $x_0 = a = 10.2$ км; $\Delta x = (b - a)/4 = (34.964 - 10.2)/4 = 6.191$ км;

$$\begin{aligned} f_0 = f(x_0) = \Delta U &= [2.0 \times 10.2 \times 1.278 + 40] - \\ &- [0.56 \times 1.278(40 - 10.2 + 40 \times 0.85 + 40 \times 0.7) + 28] = 27.63 \text{ кВ;} \\ x_1 &= x_0 + (b - a)/4 = 10.2 + (34.964 - 10.2)/4 = 16.391 \text{ км;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_1 = f(x_1) = \Delta U &= [2.0 \times 16.391 \times 1.278 + 40] - \\ &- [0.56 \times 1.278(40 - 16.391 + 40 \times 0.85 + 40 \times 0.7) + 28] = 7.37 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

На втором шаге: $x_0 = 16.391$ (км); $f_0 = f(x_0) = \Delta U = 7.37$ кВ;

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + \Delta x = 16.391 + 6.191 = 22.582 \text{ км;} \\ f_1 = f(x_1) = \Delta U &= [2.0 \times 22.582 \times 1.278 + 40] - \\ &- [0.56 \times 1.278(40 - 22.582 + 40 \times 0.85 + 40 \times 0.7) + 28] = 12.88 \text{ кВ;} \\ \Delta x &= -\Delta x/4 = -1.55. \end{aligned}$$

Таблица 1. Пример реализации ОМП ВЛЭП на основе метода поразрядного поиска

Шаг	x_0 , км	$f_0 = f(x_0)$, кВ	x_1 , км	$f_1 = f(x_1)$, кВ	$f_0 > f_1$	Δx , км
1.	10.2	27.63	16.391	7.37	Да	6.191
2.	16.391	7.37	22.582	12.88	Нет	-1.55
3.	16.391	7.37	14.841	12.44	Нет	0.39
4.	14.841	12.44	15.231	11.17	Да	0.39
5.	15.231	11.17	15.621	9.89	Да	0.39
6.	15.621	9.89	16.011	8.62	Да	0.39
7.	16.011	8.62	16.401	7.34	Да	0.39
8.	16.401	7.34	16.791	6.06	Да	0.39
9.	16.791	6.06	17.181	4.79	Да	0.39
10.	17.181	4.79	17.571	3.51	Да	0.39
11.	17.571	3.51	17.961	2.37	Да	0.39
12.	17.961	2.37	18.351	0.96	Да	0.39
13.	18.351	0.96	18.741	0.315	Да	0.39
14.	18.741	0.315	19.131	1.59	Нет	-0.098
15.	19.131	1.59	19.033	1.17	Да	-0.098
16.	19.033	1.17	18.935	0.95	Да	-0.098
17.	18.935	0.95	18.837	0.63	Да	-0.098
18.	18.837	0.63	18.739	0.3	Да	-0.098
19.	18.739	0.3	18.641	0.012	Да	-0.098
20.	18.641	0.012	18.543	0.33	Нет	—
						$x_{\text{опт}} = 18.641$ км

На третьем шаге: $x_0 = 16.391$ (км); $f_0 = f(x_0) = \Delta U = 7.37$ кВ;

$$x_1 = x_0 + \Delta x = 16.391 - 1.55 = 14.841 \text{ км};$$

$$f_1 = f(x_1) = \Delta U = \llbracket 2.0 \times 14.841 \times 1.278 + 40 \rrbracket - \\ - \llbracket 0.56 \times 1.278 (40 - 14.841 + 40 \times 0.85 + 40 \times 0.7) + 28 \rrbracket = 12.44 \text{ (кВ)};$$

$$\Delta x = -\Delta x / 4 = 1.55 / 4 = 0.39.$$

Полученные аналогичным образом переменные, в соответствии с алгоритмом на рис. 7а, внесены в табл. 1.

Таким образом, расстояние до места повреждения составляет $L_K = 18.641$ км, а для его расчета потребовалось $m_1 = 20$ шагов итерационной процедуры, организованной по методу поразрядного поиска (рис. 8).

Уточнение зоны осмотра ВЛЭП линейной бригадой выполним в соответствии с требованиями [42], то есть ($\pm 7\%$) для ВЛЭП протяженностью от 100 до 300 км вклю-

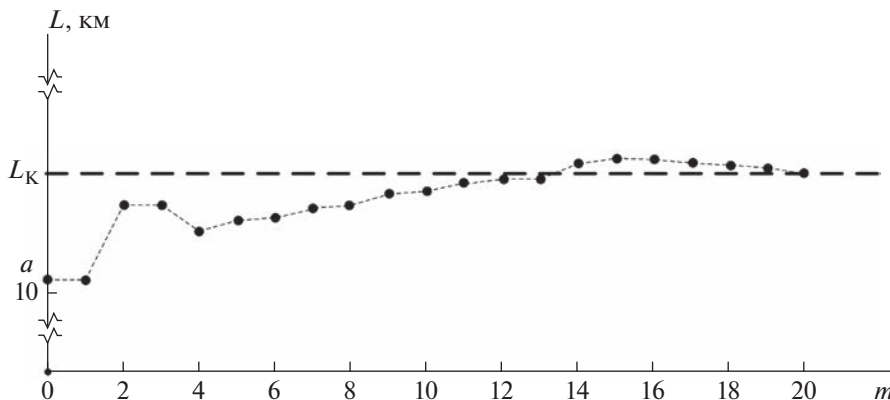


Рис. 8. График реализации ОМП ВЛЭП по ПАР на основе метода поразрядного поиска.

чительно ($\pm 120 \times 0.07 = 8.4$ км). Таким образом, уточненная зона обхода будет соответствовать участку ВЛЭП с 10.241 км по 27.041 км.

Так как при реализации ОМП ВЛЭП предполагаемое место повреждения может оказаться в любой точке неоднородной ВЛЭП, то в условиях примера для простого метода последовательного перебора требуемое число итерационных шагов при повреждении в конце ВЛЭП составит $m_2 = L/\delta = 120/0.3 = 400$. Выигрыш в быстродействии при реализации метода поразрядного поиска, по сравнению с методом последовательного перебора, составит $w = m_2/m_1 = 20$ раз.

Выигрыш в быстродействии итерационных процедур w во многом зависит от предварительно задаваемой погрешности δ ОМП ВЛЭП (рис. 8), причем чем меньше погрешность, тем выигрыш существеннее.

По результатам вычислений (табл. 1) погрешность реализации ОМП ВЛЭП из-за неучета неоднородного распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП будет составлять:

$$\Delta L_K = L_K - L'_K = 22.582 - 18.641 = 3.941 \text{ км},$$

или 3.28% от длины ВЛЭП.

Предложенный вариант реализации ОМП ВЛЭП имеет погрешность, которая не превышает $\delta = 0.3$ км, или 0.25% от длины ВЛЭП.

Если не использовать двухэтапную процедуру и реализовать итерационное ОМП ВЛЭП на протяжении всей длины ВЛЭП, то при этом может быть существенно увеличено число шагов m .

$$\begin{aligned} x_0 &= 0 (n = 0); \quad f_0 = f(x_0) = \Delta U = |U_1 - [I_2 \times 0.85 \times 120 Z_{\text{Л}} + U_2]| = \\ &= |40 - 0.85 \times 0.56 \times 120 \times 1.278 + 28| = 61.0 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$x_1 = x_0 + (b - a)/4 = 30 \text{ км} (n = 0.25);$$

$$\begin{aligned} f_1 = f(x_1) = \Delta U &= |[2.0 \times 0.25 \times 120 \times 1.278 + 40] - [0.56 \times 0.6 \times 120 \times 1.278 + 28]| = \\ &= 37.15 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\Delta x = 120/4 = 30 \text{ км}.$$

Полученные аналогичным образом переменные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пример реализации ОМП ВЛЭП при отказе от двухэтапной процедуры

Шаг	x_0/n , км/о.е.	$f_0 = f(x_0)$, кВ	x_1/n , км/о.е.	$f_1 = f(x_1)$, кВ	$f_0 > f_1$	Δx , км
1.	0/0	61.0	30/0.25	37.15	Да	30
2.	30/0.25	37.15	60/0.5	125.5	Нет	–7.5
3.	60/0.5	125.5	52.5/0.438	88.64	Да	–7.5
–	–	–	–	–	–	–
29.	18.504/0.154	0.539	18.621/0.155	0.148	Да	0.117
30.	18.621/0.155	0.148	18.738/0.156	0.248	Нет	–
$x_{\text{опт}} = 18.621$ (км)						

Анализ данных из табл. 2 показывает, что расстояние до места повреждения составило $L_K = x_{\text{опт}} = 18.621$ км, что соответствует величине из табл. 1, но для его вычисления потребовалось $m_1 = 30$ шагов итерационной процедуры, организованной по методу поразрядного поиска. В этом случае выигрыш в быстродействии, связанный с применением метода поразрядного поиска по сравнению с последовательным перебором равен $w = m_2/m_1 = 13.33$ раза.

Обеспечение большого выигрыша в быстродействии позволяет достигнуть использование методов исключения отрезков (рис. 5). Например, метод дихотомии (уравнение (19)) для рассмотренного примера при $E = \delta$ требует реализации минимального числа $m_3 = \log_2[(L - \delta)/\delta] = \log_2[(120 - 0.3)/0.3] = \log_2[399] \approx 9$ шагов, с соответствующим выигрышем $w = m_2/m_3 = 44.44$ раз.

ВЫВОДЫ

Большинство известных алгоритмов ОМП ВЛЭП по параметрам аварийного режима исходят из предположения о равномерности распределения удельного сопротивления вдоль ВЛЭП. Применение этих алгоритмов при ОМП ВЛЭП на ВЛЭП, имеющих неоднородности, будут приводить к существенным погрешностям при расчете расстояния до места повреждения.

При реализации итерационных алгоритмов ОМП ВЛЭП как на однородных, так и неоднородных ВЛЭП, эффективно использование алгоритмов поиска. Результатами расчетов доказано, что применение предложенных авторами алгоритмов поиска позволяет от десятков до сотен раз сократить время, необходимое для вычисления расстояния до места повреждения.

Дополнительным преимуществом применения предложенных авторами алгоритмов поиска при ОМП ВЛЭП является то, что их реализация возможна в программном обеспечении типовых терминалов релейной защиты и автоматики, при этом не требуется модернизация их аппаратного исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Montoya F.G., Baños R., Alcayde A., Manzano-Agugliaro F. Optimization Methods Applied to Power Systems // Energies. 2019. V. 12. № 12. 2302.
2. Панков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения. – Нижний Новгород: Научно-издательский центр “XXI век”, 2021. – 160 с.

3. *Lu Z., Xu X., Yan Z., Wu J., Sang D., Wang S.* Overview on Data-Driven Optimal Scheduling Methods of Power System in Uncertain Environment // *Automation of Electric Power Systems*. 2020. V. 44. № 21. P. 172–183.
4. *Stringfield T.W., Marihart D.J., Stevens R.F.* Fault location methods for overhead lines // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1957. V. 76. № 3. P. 518–530.
5. *Висящев А.Н.* Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. Ч. 1. 188 с.; Ч. 2. 146 с.
6. *Born E., Jaeger J.* Device locates point of fault on transmission lines // *Elect. World*. 1967. V. 168. P. 133–134.
7. *Малый А.С., Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И.* Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. — М.: Энергия, 1972. — 215 с.
8. *Schweitzer E.O.* A review of impedance-based fault locating experience. In *Proceedings of the 14th Annual Iowa–Nebraska System Protection Seminar*. 1990. P. 1–31.
9. *Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.* Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. В.А. Шуина. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 272 с.
10. *Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E.* Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010. — 437 p.
11. *Voropai N.I., Golub I.I., Efimov D.N., Iskakov A.B., Yadykin I.B.* Spectral and Modal Methods for Studying Stability and Control of Electric Power Systems // *Automation and Remote Control*. 2020. V. 81. № 10. P. 1751–1774.
12. *Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С.* Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Под ред. Г.М. Шалыта. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 207 с.
13. *Lebedev V., Filatova G., Timofeev A.* Increase of accuracy of the fault location methods for overhead electrical power lines // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, 3098107.
14. *Куликов А.Л.* Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / Под ред. М.Ш. Мисриханова. — Нижний Новгород, Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. — 315 с.
15. *Krzysztof G., Kowalik R., Rasolomampionona D.D., Anwar S.* Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview // *Journal of Electrical Systems*. 2011. V. 7(3). P. 287–296.
16. *Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н.* Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных // *Изв. РАН. Энергетика*. 2013. № 6. С. 137–146.
17. *Куликов А.Л.* Дистанционное определение мест повреждения ЛЭП методами активного зондирования. — М.: Энергоатомиздат, 2006. — 148 с.
18. *Kulikov A., Ilyushin P., Suslov K., Filippov S.* Estimating the Error of Fault Location on Overhead Power Lines by Emergency State Parameters Using an Analytical Technique // *Energies* 2023. V. 16. 1552.
19. *Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В.* Диагностика линий электропередачи // *Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр.* — Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, 1992.
20. *Takagi T., Yamakoshi Y., Yamaura Y., Kondow R., Matsushima T.* Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data // *IEEE Trans. on Power App. & Sys.* 1982. V. 8. P. 2892–2898.
21. *Устинов А.А., Висящев А.Н.* Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи // *Вестник ИрГТУ*. 2010. № 5 (45). С. 260–266.
22. *Куликов А.Л., Лукичева И.А.* Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2016. № 5. С. 16–21.
23. *Беляков Ю.С.* Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи: конспект лекций. — СПб.: ПЭИПК, 2008. — 76 с.
24. *Bahmanyar A., Jamali S., Estebarsari A., Bompard E.* A comparison framework for distribution system outage and fault location methods // *Electric Power Systems Research*. 2017. V. 145. P. 19–34.
25. *Yu C.S., Liu C.W., Jiang J.A.* A new fault location algorithm for series compensated lines using synchronized phasor measurements // *2000 Power Engineering Society Summer Meeting*, 16–20 July 2000.
26. *Aboshady F.M., Thomas D.W.P.* A Wideband Single End Fault Location Scheme for Active Untransposed Distribution Systems” // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. V. 11. № 3. P. 2115–2124.

27. *Panahi H., Zamani R., Sanaye-Pasand M., Mehrjerdi H.* Advances in Transmission Network Fault Location in Modern Power Systems: Review, Outlook and Future Works // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 158599–158615.
28. *Simeon O., Faithpraise F.O., Ibanga J.* Iterative Newton-Raphson-Based Impedance Method for Fault Distance Detection on Transmission Line // International Multilingual Journal of Science and Technology. 2020. V. 5. № 5. P. 2805–2810.
29. *Thongkrajay U., Poolsawat N., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T.* Alternative Newton-Raphson power flow calculation in unbalanced three-phase power distribution systems. // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering. Prague, Czech Republic, 12–14 March 2006. P. 24–29.
30. *Nagendra Reddy P.L.V., Mukunda V.K.S., Sushyanth C., Vanitha V.* Implementation of Novosel Simple Impedance Algorithm for fault location // IJCTA. 2016. V. 9(15). P. 7589–7596.
31. *Liao Y.* Transmission Line Fault Location Algorithms Without Requiring Line Parameters // Electric Power Components and Systems. 2008. V. 36. P. 1218–1225.
32. *Azizi S., Sanaye-Pasand M.* A Straightforward Method for Wide-Area Fault Location on Transmission Networks // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. V. 30 (1). P. 264–272.
33. *Bahmanyar A., Borhani-Bahabadi H., Jamali S.* Fault Location in Active Distribution Networks Using Improved Whale Optimization Algorithm // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2020. V. 16. № 3. P. 302–312.
34. *Kezunovic M., Knezev M.* Selection of optimal fault location algorithm. In Proceedings of the Conference: Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE. 2008.
35. *Yang H., Liu X., Guo Y., Zhang P.* Fault Location of Active Distribution Networks Based on the Golden Section Method // Mathematical Problems in Engineering. 2020. 6937319.
36. *Dalcastagne A.L., Filho S.N., Zurn H.H., Seara R.* An Iterative Two-Terminal Fault-Location Method Based on Unsynchronized Phasors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. V. 23. № 4. P. 2318–2329.
37. *Izykowski J.* Location of complex faults on overhead power line // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. V. 1. P. 81–84.
38. *Dong A.H., Geng X.L., Yang Y., Su Y., Li M.Y.* Overhead Power Line Fault Positioning System // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 329. P. 299–303.
39. *Suslov K., Solonina N., Solonina Z., Akhmetshin A.* Development of the method of determining the location of a short circuit in transmission lines // Journal of Physics: Conference Series. Ser. “International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021”. 2021, 012033.
40. Стандарт организации ПАО “ФСК ЕЭС” – СТО 56947007– 29.240.55.224–2016 “Методические указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше”, дата введения 17.08.2016.
41. *Гончаров В.А.* Методы оптимизации: учебное пособие. – М.: Высшее образование, 2009. – 191 с.
42. Стандарт организации ПАО “ФСК ЕЭС” – СТО 56947007–29.240.55.159–2013 “Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше”, дата введения: 28.11.2013.

Application of Search Algorithms in Determining of Fault Location on Overhead Power Lines According to the Emergency Mode Parameters

A. L. Kulikov^a, P. V. Ilyushin^b*, and A. A. Loskutov^a

^a*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

^b*Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Identification of fault locations (FL) on overhead power lines (OHPL) in the shortest possible time allows to reduce the time for shutting down OHPL in case of damage. This helps to improve the reliability of power systems. FL devices on OHPL according to the emergency mode parameters (EMP) are widely used, as they have a lower cost. However, they have a larger error than FL devices that record traveling wave processes. Most of the well-known algorithms for FL on OHPL by EMP assume a uniform distribution of resistivity along the OHPL. In real conditions, this is not the case. Application of these algorithms in FL devices on OHPL with inhomogeneities leads to significant errors in calculating the

distance to the fault location. The authors proposed the use of search algorithms for unconstrained one-dimensional optimization to increase the speed of implementation of iterative procedures in FL devices on OHPL by EMP. The authors have developed recommendations for choosing optimization criteria, as well as options for implementing computational procedures. Using the example of a two-sided FL on OHPL, it is shown that the use of search algorithms can significantly (from tens to hundreds of times) reduce the number of steps of the computational iterative procedure. The implementation of search algorithms is possible in the software of typical relay protection and automation terminals, without their hardware upgrade.

Keywords: overhead power line, fault location, emergency mode parameters, search algorithms