

УДК 621.311.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОГИПОТЕЗНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА И АЛГОРИТМА АРМИТАЖА

© 2024 г. А. Л. Куликов¹, П. В. Илюшин^{2, *}, А. А. Лоскутов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия
*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2023 г.

После доработки 19.09.2024 г.

Принята к публикации 20.09.2024 г.

Применение современных методов определения мест повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ), обладающих высокой точностью и быстродействием, позволяет оперативно находить и устранять повреждения. В устройствах ОМП ВЛ разных заводов-изготовителей используются различные физические принципы, а также алгоритмы расчета расстояния до места повреждения. В части алгоритмов ОМП ВЛ используются параметры аварийного режима (ПАР), в других алгоритмах — результаты измерений, основанные на волновых методах. На работу устройств ОМП ВЛ по ПАР влияет множество случайных факторов, определяющих величину ошибки при расчете расстояния до места повреждения. Применяемые в известных устройствах ОМП ВЛ по ПАР методы на базе детерминированных процедур не учитывают влияние случайных факторов, что значительно увеличивает время на поиск места повреждения. Авторами разработан новый метод ОМП ВЛ с применением многогипотезного последовательного анализа и алгоритма Армитажа. Задача определения поврежденного участка ВЛ при этом сформулирована как статистическая задача. Для этого зона осмотра ВЛ разбивается на множество участков с последующей реализацией процедуры ОМП ВЛ. Разработанный метод позволяет адаптировать искажения токов и напряжений на осциллограммах аварийного режима к условиям оценки их параметров. Результатами расчетов доказано, что реализация разработанного метода практически не влияет на быстродействие алгоритма ОМП ВЛ по ПАР. При этом обеспечивается однозначность определения поврежденного участка ВЛ в условиях воздействия случайных факторов, что приводит к существенному сокращению зоны осмотра ВЛ. Применение разработанного метода в устройствах ОМП ВЛ позволит обеспечить требуемую надежность электроснабжения потребителей и сократить убытки от перерывов электроснабжения за счет минимизации времени поиска места повреждения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, определение мест повреждения, параметры аварийного режима, многогипотезный последовательный анализ, алгоритм Армитажа

DOI: 10.31857/S0002331024040028

ВВЕДЕНИЕ

В энергосистемах основными были и остаются ВЛ различных классов напряжения как по количеству, так как по протяженности. Выдача мощности электростанций всех видов и передача мощности между региональными энергосистемами осуществляется, как правило, по ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения [1]. Это обусловлено тем, что стоимость строительства и эксплуатации кабельных линий электропередачи (КЛ) существенно дороже. При этом в ряде стран действуют долгосрочные программы по переводу ВЛ в КЛ. Это обусловлено подверженностью ВЛ влиянию множества факторов природного и техногенного характера, поэтому ВЛ имеют низкие показатели надежности, по сравнению с КЛ [2].

Короткие замыкания (КЗ) на ВЛ сопровождаются провалами напряжения различной глубины и длительности. Это зависит от вида КЗ, величины переходного сопротивления в месте КЗ, алгоритмов работы и параметров настройки устройств релейной защиты (РЗ), а также собственного времени отключения высоковольтных выключателей. Провалы напряжения негативно влияют на работу электроприемников, особенно электродвигателей, которые в течение КЗ тормозятся, а после его ликвидации начинается их самозапуск. Самозапуск происходит успешно в том случае, если электродвигатели не были отключены электрическими или технологическими защитами. По статистическим данным на ВЛ напряжением 110–500 кВ основными являются однофазные КЗ, составляющие до 70% от общего количества, на двухфазные и трехфазные КЗ приходится 20% и 10% соответственно.

В некоторых странах ВЛ напряжением 110–500 кВ имеют протяженность в сотни километров, проходят по горным, залесенным и болотистым местностям, с большим количеством переходов через водные преграды (ручьи, реки, озера, искусственные водоемы) и др. Кроме того, ВЛ эксплуатируются в сложных климатических условиях, например, большие напоры ветра, вызывающие вибрацию и пляску проводов, образование гололедно-изморозевых отложений на проводах, тросах и опорах ВЛ, а также высокие или низкие температуры наружного воздуха [3, 4]. В этих условиях определение мест повреждений на ВЛ методом осмотра требует значительного времени и трудозатрат.

Надежность функционирования энергосистем, а также возможность обеспечения надежного электроснабжения потребителей зависят от наличия резервных ВЛ, а также времени, необходимого на поиск и устранение повреждения ВЛ. Для устранения повреждения на ВЛ необходима реализация организационно-технических мероприятий, заключающихся в выезде ремонтной бригады на место повреждения и выполнении аварийно-восстановительных работ. Объем ремонтных работ, категория их сложности, а также потребность в материалах и приспособлениях определяется на месте, которые зависят от масштаба повреждения и причин его возникновения. При этом время ликвидации повреждения на ВЛ в значительной степени

зависит от точности определения места повреждения устройствами ОМП ВЛ, т.е. куда должна выезжать ремонтная бригада для поиска повреждения на трассе ВЛ.

Для потребителей, питающихся от двух ВЛ, одна из которых была выведена в ремонт, а вторая аварийно отключилась, электроснабжение будет полностью нарушено. Это приведет к ущербам от отключения ВЛ, а также убыткам от недоотпуска продукции на время восстановления электроснабжения технологического процесса [5]. Для минимизации ущербов и убытков у потребителей точность определения мест повреждений на ВЛ нужно повышать, а время выполнения аварийно-восстановительных работ минимизировать.

На протяжении более 70 лет в электросетевых компаниях применяются устройства ОМП ВЛ, устанавливаемые на подстанциях с одной или двух сторон ВЛ [6, 7]. Однако их точность долгие годы оставалась неудовлетворительной, поэтому персонал электросетевых компаний не доверял их показаниям. Кроме того, по показаниям устройств ОМП ВЛ было необходимо проводить расчеты, чтобы определить расстояние от подстанции до места повреждения. Для точного определения места повреждения необходимо применять современные устройства ОМП ВЛ, обладающих достаточным быстродействием и высокой точностью, а также не требующие проведения дополнительных расчетов. Это позволит обеспечить требуемую надежность электроснабжения потребителей.

Важно отметить, что на величину ошибок расчета расстояния до места повреждения в устройствах ОМП ВЛ влияют различные случайные факторы [8]:

- относительная и угловая погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения;
- наличие гармонических составляющих в токах и напряжениях, фиксируемых в аварийном режиме;
- искажения синусоидальности тока, связанные с насыщением электромагнитных измерительных трансформаторов тока;
- искажения синусоидальности токов и напряжений из-за влияния нагрузки и устройств на базе элементов силовой электроники;
- наличие переходного сопротивления в месте КЗ;
- неравномерность распределения удельного сопротивления вдоль ВЛ;
- изменение сопротивления заземляющих контуров опор ВЛ в разные времена года;
- неучет емкостной составляющей ВЛ относительно земли в алгоритме ОМП ВЛ;
- неучет взаимной индукции в коридорах совместного прохождения ВЛ;
- ошибки в исходных данных по удельному сопротивлению участков ВЛ;
- неучет сопротивлений обходных связей и др.

В этих условиях в устройствах ОМП ВЛ требуется применять методы, позволяющие рассчитывать расстояние до места повреждения при воздействии случайных факторов с высокой точностью [9, 10]. В существующих устройствах ОМП ВЛ и различных методах ОМП ВЛ, рассматриваемых в научной литературе, ранее не предлагалось применять многогипотезный последовательный анализ с алгоритмом Армитажа для ОМП ВЛ.

Цель исследования заключается в разработке нового метода ОМП ВЛ по параметрам аварийного режима с применением многогипотезного последовательного

анализа и алгоритма Армитажа. Задача определения поврежденного участка ВЛ при этом сформулирована как статистическая задача. Применение разработанного метода ОМП ВЛ практически не влияет на его быстродействие, обеспечивая однозначность при определении поврежденного участка ВЛ в условиях воздействия случайных факторов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧЕ ОМП ВЛ

В устройствах ОМП ВЛ могут применять различные физические принципы и алгоритмы расчета расстояния до места повреждения [11, 12]. В части алгоритмов ОМП ВЛ используются параметры аварийного режима, в других — результаты измерений, основанные на волновых методах. В волновых методах применяется либо активное зондирование ВЛ, либо пассивная регистрации волновых процессов на концах ВЛ (на подстанциях).

Относительная погрешность волновых методов ОМП ВЛ [13], в том числе основанных на активном зондировании ВЛ, значительно меньше погрешности устройств ОМП ВЛ по ПАР. Однако высокая стоимость волновых устройств ОМП ВЛ ограничивает возможность их массового применения в электросетевых компаниях. Как показывает опыт эксплуатации, волновые устройства ОМП ВЛ применяются только на особо ответственных ВЛ сверхвысокого и ультравысокого напряжения.

Устройства ОМП ВЛ по ПАР отличаются простотой технической реализации, так как расчетные алгоритмы основаны на измерениях составляющих токов и напряжений промышленной частоты. В устройствах ОМП ВЛ по ПАР применяются односторонние, двусторонние и многосторонние измерения токов и напряжений [14]. При реализации алгоритмов ОМП ВЛ по ПАР не требуется использовать аналого-цифровые преобразователи с высокой частотой дискретизации, а также высокопроизводительные процессоры в устройствах ОМП ВЛ. Односторонние алгоритмы ОМП ВЛ не требуют наличия каналов связи для обмена информацией, так как измерения токов и напряжений производятся с одной стороны ВЛ. Однако односторонние алгоритмы ОМП ВЛ имеют большую погрешность, по сравнению с двусторонними алгоритмами.

Возможна реализация алгоритмов ОМП ВЛ по ПАР в виде специализированного программного обеспечения в устройствах РЗ, регистраторах аварийных событий, системах АСУ ТП подстанций, устройствах синхронизированных векторных измерений и др. Это позволяет не устанавливать отдельные устройства ОМП ВЛ, как это делалось на протяжении нескольких десятилетий, но реализовать эту функцию в уже установленных на подстанциях устройствах, что более экономически эффективно.

В нормативно-технических документах крупных электросетевых компаний под зоной осмотра ВЛ подразумевается расчетный участок ВЛ (в км), определенный на основании данных из устройств ОМП (РЗ или др.), которые получены после аварийного отключения ВЛ. Эта информация является основой для планирования выезда ремонтной бригады на ВЛ с целью установления фактического места повреждения ВЛ, выявления причин повреждения и проведения аварийно-восстановительных работ. Допустимая величина зоны осмотра ВЛ для поиска поврежденного участка зависит от длины ВЛ и может достигать до $\pm 10\%$ от ее длины [15]. Если длина ВЛ составляет 50 км, то допустимая величина зоны осмотра составляет ± 5 км, что очень много, особенно в условиях прохождения ВЛ по пересеченной местности.

Для уменьшения зоны осмотра ВЛ в [16, 17] предложены и исследованы два метода ОМП ВЛ, применяемые в электрических сетях и контактной сети железных дорог. В первом случае, основанном на применении интервального метода [16], решается задача сокращения величины участка ВЛ, включающего место повреждения. Во втором методе [17] предусмотрено разбиение ВЛ на участки для решения задачи определения поврежденного участка ВЛ. Однако авторами не учитываются влияние случайных факторов, определяющих величину ошибки при расчете расстояния до места повреждения, а сами методы ОМП ВЛ по ПАР реализованы на основе детерминированных процедур.

Сформулируем задачу определения поврежденного участка ВЛ как задачу классификации, заключающуюся в установлении принадлежности повреждения к одному из участков ВЛ в пределах зоны ее осмотра. Из-за влияния случайных факторов процесс принятия решения имеет стохастический характер, так как основан на обработке аварийных осциллограмм токов и напряжений, зафиксированных на ограниченном интервале времени. Длительность интервала времени определяется временем ликвидации КЗ.

Для реализации последовательного анализа при выборе поврежденного участка в пределах зоны осмотра ВЛ требуется проводить k экспериментов с выборочными данными на каждом шаге [18]. По результатам экспериментов принимается одно из $(M + 1)$ решений:

- завершить эксперимент принятием гипотезы H_1 (повреждение на участке № 1);
- завершить эксперимент принятием гипотезы H_2 (повреждение на участке № 2);
-
- завершить эксперимент принятием гипотезы H_M (повреждение на участке № M);
- продолжить эксперимент, проводя дополнительные наблюдения.

Таким образом, процедура реализуется последовательно: на основе первого наблюдения принимается одно из $(M + 1)$ решений, причем при выборе одного из первых M решений, процесс анализа завершается. Если выбирается решение под номером $(M + 1)$, то производится следующее (второе) наблюдение. Далее на основе первых двух выборочных данных опять принимается одно из $(M + 1)$ решений. Если выбор соответствует последнему $(M + 1)$ -ому решению, то производится третий эксперимент и так далее. Процесс продолжается пока не будет выбрано одно из первых M решений.

В общем случае принятие решения относительно поврежденного участка ВЛ производится на основе вектора параметров токов и напряжений x , соответствующих поврежденному участку под номером m ($m = 1, \dots, M$). При этом вектор $x = \{x_1, x_2, \dots\}$ параметров токов и напряжений в общем случае является случайным, поскольку может включать искажающие составляющие, например, связанные с отклонениями показателей качества электроэнергии от нормативных значений [19].

Так как гипотезы $H_1, \dots, H_M$ взаимно исключают друг друга, исчерпывая все возможные случаи для выбранных значений вектора x , то одна (и только одна) из гипотез $H_1, \dots, H_M$ согласуется с конкретным набором значений вектора x .

Для формирования рационального решающего правила при ОМП ВЛ необходимо ввести показатели эффективности последовательного анализа при определении поврежденного участка ВЛ.

К наиболее общим вероятностным показателям эффективности процедуры последовательного анализа следует отнести матрицу условных вероятностей для M – гипотез, каждая из которых соответствует своему поврежденному участку в пределах зоны осмотра:

$$\|P(k|i)\| = \|P_i(k)\| = \|P_{ik}\|, \quad (1)$$

где $i, k = 1, \dots, M$; $P(k|i) = P_i(k) = P_{ik}$ – условная вероятность принятия решения о номере k поврежденного участка при условии принадлежности повреждения к участку i .

Вероятностные показатели определения поврежденного участка ВЛ непосредственно связаны с известным понятием – разрешающая способность [20]. Применительно к рассматриваемой задаче под разрешающей способностью алгоритма ОМП ВЛ следует понимать минимальный по длине участок ВЛ, для которого реализуется задача определения повреждения с заданными показателями эффективности (выражение (1)). Предполагается, что разрешающая способность ОМП ВЛ – это потенциально достижимый минимальный по длине участок ВЛ, при этом влияние нежелательных случайных факторов сведено к минимуму.

Важно отметить, что фактическая разрешающая способность относится не только к алгоритму (устройству) ОМП ВЛ, но и конкретной ВЛ, обладающей конструктивными и эксплуатационными особенностями. Для каждого повреждения ВЛ точность расчета расстояния до места повреждения будет определяться разрешающей способностью алгоритма ОМП ВЛ и величинами случайных факторов, воздействующих на ВЛ.

РЕАЛИЗАЦИЯ ОМП ВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОГИПОТЕЗНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА И АЛГОРИТМА АРМИТАЖА

Рассмотрим вариант применения при ОМП ВЛ многогипотезного последовательного анализа и алгоритма Армитажа [21, 22]. В разработанном алгоритме на каждом шаге анализа производятся вычисления $M \cdot (M - 1)$ парных отношений правдоподобия:

$$\lambda_m(\mathbf{x}|H_{k,l}) = p_m(\mathbf{x}|H_k) / p_m(\mathbf{x}|H_l), \quad (2)$$

где $k, l = 1, \dots, M$; $k \neq l$; $p_m(\mathbf{x}|H_k)$, $p_m(\mathbf{x}|H_l)$ – многомерная плотность вероятностей вектора $\mathbf{x}$, наблюдаемого на m -ом шаге.

На каждом шаге наблюдения m производится сравнение вычисленных отношений правдоподобия (выражение (2)) с порогами и проверкой условия: если $\lambda_m(\mathbf{x}|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$, $l = 1, \dots, M$, $k \neq l$, то принимается решение в пользу гипотезы H_k . В противном случае принимается решение о продолжении наблюдений. Процедура последовательного анализа реализуется до момента соблюдения условия, когда все $(M - 1)$ отношения правдоподобия $\lambda_m(\mathbf{x}|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$, $l = 1, \dots, M$, $k \neq l$, характерные гипотезе H_k , превысят одновременно соответствующие пороги $\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$.

Пороги $\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$ для каждой из проверяемых гипотез относительно поврежденного участка ВЛ формируются на основе вероятностных показателей качества распознавания, объединенных в матрицу условных вероятностей (выражение (1)). В [21] показано, что вероятность правильного принятия решения о поврежденном

участке ВЛ возрастает и приближается к единице по мере увеличения количества наблюдений m .

Значения вероятностей правильного распознавания поврежденного участка P_{kk} и пороговые величины $\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$ при многогипотезном последовательном анализе по алгоритму Армитажа связаны между собой:

$$P_{kk} > 1 - \sum_{k \neq l} [1/\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})], \quad (3)$$

$$\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l}) = (1/P_{kl}) \cdot [1 - \sum_{k \neq l} P_{kl}]. \quad (4)$$

Для $M = 2$ пороговые значения идентичны величинам порогов для последовательного анализа Вальда [23]. Таким образом, алгоритм Армитажа можно рассматривать как комбинацию из $M \cdot (M - 1)$ бинарных последовательных анализов Вальда, где пороговые соотношения определяются по выражению (4).

Применение многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитажа при ОМП ВЛ содействует сокращению количества наблюдений при сохранении простоты подхода, основанного на сравнении парных отношений правдоподобия. Для этого следует задавать набор пороговых значений, которые зависят от количества наблюдений m :

$$\lambda_m^{\text{пор}^*}(\mathbf{x}|H_{k,l}) = \lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})/m^r, k, l = 1, \dots, M; k \neq l, \quad (5)$$

где $\lambda_m^{\text{пор}}(\mathbf{x}|H_{k,l})$ – порог, определяемый по выражению (4); r – положительная константа [24].

Разработанный метод ОМП ВЛ не накладывает ограничений на максимальное требуемое количество наблюдений, но новые пороговые значения снижают вероятность проведения их большого числа. В [24] отмечается, что для $r = 1$ новые пороговые значения значительно сокращают среднее требуемое количество наблюдений, оказывая несущественное влияние на вероятности ошибок классификатора.

На рис. 1 приведена структурная схема устройства ОМП ВЛ, реализующего многогипотезный последовательный анализ с использованием алгоритма Армитажа. Устройство ОМП ВЛ имеет многоканальную структуру, включающую $M \cdot (M - 1)$ каналов, где M характеризует число участков, на которые разбивается зона осмотра ВЛ. Например, для $M = 3$ количество каналов будет составлять $3 \cdot (3 - 1) = 6$, где будет

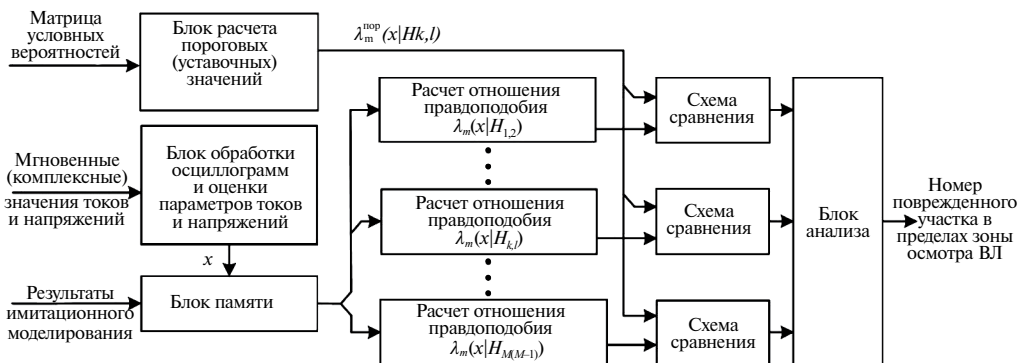


Рис. 1. Структурная схема устройства ОМП ВЛ, реализующего процедуру многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитажа.

реализоваться парная проверка гипотез: $H_{1,2}, H_{1,3}; H_{2,1}, H_{2,3}; H_{3,1}, H_{3,2}$. Количество участков ВЛ может быть любым и определяться персоналом электросетевой компании исходя из опыта эксплуатации.

На вход устройства ОМП ВЛ (рис. 1) поступают мгновенные (комплексные) значения токов и напряжений, полученные из осциллограмм аварийного режима. На основе этой информации в блоке обработки осциллограмм и оценки параметров токов и напряжений вычисляются составляющие вектора x . В состав вектора x входят величины, характеризующие поврежденный участок ВЛ (активное сопротивление, реактивное сопротивление, величина реактивной мощности, величина коэффициента токораспределения и др.). Кроме того, в него входят расчетные значения, вычисленные по различным алгоритмам ОМП ВЛ по ПАР, имеющим различные систематические и случайные погрешности.

Далее в каждом из блоков расчета отношения правдоподобия на основе вектора x вычисляются отношения правдоподобия по выражению (2). При вычислении каждого $\lambda_m(x|H_{k,l})$ из блока памяти для полученных в блоке обработки осциллограмм и оценки параметров токов и напряжений значений x поступают соответствующие значения $p_m(x|H_k)$ и $p_m(x|H_l)$. Значения $p_m(x|H_k)$ и $p_m(x|H_l)$ формируются для разных сочетаний гипотез $H_{k,l}$, $k \neq l$ на основе результатов имитационного моделирования.

Имитационное моделирование выполняется заранее, до момента реализации алгоритма ОМП ВЛ, а его результаты записываются в блок памяти. Вероятностные распределения $p_m(x|H_k)$ и $p_m(x|H_l)$ могут быть получены на основе статистических данных, с учетом ошибок, выявляемых ремонтными бригадами при осмотрах ВЛ после аварийных отключений ВЛ. Также они могут быть получены на основе нормируемой величины зоны осмотра ВЛ (усредненные величины для ВЛ различной длины и напряжения), что менее точно.

На первые входы схем сравнения из блока расчета пороговых (уставочных) значений подаются соответствующие пороговые значения $\lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$ для реализации сравнения $\lambda_m(x|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$. Рассчитанные значения отношения правдоподобия для каждой из гипотез поступают на вторые входы схем сравнения, начиная с первой и до $M \cdot (M - 1)$. При достижении на шаге m последовательной процедуры значения $\lambda_m(x|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$ с выхода схемы сравнения выдается логический сигнал в блок анализа.

Как отмечалось выше процедура последовательного анализа реализуется до момента соблюдения условия, когда все $(M - 1)$ отношений правдоподобия $\lambda_m(x|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$, $l = 1, \dots, M$, $k \neq l$, характерных гипотезе H_k , не превысят одновременно соответствующие пороги $\lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$. В этом случае процедура последовательного анализа останавливается и принимается решение о том, что повреждение ВЛ находится на участке под номером k . С выхода блока анализа устройства ОМП ВЛ (рис. 1) выдается информация ремонтному персоналу о поврежденном участке (в виде его номера) в пределах зоны осмотра ВЛ.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ОМП ВЛ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Рассмотрим пример реализации ОМП ВЛ на основе разработанного метода с применением многогипотезного последовательного анализа и алгоритма Армитажа на примере на ВЛ 110 кВ длиной $l = 50$ км с двухсторонним питанием (рис. 2) [25].

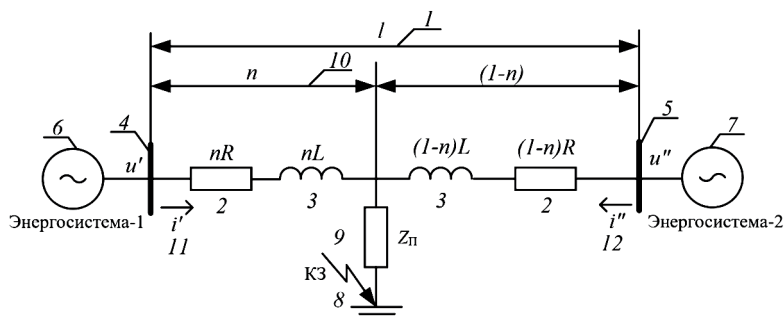


Рис. 2. Однолинейная схема замещения ВЛ 110 кВ.

На рис. 2 приведена однолинейная схема замещения ВЛ 110 кВ длиной (l), с фазным активным сопротивлением (R) 2 и индуктивностью (L) 3, соединяющей шины подстанций 4 и 5 двух энергосистем 6 и 7. На ВЛ показано место КЗ 8 за переходным сопротивлением ($Z_{\text{п}}$) 9 на расстоянии ($x = n \cdot l$) 10 от одного из концов ВЛ. При КЗ по ВЛ протекают ток (i') со стороны шин подстанции 4 и ток (i'') со стороны шин подстанции 5. С двух концов ВЛ измеряются не синхронизированные по времени мгновенные значения фазных токов (i'_A, i'_B, i'_C), (i''_A, i''_B, i''_C) и напряжений (u'_A, u'_B, u'_C), (u''_A, u''_B, u''_C) в момент КЗ.

Относительное расстояние до места повреждения ВЛ n определим в соответствии с известным выражением (6):

$$n = [(u'(m) - u''(m)) + R \cdot i'(m) + L \cdot i''(m)/dt_m] / [R \cdot (i'(m) + i''(m)) + L \cdot (i'(m)/dt_m + i''(m)/dt_m)]. \quad (6)$$

Такой метод ОМП ВЛ обладает малыми ошибками расчета расстояния до места повреждения в условиях КЗ с неискаженными (синусоидальными) токами и напряжениями в осциллограммах аварийного режима [25]. Примем, что со стороны Энергосистемы-1 (рис. 2) дискретные мгновенные значения тока $i'(m)$ искажены фликером. Искаженный сигнал тока $i'(m)$ показан на рис. 3а.

Примем, что со стороны Энергосистемы-2 (рис. 2) присутствует нелинейная нагрузка, которая выдает в электрическую сеть интергармоники. В примере

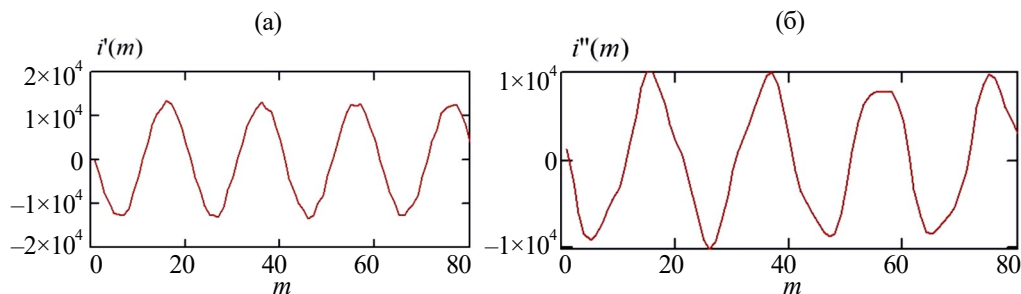


Рис. 3. Осциллограммы токов ВЛ, искаженных: (а) — фликером со стороны Энергосистемы-1; (б) — интергармоникой с частотой $f_{\text{и}} = 135$ Гц со стороны Энергосистемы-2.

мгновенные значения тока $i''(m)$ искажены интергармоникой с частотой $f_{\text{и}} = 135$ Гц, амплитудой $I_{\text{и}} = 0.15 \cdot I'$ и нулевой начальной фазой, как показано на рис. 3б.

Расчетное выражение для определения места повреждения при наличии фликера и интергармоники частоты $f_{\text{и}} = 135$ Гц будет соответствовать равенству (7):

$$\begin{aligned} n_{\text{и}}(m) = & \{(u'(m) - u_{\text{и}}''(m)) + I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + L \cdot \cos(2\pi f(t_3 + \\ & + m \cdot t_{\text{д}}))] + 0,15 \cdot I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + L \cdot \cos(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))]\} / \\ & / \{(I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) + I'') \cdot [R \cdot \sin(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + L \cdot \cos(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))] + \\ & + 0,15 \cdot I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + L \cdot \cos(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))]\}, \\ u'(m) = & U + I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) \cdot [n \cdot R \cdot \sin(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + n \cdot L \cdot \cos(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))], \\ u_{\text{и}}''(m) = & U + (1 - n) \cdot R \cdot [I' \cdot \sin(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + 0,15 \cdot I' \cdot \sin(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))] + \\ & + (1 - n) \cdot L \cdot [I' \cdot \sin(2\pi f(t_3 + m \cdot t_{\text{д}})) + 0,15 \cdot I' \cdot \sin(2\pi f_{\text{и}}(t_3 + m \cdot t_{\text{д}}))], \end{aligned} \quad (7)$$

где k – число (постоянный коэффициент), характеризующее «глубину искажений» фликером; $\text{rnd}(m)$ – случайное число (например, распределенное по равномерному закону в интервале $[0; 1]$, формируемое при каждом значении дискретного времени m); U – напряжение в месте повреждения; t_3 – время задержки; $t_{\text{д}}$ – шаг дискретизации.

Технические характеристики ВЛ и измеренные параметры аварийного режима с двух концов ВЛ приведены в табл. 1. Данные измерений параметров аварийного режима получены с регистратора аварийных событий при реальном КЗ на рассматриваемой ВЛ 110 кВ.

Таблица 1. Технические характеристики ВЛ и измеренные параметры аварийного режима

Параметр	I' (А)	I'' (А)	f (Гц)	$t_{\text{д}}$ (с)	L (Гн)	R (Ом)	$f_{\text{и}}$ (Гц)	U (В)	n	k	t_3 (с)
Значение	13908.15	9030.13	50	0.0025	0.0643	12.5	135	29323.83	0.5	0.15	0.003

Подстановка численных значений из табл. 1 в выражение (7) позволило получить следующие результаты:

- при $m = 20$; $n_{\text{и}}(20) = 0.486$; $\Delta x = l \cdot (n - n_{\text{и}}) = 50 \cdot (0.5 - 0.486) = 0.7$ (км);
- при $m = 60$; $n_{\text{и}}(60) = 0.526$; $\Delta x = l \cdot (n - n_{\text{и}}) = 50 \cdot (0.5 - 0.526) = -1.30$ (км).

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что ошибки ОМП ВЛ могут иметь как положительный, так и отрицательный знак. Кроме того, они распределены неравномерно относительно различных моментов времени.

Так как длина ВЛ составляет $l = 50$ км, то зона осмотра ремонтной бригадой для поиска фактического места повреждения, в соответствии с требованиями нормативно-технических документов, не должна превышать $\pm 10\%$ длины ВЛ [15]. Следовательно, $\Delta l = \pm 50 \cdot 0.1 = \pm 5$ км относительно места повреждения.

Учитывая нормальный закон распределения ошибок ОМП ВЛ по ПАР и правило трех сигм [26] принимаем, что стандартное отклонение (среднеквадратическое

отклонение) нормального закона распределения ошибок устройства ОМП ВЛ составляет $\sigma \approx (2 \cdot \Delta l) / 6 = 10 / 6 = 1.67$ км.

Рассмотрим процесс реализации последовательного анализа при ОМП ВЛ с разбиением зоны осмотра ВЛ на три участка относительно места ее повреждения (рис. 4), соответствующих трем гипотезам: $H_1: \mu = -\sigma$; $H_2: \mu = 0$ и $H_3: \mu = \sigma$. Каждая из гипотез соответствует принятию решения о соответствии места повреждения ВЛ значению математических ожиданий μ .

Пусть по результатам расчета расстояния до места повреждения по выражению (7), выполненного на основе мгновенных значений осциллограмм токов (рис. 3а, б) и напряжений получены десять последовательных выборочных величин $l_{кз}$, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2. Выборочные величины расстояния до места повреждения, полученные по измерениям мгновенных значений осциллограмм токов и напряжений аварийного режима.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_{кз}(\text{км})$	25.85	24.9	23.7	26.35	24.6	25.6	25.7	27.36	23.75	25.05

Из-за разброса выборочных значений $l_{кз}$ невозможно однозначно принять решение относительно справедливости гипотез H_1, H_2, H_3 . Математическое ожидание выборочных значений $l_{кз}$ (табл. 2) равно $M[l_{кз}] = 25.185$ (км).

Для реализации последовательного анализа введем матрицу условных вероятностей (выражение (1)) принятия решения относительно поврежденного участка ВЛ:

$$\|P(k|i)\| = \|P_i(k)\| = \|P_{ik}\| = \begin{vmatrix} 0.70 & 0.15 & 0.15 \\ 0.15 & 0.70 & 0.15 \\ 0.15 & 0.15 & 0.70 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Выбор элементов матрицы должен быть выполнен с учетом эксплуатационных особенностей ВЛ, а также экономических последствий от неправильного принятия решения при ОМП ВЛ.

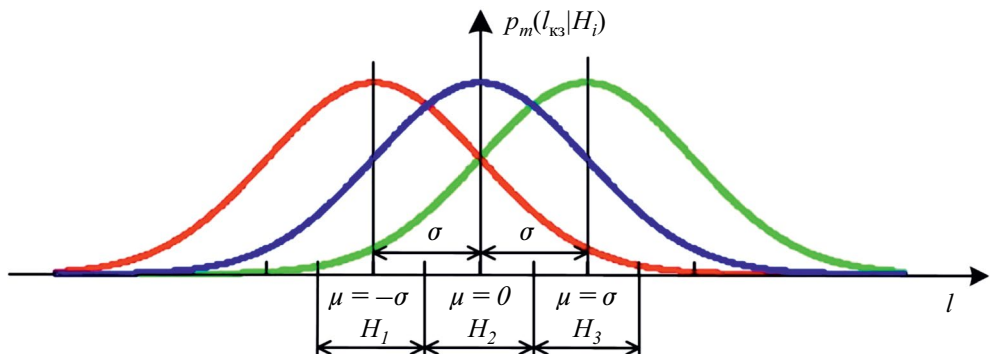


Рис. 4. Распределение вероятностей гипотез $p_m(l_{кз}|H_i)$.

Произведем расчет пороговых (уставочных) значений, необходимых для реализации многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитаж, с учетом составляющих матрицы $\|P(kl)\|$ (выражение (1)):

$$\begin{aligned}\lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{1,2}) &= \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{1,3}) = \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{2,1}) = \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{2,3}) = \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{3,1}) = \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{3,2}) = \\ &= (1/P_{12}) \cdot [1 - \sum_{k \neq l} P_{12}] = (1/0.15) \cdot [1 - 0.15] = 6.667 \cdot 0.85 = 5.667\end{aligned}\quad (9)$$

Вычисление отношений правдоподобия для каждого соотношения kl целесообразно выполнить с использованием стандартной гауссовой функции, таблицы которой приведены в [26]:

$$f(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \exp\{-x^2/2\}, \quad (10)$$

На первом шаге последовательного анализа в относительных единицах $I_{\text{кз}}^{\text{т}}(1) = 0.398$, тогда получаем:

$$\lambda_1(0.398|H_{1,2}) = p_1(0.398|H_1)/p_2(0.398|H_2) = 0.0485/0.369 = 0.131;$$

$$\lambda_1(0.398|H_{1,3}) = p_1(0.398|H_1)/p_3(0.398|H_3) = 0.0485/0.18 = 0.269;$$

$$\lambda_1(0.398|H_{2,1}) = p_2(0.398|H_2)/p_1(0.398|H_1) = 0.369/0.0485 = 7.608;$$

$$\lambda_1(0.398|H_{2,3}) = p_2(0.398|H_2)/p_3(0.398|H_3) = 0.369/0.18 = 2.05;$$

$$\lambda_1(0.398|H_{3,1}) = p_3(0.398|H_3)/p_1(0.398|H_1) = 0.18/0.0485 = 3.711;$$

$$\lambda_1(0.398|H_{3,2}) = p_3(0.398|H_3)/p_2(0.398|H_2) = 0.18/0.369 = 0.488.$$

Результаты расчетов показывают, что на первом шаге многогипотезного последовательного анализа только лишь одно отношение правдоподобия $\lambda_1(0.398|H_{2,1}) = 7.608$ превышает заданное пороговое значение. Это обусловлено введенным условием, что все $(M - 1)$ отношения правдоподобия $\lambda_m(x|H_{k,l}) > \lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$, $l = 1, \dots, M$, $k \neq l$, характерных гипотезе H_k , должны одновременно превысить соответствующие пороги $\lambda_m^{\text{пор}}(x|H_{k,l})$. Если это условие не соблюдается, то последовательный анализ продолжается.

Аналогичным образом рассчитываются отношения правдоподобия на следующих шагах m многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитаж (табл. 3).

Таблица 3. Результаты расчетов отношения правдоподобия, необходимые для реализации многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитаж

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_m(x H_{1,2})$	0.131	0.043	0.047	0.004	0.002	—	—	—	—	—
$\lambda_m(x H_{1,3})$	0.269	0.475	9.362	0.917	2.953	—	—	—		
$\lambda_m(x H_{2,1})$	7.608	23.098	23.236	298.12	669.88	—	—	—	—	—
$\lambda_m(x H_{2,3})$	2.05	10.98	196.25	247.66	1790	—	—	—	—	—
$\lambda_m(x H_{3,1})$	3.711	2.10	1.05	1.07	0.332	—	—	—	—	—
$\lambda_m(x H_{3,2})$	0.488	0.091	0.005	0.004	0.0006	—	—	—	—	—

Наглядно процесс реализации многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитаж приведен на рис. 5.

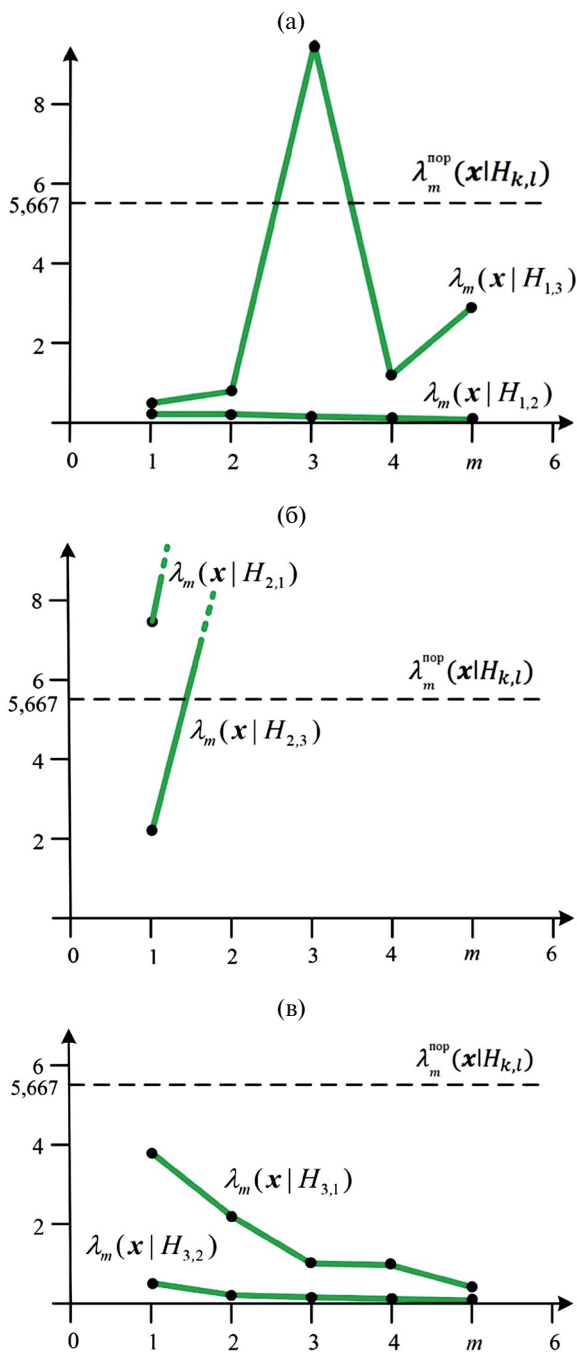


Рис. 5. Процесс реализации многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитажа на ВЛ 110 кВ длиной $l = 50$ км: (а) — отношения правдоподобия $\lambda_m(x | H_{1,2})$, $\lambda_m(x | H_{1,3})$; (б) — отношения правдоподобия $\lambda_m(x | H_{2,1})$, $\lambda_m(x | H_{2,3})$; (в) — отношения правдоподобия $\lambda_m(x | H_{3,1})$, $\lambda_m(x | H_{3,2})$.

Анализ рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

- многогипотезный последовательный анализ с алгоритмом Армитажа позволяет выбрать поврежденный участок ВЛ в интервале $M[l_{кз}] \pm \sigma/2 = 25.185 \pm 0.835$ (км). По сравнению с традиционными методами ошибка ОМП уменьшилась на 16.5%;
- процедура последовательного анализа не требует значительных временных затрат, позволяя принять решение о поврежденном участке за 2 шага, практически не влияя на быстродействие алгоритма ОМП ВЛ;
- для повышения быстродействия ОМП ВЛ отсутствует необходимость в применении специальных вычислительных методов;
- сопоставление отношений правдоподобия, приведенных на рис. 5, позволяет утверждать, что наименее вероятной является гипотеза H_3 , поэтому осмотр ВЛ следует начинать с участка 25.185 ± 0.835 (км) в сторону Энергосистемы-1 (рис. 2), т.е. наиболее вероятного места повреждения;
- быстродействие принятия решения о месте повреждения ВЛ при реализации последовательного анализа с алгоритмом Армитажа зависит от степени искажений токов и напряжений в осциллограммах аварийного режима, в том числе отклонений параметров качества электроэнергии от нормативных значений.

ВЫВОДЫ

Известные методы ОМП ВЛ по ПАР не учитывают влияние случайных факторов, определяющих величину ошибки при расчете расстояния до места повреждения, так как они реализованы на основе детерминированных процедур.

Разработанный метод многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитажа позволяет адаптировать искажения токов и напряжений в осциллограммах аварийного режима к условиям оценки их параметров в процессе распознавания поврежденного участка ВЛ. Это позволяет снизить величину ошибки при расчете расстояния до места повреждения на ВЛ. Это позволило уменьшить ошибку при расчете расстояния до места повреждения на ВЛ в приведенном примере на 16.5%, однако в каждом конкретном случае получаемый эффект будет зависеть от величины искажений токов и напряжений (чем больше величина искажений, тем эффект будет больше).

Разработанный метод ОМП ВЛ по ПАР, включающий разбиение зоны осмотра ВЛ на множество участков, с последующей реализацией процедуры распознавания поврежденного участка, является перспективным, так как позволяет сократить зону осмотра ВЛ ремонтной бригадой при поиске места повреждения, а значит и время проведения аварийно-восстановительных работ.

Результатами расчетов доказано, что применение многогипотезного последовательного анализа с алгоритмом Армитажа позволяет обеспечить однозначность принятия решения относительно поврежденного участка ВЛ в условиях искажений.

Быстродействие разработанного метода ОМП ВЛ незначительно уменьшается (зависит от количества шагов последовательного анализа), на что влияет степень искажения токов и напряжений в осциллограммах аварийного режима, в том числе отклонения параметров качества электроэнергии от нормативных значений. Однако, чем искажения меньше, тем меньше время принятия решения о месте повреждения на ВЛ.

Применение разработанного метода в устройствах ОМП ВЛ, обладающего более высокой точностью и достаточным быстродействием, позволит повысить надежность электроснабжения потребителей и надежность функционирования энергосистем за счет минимизации времени устранения повреждений на ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Voropai N.* Electric Power System Transformations: A Review of Main Prospects and Challenges // *Energies*. 2020. Vol. 13. 21.
2. *Farkhadzhe E.M., Muradaliev A.Z., Abdullaeva S.A., Nazarov A.A.* Quantitative Assessment of the Operational Reliability of Overhead Power Transmission Lines // *Power Technology and Engineering*. 2022. Vol. 55. Pp. 790–796.
3. *Малый А.С.* Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / А.С. Малый, Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд. — М.: Энергия, 1972. — 215 с.
4. *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. Pp. 158599–158615.
5. *Thomas D., Fung J.* Measuring downstream supply chain losses due to power disturbances // *Energy Economics*. 2022. Vol. 114. 106314.
6. *Krzysztof G., Kowalik R., Rasolomampionona D.D., Anwar S.* Traveling wave fault location in power transmission systems: An overview // *Journal of Electrical Systems*. 2011. Vol. 7. No. 3. P. 287–296.
7. *Лачугин В.Ф.* Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // *Релейная защита и автоматизация*. 2023. № 1 (50). С. 58–61.
8. *Обалин М.Д., Куликов А.Л.* Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП // *Промышленная энергетика*. 2013. № 12. С. 35–39.
9. *Аржанников Е.А.* Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов; 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. *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.
12. *Куликов А.Л.* Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / А.Л. Куликов. Под ред. М.Ш. Мисриханова. — Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. — 315 с.
13. *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. Pp. 158599–158615.
14. *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.
15. ПАО «ФСК ЕЭС» Стандарт организации 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.

16. Мартынов М.В. Способ интервального определения места повреждения линии электропередачи. Патент РФ № 2720949, МПК H03H 03/40, опубл. 15.05.2020, Бюл. № 14.
17. Быкадоров А.Л. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Вестник РГУПС. 2021. № 2. с. 119–128.
18. Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Илюшин П.В., Слузова А.В. Определение поврежденного участка высоковольтной воздушной линии электропередачи методом последовательного распознавания // Электричество. 2023. № 10. С. 22–36.
19. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 10 с. Введен с 01.07.2014.
20. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.
21. Armitage P. Sequential analysis with more than two alternative hypotheses, and its relation to discriminant function analysis // Journal of the Royal Statistical Society. 1950. Vol. 12. P. 137–144.
22. Ghosh B.K., Sen P.K. Handbook of Sequential Analysis (Statistics: A Series of Textbooks and Monographs), 1st edition. — CRC Press. 1991. — 664 p.
23. Вальд А. Последовательный анализ. Пер. с англ. — М.: Физматгиз. 1960. — 328 с.
24. Jouny I., Garber F.D. M-ary sequential hypothesis tests for automatic target recognition // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. 1992. Vol. 28. No. 2. Pp. 473–483.
25. Висяцев А.Н., Пленков Э.Р., Тигунцев С.Г. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи при несинхронизированных замерах с двух ее концов. Патент РФ № 2508556, МПК G01R 31/08, опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6.
26. Венцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. — 5-е изд. стер. — М.: Высшая школа, 1998. — 576 с.

Fault Location on Overhead Power Lines Using Multi-Hypothesis Sequential Analysis and the Armitage Algorithm

A. L. Kulikov¹, P. V. Ilyushin^{2,*}, A. A. Loskutov¹

¹*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

The use of modern methods for determining the fault location (FL) on overhead power lines (OHPLs), which have high accuracy and high speed, allows you to quickly find and repair damage. Various physical principles and algorithms for calculating the distance to the site of damage are used in FL OHPLs devices from different manufacturers. Some of algorithms for FL on OHPLs use the emergency mode parameters (EMP), other algorithms use measurement results based on wave methods. Many random factors that determine the magnitude of the error in calculating the distance to the FL affect the operation of FL devices by EMP. Methods based on deterministic procedures used in well-known FL devices for OHPLs do not take into account the influence of random factors, which

significantly increases the time to search for the fault. The authors have developed a new method of FL on OHPLs using multi-hypothesis sequential analysis and the Armitage algorithm. The task of recognizing a faulted section of an OHPL is formulated as a statistical problem. To do this, the inspection area of the OHPL is divided into many sections, followed by the implementation of the procedure for FL. The developed method makes it possible to adapt the distortions of currents and voltages on the emergency mode oscillograms to the conditions for estimating their parameters. The results of the calculations proved that the implementation of the developed method has practically no effect on the speed of the FL algorithm for the OHPL by EMP. This ensures the uniqueness of determining the faulted section of the OHPL under the influence of random factors, which leads to a significant reduction in the inspection area of the OHPL. The application of the developed method in FL devices for OHPLs will ensure the required reliability of power supply to consumers and reduce losses from power outages by minimizing the time to search for a fault.

Keywords: overhead power line, fault location, emergency mode parameters, multi-hypothesis sequential analysis; Armitage algorithm