

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.315.1

EDN UOTUKF

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЛДЕРА-МИДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛЭП С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

**А.Л. Куликов**ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***А.А. Лоскутов**ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov\\_aa@nntu.ru](mailto:loskutov_aa@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***Р.И. Илларионов**ORCID: 0009-0009-5760-0924 e-mail: [illarionov.roma123@yandex.ru](mailto:illarionov.roma123@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия*

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) играют важную роль в процессе передачи электрической энергии. Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей важно оперативно обнаруживать и устранять повреждения на ЛЭП, связанные с короткими замыканиями. Точное определение местоположения повреждения (ОМП) минимизирует финансовые затраты предприятий электрических сетей и обеспечивает надежность энергоснабжения. Предложен алгоритм ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями, в состав которого интегрирован метод оптимизации (поиска минимума) функции от нескольких переменных Нелдера-Мида. Обоснованность применения предложенного алгоритма ОМП ЛЭП подтверждается результатами имитационного моделирования в программном комплексе *MATLAB/Simulink*, а также полунатурным экспериментом с осциллограммами аварийных событий на воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС 110 кВ «Хмелевицы».

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, ЛЭП с ответвлениями, метод Нелдера-Мида, определение места повреждения, расстояния до места повреждения.

**Для цитирования:** Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Илларионов Р.И. Применение алгоритма Нелдера-Мида для определения места повреждения на воздушных ЛЭП с ответвлениями // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 4-18. EDN UOTUKF

# APPLICATION OF THE NELDER-MEAD ALGORITHM FOR FAULT POINT LOCATION ON OVERHEAD POWER LINES WITH BRANCHES

**A.L. Kulikov**

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Loskutov**

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov\\_aa@nntu.ru](mailto:loskutov_aa@nntu.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**R.I. Illarionov**

ORCID: 0009-0009-5760-0924 e-mail: [illarionov.roma123@yandex.ru](mailto:illarionov.roma123@yandex.ru)  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Overhead power transmission lines (OPT) play an important role in the process of electric energy transmission. To ensure the reliability of power supply to consumers, it is important to quickly detect and eliminate faults on overhead power transmission lines associated with short circuits. The quickly fault point location (FPL) minimizes the financial costs of electric grid companies and ensures the reliability of the power supply system. The authors propose an algorithm for the FPL on overhead power transmission lines with branches, which integrates the optimization method (search for the minimum) of the Nelder-Mead function of several variables. The validity of the proposed algorithm for the FPL is ensured by the accurate results of simulation modeling in the MATLAB/Simulink software package, as well as a semi-naturalistic experiment with oscillograms of emergency events on the 110 kV Shakhunya-Vakhtan overhead power transmission line with a tap at the 110 kV Khmelevitsy substation.

**Keywords:** distance to fault point, fault point location, Nelder-Mead, overhead power lines, power transmission lines with branches.

**For citation:** A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and R.I. Illarionov, “Application of the Nelder-Mead algorithm for fault location on overhead power transmission lines with branches”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-18, 2024. EDN UOTUKF

## I. Введение

На работу транспорта и распределение электрической энергии оказывают влияние такие факторы, как неблагоприятные погодные условия (например, повышенные ветровые нагрузки, удары молнии, падения деревьев), а также износ оборудования воздушных линий электропередачи

(ЛЭП), в том числе, опор, изоляции и провода [1, 2]. Воздействие данных факторов приводит к повреждениям воздушных ЛЭП с различным сопротивлением, различного вида (одно-, двух-, трехфазные коротких замыканий (КЗ)) и в различных местах, в том числе, на ответвлениях [2, 3].

В эксплуатационной практике предприятий электрических сетей наиболее широкое распространение получили методы определения местоположения повреждения (ОМП) воздушных ЛЭП по параметрам аварийного режима (ПАР), реализованные в таких устройствах, как терминалы релейной защиты, регистраторы аварийных событий, специальные устройства ОМП ЛЭП [3-7]. Методы ОМП по ПАР на ЛЭП с ответвлениями применяются, как правило, при всех видах КЗ на ЛЭП 110 кВ, а также междуфазных КЗ на ЛЭП 6-35 кВ [3, 5, 6]. Выделяют два основных подхода [3, 6, 7]:

- специальные алгоритмы ОМП, разработанные для ЛЭП с ответвлениями;
- сочетание методов определения поврежденного ответвления с последующим применением традиционных алгоритмов ОМП для ЛЭП без ответвлений.

Следует отметить, что процедура определения поврежденного ответвления ЛЭП представляет самостоятельную научно-техническую задачу, а варианты ее решения достаточно подробно представлены в [6]. В состав методов ОМП по ПАР могут входить различные оптимизационные процедуры и итерационные алгоритмы, которые в том числе отыскивают на ЛЭП минимумы: напряжения, реактивной мощности, реактивного сопротивления и других функций [3]. Целесообразно при ОМП ЛЭП по ПАР использовать методы ускорения процесса вычислений, в частности, методы Фибоначчи, золотого сечения [8, 9] и другие [10, 11]. Однако, алгоритм поиска Нелдера-Мида [12] при реализации ОМП ЛЭП по ПАР практически не применялся.

Алгоритм Нелдера-Мида нашел применение в различных областях [12]. Его отличительной особенностью является использование неградиентного подхода, что позволяет устранить «овражные» эффекты и быть полезно для обеспечения устойчивости ОМП по ПАР в условиях воздействия случайных факторов.

Целью статьи является исследование применимости алгоритма Нелдера-Мида при ОМП по ПАР на воздушных ЛЭП с ответвлениями.

Обоснованность использования алгоритма Нелдера-Мида при ОМП ЛЭП по ПАР на примере воздушных ЛЭП 110 кВ обеспечивается результатами имитационного моделирования и проведением полунатурных экспериментов.

## II. Разработка алгоритма ОМП по ПАР на воздушных ЛЭП с ответвлениями на основе метода Нелдера-Мида

Метод Нелдера-Мида (известный также как симплекс-метод) – способ оптимизации (поиска минимума) функции нескольких переменных, позволяющий реализовать вычисления без использования производных и градиентов. Поэтому он целесообразен для оптимизации негладких и зашумленных функций с различными «овражными» эффектами [12]. Количество переменных зависит от мерности пространства –  $n$ . Под симплексом понимается многогранник, деформируемый вокруг точки экстремума функции в ходе безусловной оптимизации.

Критерий, на основе которого реализуется предлагаемый алгоритм ОМП по ПАР, заключается в поиске минимальной разницы между вычисленными значениями модуля (квадрата) напряжения в заданных точках поврежденной ЛЭП (рис. 1).

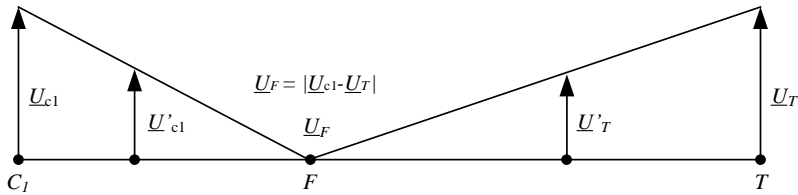


Рис. 1. Изменение напряжения вдоль поврежденного участка ЛЭП с ответвлением

Fig. 1. Change in voltage along the damaged section of a power line with a branch

Применительно к ЛЭП с ответвлениями (рис. 2) алгоритм ОМП дополняется процедурой поиска поврежденного ответвления ЛЭП с использованием одного из известных методов, изложенных, например, в [6].

Схема на рис. 2 включает в себя следующие обозначения:  $E_{c1}$ ,  $E_{c2}$ ,  $E_{c3}$  и  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ ,  $Z_{c3}$  – соответственно комплексные ЭДС и сопротивления систем по концам воздушной ЛЭП;  $Z'_{л1}$  и  $Z''_{л1}$  – комплексные сопротивления участка линии до и после повреждения;  $Z_{л2}$ ,  $Z_{л3}$  – комплексные сопротивления второго и третьего ответвлений ЛЭП;  $F$  и  $T$  – точки повреждения и ветвления воздушной ЛЭП;  $R_f$  – переходное сопротивление в месте повреждения.

Процесс вычислений включает в себя определение напряжения для каждой выбранной точки на ЛЭП на базе измеренных в месте установки терминалов защиты токов и напряжений на концах ЛЭП. Выбор расчетных точек осуществляется с установленным шагом (рис. 3), задание которого определяет точность расчета расстояния до места повреждения.

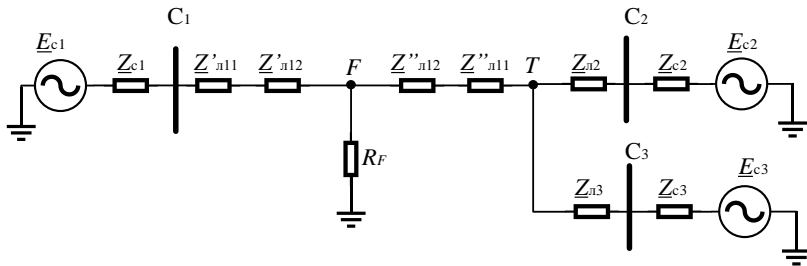


Рис. 2. Пример схемы замещения поврежденной ЛЭП с ответвлением

Fig. 2. An example of a replacement circuit for a damaged power line with a branch

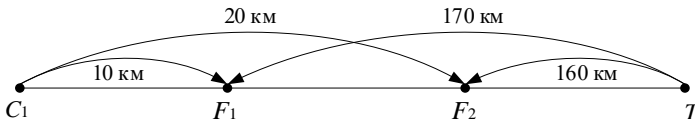


Рис. 3. Примеры выбора точек на поврежденной ЛЭП

Fig. 3. Examples of selecting points on a damaged power line

В ходе реализации итерационной процедуры минимум функции разности модуля напряжений позволяет определить расчетное расстояние до места повреждения.

Применительно к рассматриваемому алгоритму ОМП по ПАР ЛЭП с ответвлениями метод Нелдера-Мида существенно упрощается, а симплекс (многогранник) преобразуется в отрезок. Оптимизационные вычисления включают сравнение значений функции в вершинах симплекса и последующее его смещение в сторону минимума при помощи итерационной процедуры. Блок схема алгоритма приведена на рис. 4.

Перед началом вычислений (рис. 4) вводятся коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $y$ , которые являются соответственно коэффициентами отражения, сжатия и растяжения, например, [12]. Рекомендуется выбирать значения  $a = 1$ ,  $b = 0,5$ ,  $y = 2$ . В ходе расчетов (рис. 4) реализуются следующие операции.

1. Вычисляются значения функции  $f_1 = (x_1)$  и  $f_2 = (x_2)$  в вершинах симплекса.

2. Определяются наибольшее  $f_h$  и наименьшее  $f_l$  значение функции, и соответствующие им точках  $x_h$ ,  $x_l$ .

3. Выполняется операция отражения точки  $x_h$  относительно точки  $x_l$  (рис. 5а) с получением точки  $x_r$ , а также значения функции  $f_r = (x_r)$ . Положение точки  $x_r$  определяется по (1):

$$x_r = (1 + a)x_l - ax_h . \quad (1)$$

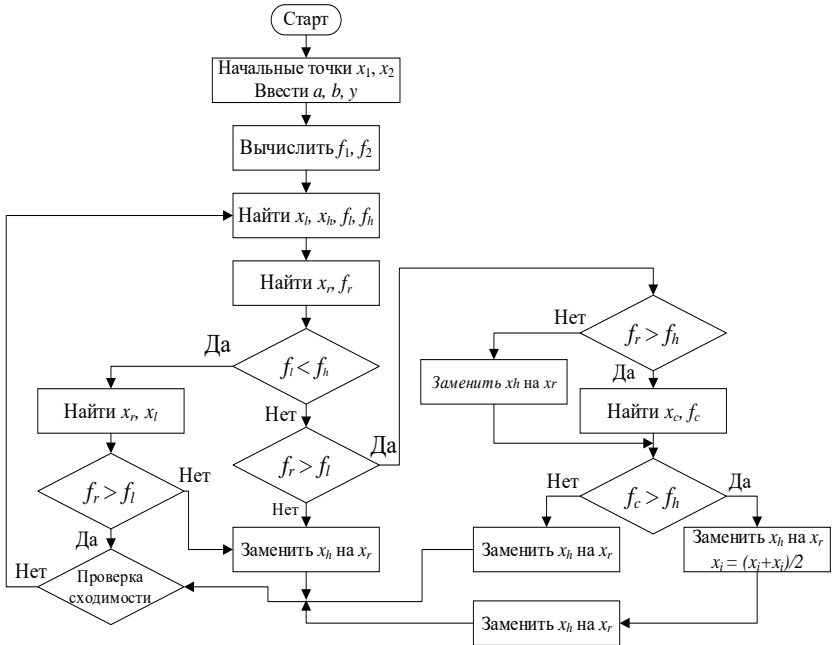


Рис. 4. Блок-схема алгоритма вычислений по методу Нелдера-Мида для реализации ОМП ЛЭП

Fig. 4. Block diagram of the calculation algorithm using the Nelder-Mead method for implementing fault point location on power lines

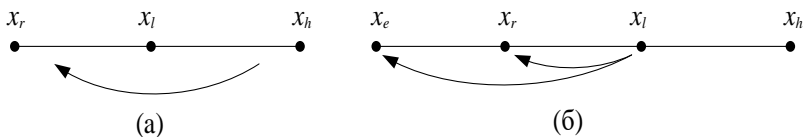


Рис. 5. Примеры реализации операций: отражения (а); растяжения (б)

Fig. 5. Examples of implementation of operations: reflection (a); stretching (b)

4. Реализуется сравнение значений функций  $f_r$  и  $f_i$ :

– если  $f_r < f_i$ , то получено новое наименьшее значение функции и, следовательно, производится растяжение в этом направлении с нахождением точки  $x_e$  по (2) и значения функции  $f_e = f(x_e)$ , (рис. 5. б):

$$x_e = yx_e + (1 - y)x_l; \quad (2)$$

– если  $f_e < f_l$ , то производится замена точки  $x_h$  на точку  $x_e$  и выполняется проверка другой точки симплекса на сходимость. Если сходимость достигнута, то алгоритм останавливается, в противном случае переходим на шаг 2;

– если  $f_e > f_l$ , то полученная точка исключается из вычислений и следует замена точки  $x_h$  на точку  $x_r$  с последующей проверкой на сходимость. При отрицательной проверке на сходимость осуществляется переход на шаг 2;

– если  $f_r < f_l$ , то  $x_r$  является лучшей точкой, и реализуется замена точки  $x_h$  на точку  $x_r$  и, если сходимость не достигнута, осуществляется возврат к шагу 2;

– если  $f_r > f_l$ , то переходим к шагу 5;

5. Реализуется сравнение функций  $f_r$  и  $f_h$ :

– если  $f_r > f_h$ , то переходим к шагу сжатия.

– если  $f_r < f_h$ , то заменяется точка  $x_h$  на точку  $x_r$  и значение функции  $f_h$  на  $f_r$  с последующим сжатием (рис. 6а);

– понятно, что если  $f_r > f_h$ , то точка находится ближе, тогда находятся точка  $x_c$  из выражения (3) и функция  $f_c$  с помощью операции сжатия (рис. 6а):

$$x_c = bx_h + (1 - b)x_r; \quad (3)$$

– если  $f_r < f_h$ , то сначала заменяется точка  $x_h$  на точку  $x_r$ , после чего производится сжатие с последующим нахождением точки  $x_c$  из выражения (4) (рис. 6. б):

$$x_c = bx_r + (1 - b)x_l. \quad (4)$$

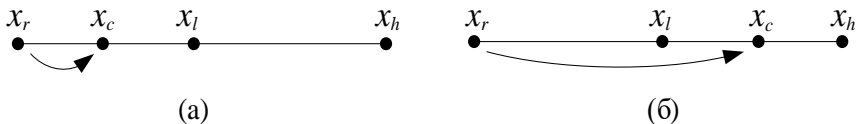


Рис. 6. Примеры реализации процедуры сжатия

Fig. 6. Examples of implementation of the compression procedure

6. Реализуется сравнение функций  $f_c$  и  $f_h$ :

– если  $f_c < f_h$ , то осуществляется замена точки  $x_h$  на точку  $x_c$  и, если сходимость не достигается, то выполняется переход на шаг 2;

– если  $f_c > f_h$ , то происходит уменьшение симплекса (отрезка) в 2 раза. Точка  $x_h$  заменяется на точку  $x_i$ , которую можно найти по (5) и вычисляется функция  $f_i(x_i)$  в этой точке. В последующем проверяется условие сходимости и, если оно не выполняется, то реализуется возврат к шагу 2.

$$x_i = (x_l + x_h) / 2 . \quad (5)$$

Следует отметить, что для положительного результата проверки на сходимость, необходимо, чтобы разность значений функции в точках  $x_h$  и  $x_l$  была меньше заранее заданного числа  $k$ , то есть  $(f_h - f_l) < l$ .

Анализ расчетных операций алгоритма рис. 4 позволяет сделать вывод, что процедура ОМП по ПАР ЛЭП с ответвлениями не требует значительных вычислительных и временных затрат.

### III. Экспериментальная часть

Для исследования характеристик точности алгоритма Нелдера-Мида при ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями была разработана имитационная модель в программном обеспечении *MATLAB/Simulink* (рис. 7).

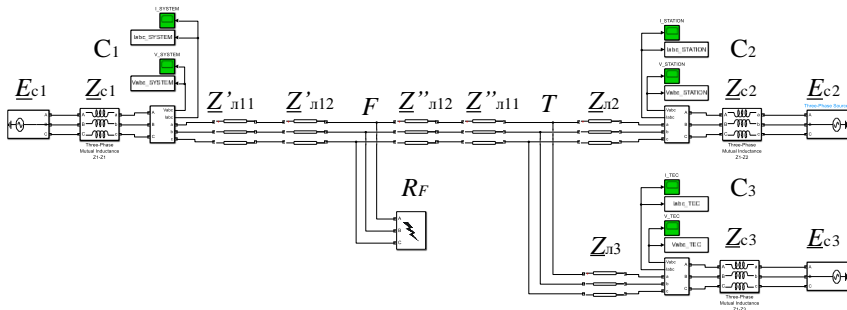


Рис. 7. Схема имитационной модели воздушной ЛЭП с ответвлениями в *MATLAB/Simulink*

Fig. 7. Scheme of a simulation model of an overhead power line with branches in *MATLAB/Simulink*

На рис. 7 введены обозначения по аналогии с рис. 2. В составе имитационной модели учитывались следующие параметры воздушной ЛЭП:

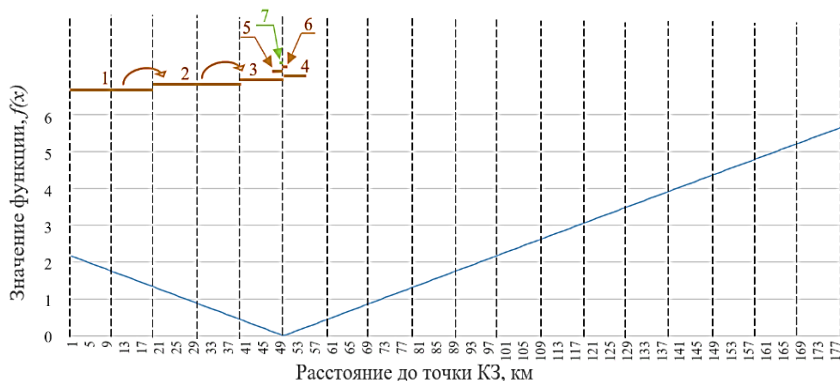
– протяженность первого, второго и третьего ответвлений воздушной ЛЭП соответственно 180 км, 80 км и 50 км;

– параметры систем по концам ЛЭП: действующее значение ЭДС  $E_{c1} = E_{c2} = E_{c3} = 110$  кВ, а их сопротивления прямой и нулевой последовательности:  $Z_{1\_c1} = 10 + j10$  Ом,  $Z_{0\_c1} = 1 + j1$  Ом,  $Z_{1\_c2} = 15 + j15$  Ом,  $Z_{0\_c2} = 1,5 + j1,5$  Ом,  $Z_{1\_c3} = 20 + j20$  Ом,  $Z_{0\_c3} = 2 + j2$  Ом;



– линия выполнена на опорах типа УС110-5; марка провода первого ответвления АС-120/19, а второго и третьего АС-240/39; грозозащитный трос марки ОКГТ-С-64 со встроенной волоконно-оптической линией связи; сопротивление земли принято 100 Ом.

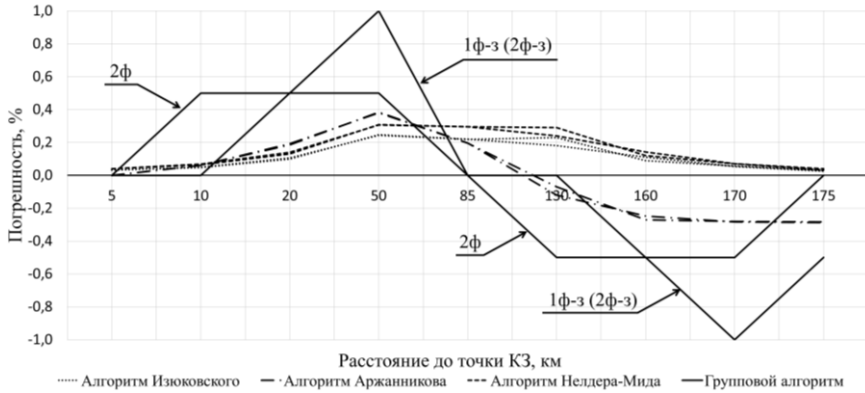
Реализацию итерационного алгоритма Нелдера-Мида при ОМП воздушной ЛЭП с ответвлениями характеризует рис. 8. При моделировании точка КЗ была расположена на расстоянии 50 км от начала первого ответвления (со стороны системы с ЭДС  $E_{c1}$ ). В ходе вычислений потребовалось 7 итераций, а погрешность ОМП ЛЭП составила 0,309 км или 0,17 % от длины воздушной ЛЭП.



**Рис. 8.** Реализация алгоритма Нелдера-Мида в ходе модельных экспериментов при ОМП ЛЭП с ответвлениями

**Fig. 8.** Implementation of the Nelder-Mead algorithm during model experiments with fault point location on power lines with branches

Дополнительно проводилось имитационное моделирование для сопоставительного анализа предложенного алгоритма ОМП ЛЭП с ответвлениями с известными отечественными и зарубежными методами: Аржанникова [3], Изюковского [6, 7], группового метода [13, 14]. Моделированию подлежали различные виды КЗ (рис. 9): однофазное на землю (1ф-з), междуфазное (2ф), двухфазное на землю (2ф-з). Результаты расчета ошибок ОМП при повреждении на первом ответвлении воздушной ЛЭП приведены на (рис. 9).



**Рис. 9. Результаты моделирования в виде графиков погрешностей алгоритмов для несимметричных КЗ**

**Fig. 9. Simulation results in the form of graphs of algorithm errors for asymmetrical short circuits**

Анализ рис. 9 показывает, что применение алгоритма Нелдера-Мида для ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями обеспечивает высокую точность расчета расстояния до места повреждения по сравнению с известными методами.

#### IV. Полунатурные эксперименты

Полунатурные эксперименты проводились с использованием осциллограмм (рис. 10) реального повреждения (двухфазного КЗ фаз В и С), произошедшего на воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС «Хмелевицы».

При реализации ОМП учитывались следующие параметры: протяженность магистрали ЛЭП 31.8 км, протяженность ответвления – 18 км, ответвление расположено на расстоянии 29,04 км от ПС 110 кВ «Шахунья»; грозозащитный трос марки – С-35; для магистрали; марка провода АС-70/11, тип опор ПБ-2; для ответвления: марка провода АС-70/11, тип опор ПД 110-1 – отпайка; сопротивление земли – 100 Ом.

Эквивалентные сопротивления систем схемы замещения ЛЭП 110 кВ ПС «Шахунья» – ПС «Вахтан» с ответвлением на ПС «Хмелевицы» приведены в табл. 1.

В ходе полунатурного эксперимента исследовалась устойчивость алгоритма Нелдера-Мида при ОМП на воздушных ЛЭП с ответвлениями к случайному выбору начальных точек симплекса.

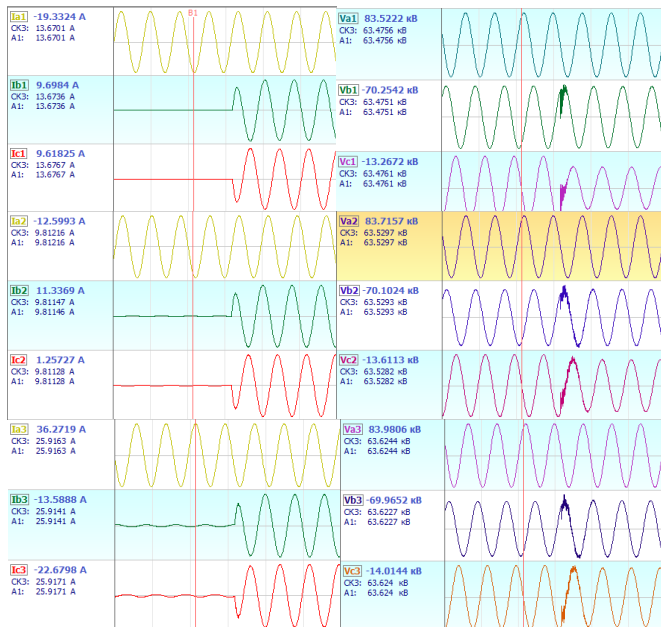


Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений при КЗ на воздушной ЛЭП 110 кВ ПС «Шахунья» – ПС «Вахтан» с ответвлением на ПС «Хмелевицы»

Fig. 10. Oscillograms of currents and voltages during a short circuit on a 110 kV overhead power line Shakhunya-Vakhtan with a branch to the Khmelevitsy substation

Таблица 1.

Эквивалентные сопротивления систем

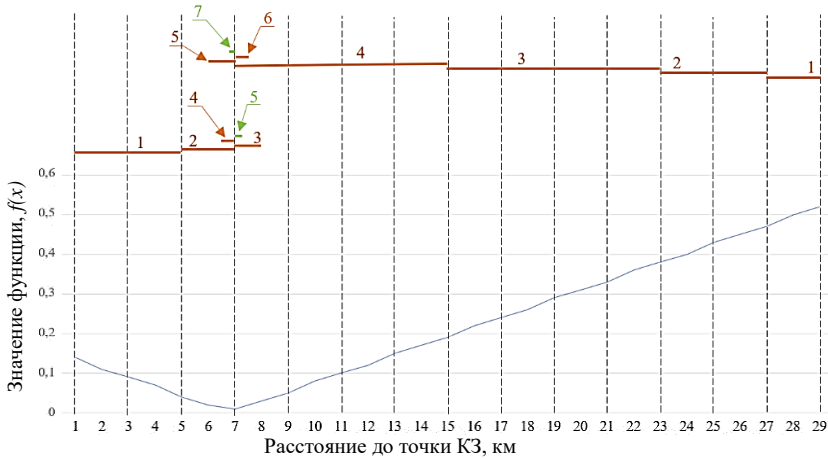
Table 1.

Equivalent resistances of systems

Подстанция	Сопротивление системы прямой последовательности	Сопротивление системы нулевой последовательности
ПС 110 кВ «Шахунья»	$0,647 + j8,326$	$0,242 + j4,979$
ПС 110 кВ «Вахтан»	$1,287 + j12,903$	$1,329 + j13,01$
ПС 110 кВ «Хмелевицы»	$0,711 + j10,363$	$0,462 + j6,531$

На рис. 11 представлены итерационные процессы отыскания минимума амплитуды напряжения для двух вариантов выбора начальных точек: для первого симплекса 1 км и 5 км; для второго – 29 км и 27 км. В первом варианте для реализации ОМП ЛЭП потребовалось 5, а во втором – 7 шагов. Последующий выбор различных вариантов начальных точек показал, что

для выполнения итерационного алгоритма (рис. 4) требуется не более 10 шагов. Таким образом, алгоритм Нелдера-Мида обеспечивает быструю сходимость и высокое быстродействие ОМП воздушных ЛЭП.



**Рис. 11. Реализация алгоритма Нелдера-Мида при полунатурных испытаниях**

**Fig. 11. Implementation of the Nelder-Mead algorithm for semi-natural tests**

Расчеты расстояния до места повреждения воздушной ЛЭП 110 кВ «Шахунья-Вахтан» с отпайкой на ПС «Хмелевицы» предложенного алгоритма ОМП на основе процедуры Нелдера-Мида в сопоставлении с известными методами представлены в табл. 2. Полунатурные эксперименты показали, что применение алгоритма Нелдера-Мида обеспечивает высокую точность расчета расстояния до места повреждения, ошибка ОМП составила 320 м, или 1,1 % от длины линии.

**Таблица 2.**  
**Результаты полунатурных экспериментов**

**Table 2.**  
**Results of semi-natural experiments**

Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{К.расч.}$ , км				Фактическое место повреждения, км
Алгоритм Изюковского	Алгоритм Аржанникова	Алгоритм Нелдера – Мида	Групповой алгоритм	
6,421	6,679	6,600	5,500	6,28

## У. Заключение

Разработка методов ОМП по ПАР на линиях с ответвлениями является актуальной задачей. При этом целесообразно применение процедур ускорения вычислений, в том числе, с использованием алгоритмов математической оптимизации.

Результаты имитационного моделирования и полунатурных экспериментов показали, что алгоритм Нелдера-Мида обеспечивает высокую точность ОМП на линиях с ответвлениями, а также требует до 10 итераций, что является высоким показателем быстродействия.

Алгоритм Нелдера-Мида не предполагает сложных математических операций, поэтому целесообразна ее реализация в виде программного обеспечения для современных терминалов релейной защиты и специализированных устройств ОМП ЛЭП.

© Куликов А.Л., 2024

© Лоскутов А.А., 2024

© Илларионов Р.И., 2024

*Поступила в редакцию 16.07.2024*

*Принята к публикации 19.08.2024*

*Received 16.07.2024*

*Accepted 19.08.2024*

## Библиографический список

- [1] Папков Б.В., Куликов А.Л., Илюшин П.В. Задачи надежности современного электроснабжения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с.
- [2] Висящев А.Н., Акишин Л.А., Тигунцев С.Г., Висящев А.А., Муссонов Г.П., Пленков Э.Р. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи 10-110 кВ в нормальных и аварийных режимах. Иркутск: ИрГТУ, 2012. – 270 с.
- [3] Аржанников Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 271 с.
- [4] Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью. М.: Высшая школа, 1988. – 94 с.
- [5] Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи. С.-Пб.: ПЭИПК, 2008. – 76 с.
- [6] Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault location on power networks. London: Springer, 2010. – 437 с. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5
- [7] Izykowski J. Fault Location on power transmission lines. Wroclaw: Wroclaw University of Science and Technology, 2008. – 221 с.
- [8] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.А. Применение алгоритмов поиска при определении мест повреждений на воздушных линиях электропередачи по параметрам аварийного режима // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2023. № 5. С. 40-59. DOI: 10.31857/S0002331023050059

- [9] 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. Vol. 9. С. 158599-158615.
- [10] 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. 2021. № 5 (5). P. 2805-2810. DOI: 10.13140/RG.2.2.15945.57442
- [11] Куликов А.Л., Обалин М.Д. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика. 2015. № 2. С. 70-75. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [12] Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. – 534 с.
- [13] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2021. № 2 (82). С. 119-128. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_2\_119
- [14] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Повышение эффективности определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 15-19.

### References

- [1] B.V. Papkov, A.L. Kulikov and P.V. Ilyushin, *Zadachi nadezhnosti sovremennoy elektrosnabzheniya [Reliability problems of modern power supply]*. Vologda: Infra-Engineering, 2022 (in Russian).
- [2] A.N. Visyashchev, L.A. Akishin, S.G. Tiguncev, A.A. Visyashchev, G.P. Mussonov and E.R. Plenkov, *Diagnostika sostoyaniya vozdukhnykh linij elektroperedachi 10-110 kV v normal'nykh i avarijnykh rezhimakh [Diagnostics of the state of overhead power transmission lines 10-110 kV in normal and emergency modes]*. Irkutsk: ISTU, 2012 (in Russian).
- [3] E.A. Arzhannikov, *Opreделение mesta korotkogo замыкaniya na vysokovol'tnykh liniyah elektroperedachi [Determination of the location of a short circuit on high-voltage power transmission lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [4] Ya.L. Artishevsky, *Opreделение mest povrezhdeniya linij elektroperedachi v setyah s zazemlennoy nejtral'yu [Determination of fault locations of power transmission lines in networks with grounded neutral]*. Moscow: Higher school, 1988 (in Russian).
- [5] Yu.S. Belyakov, *Aktual'nye voprosy opredeleniya mest povrezhdeniya vozdukhnykh linij elektroperedachi [Actual issues of fault location of overhead power transmission lines]*. St. Petersburg: PEIPK, 2008 (in Russian).
- [6] M.M. Saha, J. Izykowski and E. Rosolowski, *Fault location on power networks*. London: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5
- [7] J. Izykowski, *Fault Location on power transmission lines*. Wroclaw: Wroclaw University of Science and Technology, 2008.
- [8] A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin and A.A. Loskutov, “Application of search algorithms in determining of fault location on overhead power lines according to the emergency

- mode parameters”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 5, pp. 40-59, 2023. DOI: 10.31857/S0002331023050059
- [9] H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, “Advances in transmission network fault location in modern power systems: Review, outlook and future work”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158599-158615, 2021, Nov. 2021. DOI: 10.1109/access.2021.3129838
- [10] O. Simeon, F.O. Faithpraise and J. Ibanga, “Iterative Newton-Raphson-based impedance method for fault distance detection on transmission line”, *International Multilingual Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 2805-2810, 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.15945.57442
- [11] A.L. Kulikov and M.D. Obalin, “Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines”, *Russian Electromechanics*, no. 2, pp. 70-75, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [12] D. Himmelblau, *Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye [Applied nonlinear programming]*. Moscow: Mir, 1975 (in Russian).
- [13] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, “Application of the pattern recognition theory in determining the location of a short circuit in AC traction networks”, *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, vol. 2, no. 82, pp. 119-128, 2021.
- [14] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, “Povysheniye effektivnosti opredeleniya mesta korotkogo замыкания v tyagovyh setyah peremennogo toka na osnove informacionnyh tekhnologij [Improving the efficiency of determining the location of a short circuit in AC traction networks based on information technology]”, *Bulletin of Transport of the Volga Region*, vol. 6, no. 54, pp. 15-19, 2015 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Alexander L. Kulikov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Лоскутов Антон Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Anton A. Loskutov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Илларионов Роман Игоревич**, магистр Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Roman I. Illarionov**, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.