

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В УСЛОВИЯХ ОТКЛОНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ НОРМАТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Анализируются методы определения мест повреждений (ОМП) линий электропередачи в системах промышленного электроснабжения, включающих источники распределенной генерации, в которых возможны существенные отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений. Это способствует дополнительным ошибкам при ОМП по параметрам аварийного режима. Рассматривается метод, повышающий точность ОМП ЛЭП при несинхронизированных замерах с двух ее концов в условиях отклонений токов и напряжений от синусоидальной формы. Предлагаемый способ ОМП использует дополнительные уточняющие данные о параметрах электроэнергетической системы, а также метод наименьших квадратов для обработки информации.

АВТОРЫ:

А.Л. Куликов,
А.А. Севостьянов,
А.А. Лоскутов,
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

П.В. Илюшин,
Институт энергетических исследований
Российской академии наук

Ключевые слова:

#определение места повреждения; #воздушная линия электропередачи; #отклонение показателей качества электрической энергии; #метод наименьших квадратов.



Введение

Быстрое и точное определение мест повреждений (ОМП) линий электропередачи — актуальная и важная задача для обеспечения надежности электроэнергетических систем [ЭЭС], функционирующих в режимах, приближающихся к пределам устойчивости [1]. Такая ситуация может возникать, например, в системах промышленного электроснабжения, включающих источники распределенной генерации, с выделением энергорайона на сбалансированную нагрузку [2]. Важно, что ОМП ЛЭП в таком случае, как правило, осуществляется в условиях существенных отклонений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) от нормативных значений.

Несмотря на объемные и множественные исследования по теме ОМП ЛЭП [3–21], разработка надежных и точных алгоритмов расчета расстояния до места повреждения по-прежнему считается достаточно сложной задачей. Последние публикации по опытам короткого замыкания (КЗ), проведенным на объектах магистральных электрических сетей ПАО «Россети», свидетельствуют о крайне малых ошибках и перспективности применения волнового ОМП ЛЭП [15–17], в том числе методов активного зондирования ЛЭП [14, 18, 19]. Однако использование ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима является несомненно актуальным для систем электроснабжения различного назначения ввиду доступности регистрации и измерений цифровыми устройствами релейной защиты параметров токов и напряжений [3–14].

Ошибки ОМП ЛЭП связаны с различными факторами, в состав которых могут, например, входить использование упрощенных моделей ЭЭС для формирования алгоритма ОМП; неточности задания характеристик ЭЭС (включая комплексные ЭДС, а также сопротивления источников, продольные и поперечные удельные комплексные сопротивления ЛЭП и др.); неизвестное сопротивление КЗ; влияние параметров нагрузки; взаимная связь с соседними ЛЭП на участках совместного прохождения и др. [3–5]. Случайное сочетание указанных факторов между собой оказывает существенное влияние на точность ОМП ЛЭП [3]. Для систем промышленного электроснабжения в отличие от магистральных электрических сетей характерно дополнительное и значительное влияние на точность ОМП ЛЭП отклонений ПКЭ от нормативных значений. Снижение ошибок ОМП ЛЭП достигается путем использования дополнительных уточняющих данных о параметрах ЭЭС, а также применением специальных математических методов обработки информации, в том числе методов искусственного интеллекта [3–5, 20]. Обоснованность применения методов цифровой обработки сигналов особенно проявляется при использовании мгновенных значений осциллограмм аварийных событий [21].

Цель статьи — разработка точного метода ОМП ЛЭП при несинхронизированных замерах с двух ее концов в условиях отклонений токов и напряжений от синусоидальной формы. Предполагается, что реализация ОМП ЛЭП осуществляется с использованием дифференциальных уравнений, описывающих аварийные токи и напряжения, зарегистрированные по концам ЛЭП, а также с учетом ее распределенного емкостного сопротивления.

Учет поперечной проводимости воздушной ЛЭП при определении места ее повреждения

Стандарт ПАО «ФСК ЕЭС» [22] предполагает, что отсутствие необходимости в учете реактивной (емкостной) проводимости должно быть предварительно оценено. Пренебрежение этой проводимостью (особенно при расчетах вручную) допустимо, если возникающая из-за этого погрешность расчета расстояния не превышает 2%. Погрешность от пренебрежения реактивной проводимостью зависит от протяженности ЛЭП и сопротивления примыкающих к ней сетей.

Указанный стандарт вводит следующие рекомендации. При использовании параметров нулевой последовательности допустимо пренебрежение этой проводимостью для воздушных ЛЭП протяженностью до 100 км, при использовании параметров обратной последовательности — до 120–150 км. Для ВЛ большой протяженности, где основное значение приобретает отношение сопротивлений примыкающей сети и ЛЭП, допустимо не учитывать реактивную проводимость для ЛЭП длиной до 200–250 км, если это отношение находится в диапазоне 0,1–0,5.

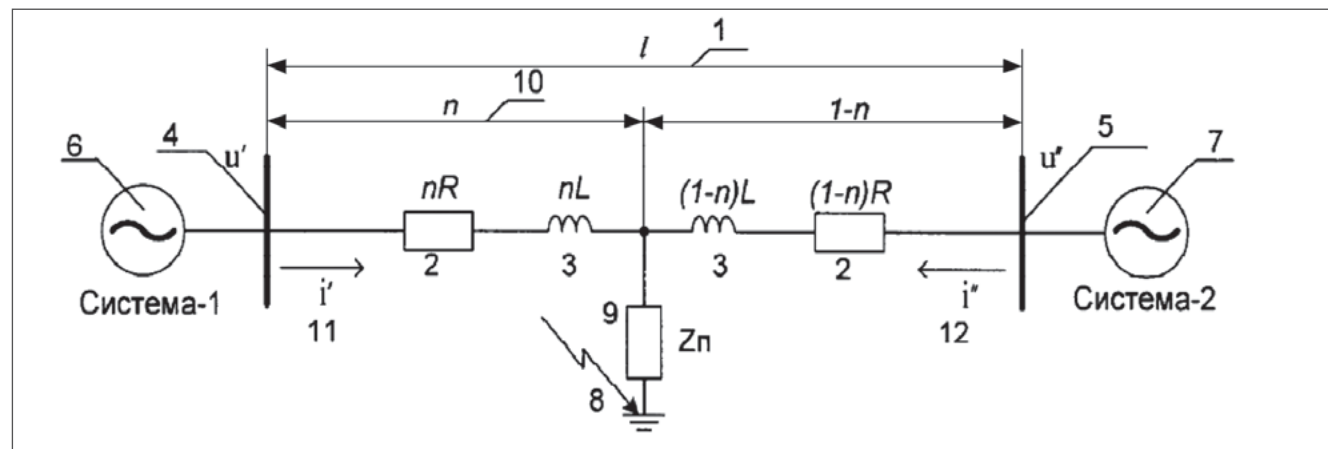
В условиях пренебрежения емкостной проводимостью воздушной ЛЭП на рис. 1 приведена однолинейная схема замещения. Для воздушной ЛЭП введены следующие обозначения: 1 — длина l ЛЭП; 2 — фазное активное сопротивление (R) и 3 — фазная индуктивность (L); 4 и 5 — шины систем 6 и 7. На линии показано КЗ [8] за переходным сопротивлением Z_n [9] на расстоянии n [10] от одного конца линии. При возникновении КЗ на линии по ней протекают ток i' со стороны шины 4 и ток i'' со стороны шины 5. При этом на шинах 4 и 5 с двух концов линии измеряют 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.

Использование дифференциального уравнения для ЛЭП [23, 24] позволяет рассчитать относительное расстояние до места повреждения n в соответствии с соотношением [23]:

$$n = [(u'_m - u''_m) + R \cdot i''_m + L \cdot i''_m / dt_m] / [R \cdot (i'_m + i''_m) + L \cdot (i'_m / dt_m + i''_m / dt_m)]. \quad (1)$$

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛЭП, НЕ УЧИТЫВАЮЩАЯ ЕЕ ЕМКОСТНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ

Рис. 1



При таком методе ОМП ЛЭП достаточно малы ошибки расчета расстояния до повреждения в условиях КЗ и неискаженных (синусоидальных) токах и напряжениях осциллограмм аварийного события [23].

При учете поперечной емкостной проводимости схема замещения для ОМП воздушной ЛЭП (см. рис. 1) изменяется и принимает вид, представленный на рис. 2. На схеме замещения на рис. 2 дополнительно обозначены элементы распределенной емкостной проводимости — 11 и 12.

Соответственно изменяются дифференциальные уравнения, описывающие соотношение токов и напряжений поврежденной ЛЭП. А падение напряжения до точки короткого замыкания с двух концов линии (см. рис. 2) соответствует следующему выражению:

$$u' - n \cdot i' \cdot R - n \cdot L \cdot di'/dt + n \cdot R \cdot C \cdot du'/dt + n \cdot L \cdot C \cdot d^2u'/dt^2 = U = u'' - (1-n) \cdot i'' \cdot R - (1-n) \cdot L \cdot di''/dt + (1-n) \cdot R \cdot C \cdot du''/dt + (1-n) \cdot L \cdot C \cdot d^2u''/dt^2, \quad (2)$$

где L и C — продольная индуктивность и поперечная емкость воздушной ЛЭП, соответствующие схеме замещения на рис. 2.

После преобразования выражения (2) получаем выражение для расчета расстояния до места повреждения воздушной ЛЭП применительно к схеме замещения на рис. 2:

$$n = [(u' - u'') + i'' \cdot R + L \cdot di''/dt - R \cdot C \cdot du''/dt - L \cdot C \cdot d^2u''/dt^2] / [R \cdot (i' + i'') + L \cdot (di'/dt + di''/dt) - R \cdot C \cdot (du'/dt + du''/dt) - L \cdot C \cdot (d^2u'/dt^2 + d^2u''/dt^2)]. \quad (3)$$

Следует отметить, что в отличие от (1) в выражении (3) наряду с параметрами воздушной ЛЭП, напряжениями

u' и u'' , токами i' и i'' , а также их производными di'/dt , di''/dt дополнительно задействованы первые du'/dt , du''/dt , а также вторые d^2u'/dt^2 , d^2u''/dt^2 производные напряжений u' и u'' . Именно использование первых и вторых производных напряжения позволяет учесть поперечную емкостную проводимость схемы замещения на рис. 2.

Известно [25], что применение дифференциальных уравнений, соответствующих модели ЛЭП (см. рис. 2), позволяет учитывать при обработке осциллограмм аварийных событий как апериодическую составляющую тока, так и переходные высокочастотные компоненты сигналов напряжения и тока без какой-либо дополнительной фильтрации. Таким образом, способ определения места КЗ на воздушной линии электропередачи при несинхронизированных замерах с двух ее концов, использующий модель воздушной ЛЭП (см. рис. 2), предполагает включение источников переходных процессов сигналов напряжения и тока в алгоритм расчета расстояния до места повреждения (3) и не требует дополнительной фильтрации составляющих переходных процессов в осциллограммах аварийных событий.

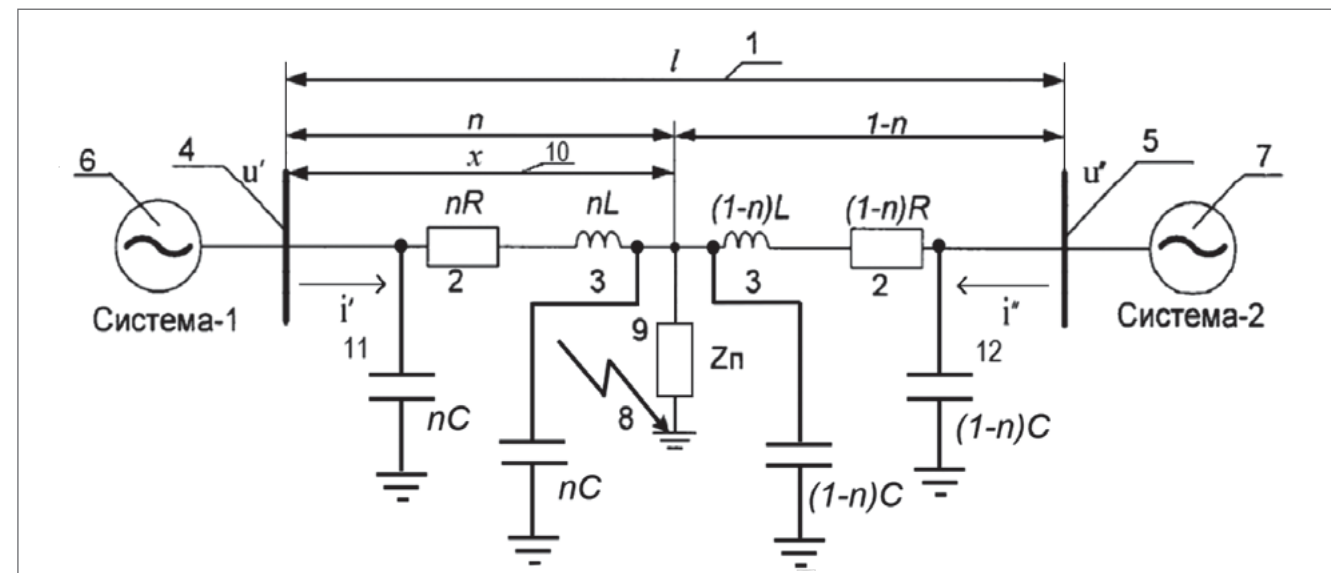
Влияние отклонений показателей качества электрической энергии на точность определения места повреждения воздушных ЛЭП

Причинами возникновения ошибок ОМП на воздушных ЛЭП в системах промышленного электроснабжения при отклонениях ПКЭ от нормативных значений могут, например, стать:

- отклонения промышленной частоты от значения $f = 50$ Гц, определяющие ошибки, вызванные несоответствующей частотой дискретизации при реализации расчетных алгоритмов;

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛЭП С УЧЕТОМ ЕЕ ЕМКОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Рис. 2



- насыщение трансформаторов тока и соответствующее ему появление апериодической (постоянной) составляющей в синусоидальных аварийных осциллограммах токов;
- наличие кратных гармоник и интергармоник в аварийных осциллограммах токов и напряжений, вызванных, например, влиянием электроприемников промышленных потребителей;
- искажающее воздействие различных помеховых составляющих в виде фликера и высокочастотных индустриальных помех;
- другие факторы.

Поскольку в методе [23], его расчетных соотношениях предусмотрено, что аварийные токи и напряжения представлены идеальными синусоидальными сигналами частоты $f = 50$ Гц без помех, а вычисления ведутся с использованием только отдельных мгновенных значений, то из-за отклонений частных ПКЭ (или их совокупного воздействия) ошибки ОМП могут быть существенными. Причем отклонения ПКЭ могут находиться в пределах допустимых значений, а их совокупное влияние на точность ОМП ЛЭП может оказаться значительным.

Для оценки ошибок ОМП, вызванных отклонениями ПКЭ, воспользуемся расчетным примером, приведенным в [23], а также расчетным выражением (1), включающим мгновенные значения тока и напряжения с двух

сторон ЛЭП. Считаем, что $i'(m)$ и $di'(m)/dt_m$, а также $i''(m)$ и $di''(m)/dt_m$ являются квадратурными (ортогональными) составляющими, полученными в некоторый момент времени (m) . Тогда амплитуды токов по концам ЛЭП можно определить из выражения [4]:

$$I' = \sqrt{[i'(m)]^2 + [di'(m)/dt_m]^2}; \quad I'' = \sqrt{[i''(m)]^2 + [di''(m)/dt_m]^2}, \quad (4)$$

где функция $\sqrt{\cdot}$ означает операцию вычисления квадратного корня.

Падения напряжения до точки КЗ с двух сторон ЛЭП (см. рис. 1) будут соответствовать равенству:

$$u'(m) - n \cdot i'(m) \cdot R - n \cdot L \cdot di'(m)/dt_m = U = u''(m) - (1-n) \cdot i''(m) \cdot R - (1-n) \cdot L \cdot di''(m)/dt_m, \quad (5)$$

Формирование осциллограмм напряжения по концам ЛЭП можно реализовать с использованием следующих выражений:

$$u'(m) = U + n \cdot i'(m) \cdot R + n \cdot L \cdot di'(m)/dt_m; \quad (6)$$

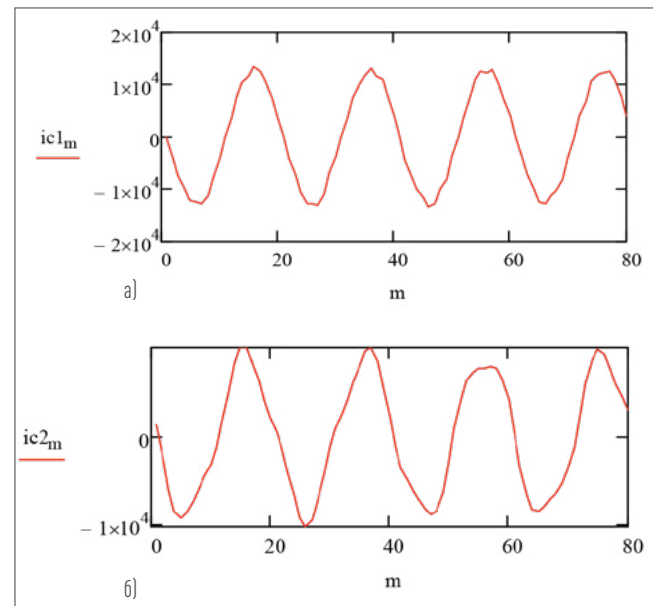
$$u''(m) = U + (1-n) \cdot i''(m) \cdot R + (1-n) \cdot L \cdot di''(m)/dt_m, \quad (7)$$

а также выражений для квадратурных составляющих токов по концам ЛЭП:

$$i'(m) = I' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_A); \quad di'(m)/dt_m = I' \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_A); \quad (8)$$

СИНУСОИДАЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ ТОКА, ИСКАЖЕННЫЕ СООТВЕТСТВЕННО ФЛИКЕРОМ (А), ИНТЕРГАРМОНИКОЙ (Б)

Рис. 3



$$i''(m) = I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d);$$

$$di''(m)/dt_m = I'' \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d). \quad (9)$$

Тогда мгновенные значения осциллограмм напряжения будут соответствовать выражениям:

$$u'(m) = U + n \cdot R \cdot I' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + n \cdot L \cdot I' \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d); \quad (10)$$

$$u''(m) = U + (1 - n) \cdot R \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + (1 - n) \cdot L \cdot I'' \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d). \quad (11)$$

Рассчитаем значение U , подставляя данные численного примера [23]:

$$u' = 100051,9 \text{ В}; u'' = 79091 \text{ В}; i' = 11274,6 \text{ А};$$

$$di'/dt = 8143,71 \text{ А/с}; i'' = 7336,6 \text{ А}; di''/dt = 5264,74 \text{ А/с}; n = 0,5.$$

Выберем при этом удельные параметры ЛЭП 110 кВ, воспользовавшись данными [26] и принимающими для провода АС-120 значениями $R_{уд} = 0,25 \text{ Ом/км}$, $X_{уд} = 0,404 \text{ Ом/км}$. С учетом длины ЛЭП [23] $l = 50 \text{ км}$ получим:

$$R = R_{уд} \cdot l = 0,25 \cdot 50 = 12,5 \text{ Ом}; X_L = X_{уд} \cdot l = 0,404 \cdot 50 = 20,2 \text{ Ом}; \quad (12)$$

$$L = X_L / \omega = X_L / (100 \cdot \pi) = 20,2 / 314,15926 = 0,0643 \text{ Гн}. \quad (13)$$

Вычислим амплитуды токов I' и I'' , воспользовавшись равенствами [4]:

$$I' = \sqrt{[i'(m)]^2 + [di'(m)/dt_m]^2} = \sqrt{[11274,6]^2 + [8143,71]^2} = 13908,15 \text{ А}, \quad (14)$$

$$I'' = \sqrt{[i''(m)]^2 + [di''(m)/dt_m]^2} = \sqrt{[7336,6]^2 + [5264,74]^2} = 9030,13 \text{ А}. \quad (15)$$

Например, исходя из значений переменных на одном из концов ЛЭП и погрешности округлений, получим:

$$U = u'(m) - n \cdot i'(m) \cdot R - n \cdot L \cdot di'(m)/dt_m = 100051,9 - 0,5 \cdot (11274,6 \cdot 12,5 + 0,0643 \cdot 8143,71) = 29323,83 \text{ В}. \quad (16)$$

Таким образом, с учетом (10) и (11) выражения для формирования осциллограмм напряжения по концам ЛЭП принимают следующий вид:

$$u'(m) = 29323,83 + 0,5 \cdot (12,5 \cdot 13908,15 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + 0,0643 \cdot 13908,15 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d)) = 29323,83 + 86925,94 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + 447,15 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d), \quad (17)$$

$$u''(m) = 29323,83 + 0,5 \cdot (12,5 \cdot 9030,13 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + 0,0643 \cdot 9030,13 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d)) = 29323,83 + 56438,31 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d) + 290,32 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot m \cdot t_d). \quad (18)$$

Введем частоту дискретизации, например, соответствующую переменной (m) и составляющую $N = 8$ отсчетов на период промышленной частоты (интервал дискретизации $t_d = 0,0025 \text{ с}$). Относительно начала времени анализа осциллограмм выберем задержку, например, девять отсчетов сигнала (тока, напряжения) $t_3 = 9 \cdot t_d = 0,0225 \text{ с}$.

Следует отметить, что численный выбор значения (m) не влияет на амплитудно-фазовые соотношения токов и напряжений и точность вычислений по выражению (1), поскольку справедливость равенства (1) должна соблюдаться для каждого дискретного момента времени (m) .

Для верификации и определения точности задания модельных аналитических выражений (4–16) реализуем процедуру ОМП ЛЭП в предположении, что промышленная частота принимает значения $f = 50 \text{ Гц}$, а значение дискретной переменной $m = 1$. При этом общее дискретное время составит $t = t_3 + t_d = 10 \cdot t_d$ и соотношения будут следующими:

$$u'(m = 1) = 29323,83 + 86925,94 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) + 447,15 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) = 29323,83 + 86925,94 + 0 = 116249,77 \text{ В}, \quad (19)$$

$$u''(m = 1) = 29323,83 + 56438,31 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) + 290,32 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) = 29323,83 + 56438,31 + 0 = 85762,14 \text{ В}, \quad (20)$$

$$n = \{[u' - u''] + I'' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)]\} / \{[I' + I''] \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)]\} = \{[116249,77 - 85762,14] +$$

ЗНАЧЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Параметр	$I', \text{ А}$	$I'', \text{ А}$	$f, \text{ Гц}$	$t_d, \text{ с}$	$L, \text{ Гн}$	$R, \text{ Ом}$	$f_{\text{и}}, \text{ Гц}$	$U, \text{ В}$	n
Значение	13908,15	9030,13	50	0,0025	0,0643	12,5	135	29323,83	0,5

$$+ 9030,13 \cdot [12,5 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) + 0,0643 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025)] / \{[13908,15 + 9030,13] [12,5 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025) + 0,0643 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,0025)]\} = 0,5000099. \quad (21)$$

Таким образом, расстояние до места повреждения составляет $x' = n \cdot l = 0,5000099 \cdot 50 = 25,000495 \text{ км}$ и соответствует расчетному примеру [23].

Предположим, что, например, со стороны системы-1 (см. рис. 1) дискретные мгновенные значения тока $i'(m)$ искажены фликером [27].

Искаженный сигнал тока $i'(m)$ иллюстрирует рис. 3а, а математическое выражение для мгновенных значений тока с учетом запаздывания t_3 соответствуют соотношению:

$$i'(m) = I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)), \quad (22)$$

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) .

В частности, постановка численных значений в пример [22] приводит к зависимости:

$$i'(m) = 13908,15 \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot (t_3 + m \cdot t_d)), \quad (23)$$

а реализация осциллограммы тока при $N = 20$ ($t_d = 10^{-3} \text{ с}$), $k = 0,15$ (15% от амплитуды I'), $t_3 = 9 \cdot t_d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ представлена на рис. 3а. Отметим, что выражение для мгновенных значений напряжения $u'(m)$ приобретают следующий вид:

$$u'(m) = U + I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) \cdot [n \cdot R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + n \cdot L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]. \quad (24)$$

Примем, что со стороны системы-2 (см. рис. 1) присутствует нелинейная нагрузка, которая выдает в электрическую сеть, например, интергармоники. Для простоты примера считаем, что мгновенные значения тока $i''(m)$ искаже-

ны интергармоникой частоты $f_{\text{и}} = 135 \text{ Гц}$ с амплитудой $I_{\text{и}} = 0,15 \cdot I''$ и нулевой начальной фазой:

$$i''(m) = I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + 0,15 \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d)). \quad (25)$$

Осциллограмму тока $i''(m)$ при заданном варианте искажений интергармоникой иллюстрирует рис. 3б. Тогда выражение для мгновенных значений напряжения со стороны системы-2 принимают следующий вид:

$$u_{\text{и}}''(m) = U + (1 - n) \cdot R \cdot [I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + 0,15 \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + (1 - n) \cdot L \cdot [I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + 0,15 \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]. \quad (26)$$

Таким образом, расчетное выражение для места повреждения в присутствии фликера и интергармоники частоты $f_{\text{и}} = 135 \text{ Гц}$ соответствует равенству:

$$n_{\text{и}}(m) = \{[u'(m) - u_{\text{и}}''(m)] + I'' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + 0,15 \cdot I'' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]\} / \{[I' + I''] \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + 0,15 \cdot I'' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f_{\text{и}} \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]\}. \quad (27)$$

Подстановка численных значений в соответствии с таблицей и выражением (27) при $k = 0,15$ приводит к следующим результатам:

$$\text{при } m = 20, n_{\text{и}}(20) = 0,486, \Delta x = l \cdot (n - n_{\text{и}}) = 50 \cdot (0,5 - 0,486) = 0,7 \text{ км};$$

$$\text{при } m = 60, n_{\text{и}}(60) = 0,526, \Delta x = l \cdot (n - n_{\text{и}}) = 50 \cdot (0,5 - 0,526) = -1,30 \text{ км}.$$

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

Точность расчета расстояния до повреждения задают, исходя из требований эксплуатационной практики. Опе-

ративно-технологический персонал электрических сетей считает высокой точность расчета расстояния до места повреждения, если ошибка расчета не превышает длину одного пролета линии [28, 29]. Длина одного пролета воздушной ЛЭП напряжением 110 кВ составляет 0,15–0,2 км, поэтому требуемая точность расчета расстояния до места повреждения составляет $\Delta x = 0,2$ км.

Таким образом, в большинстве расчетных случаев при условии отклонений токов и напряжений от синусоидальной формы большинство методов ОМП ЛЭП, в том числе и [23], не позволяют реализовать расчет расстояния до места повреждения с требуемой точностью.

Применение метода наименьших квадратов в задаче ОМП ЛЭП в условиях отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений

Для реализации метода ОМП ЛЭП, применимого как в условиях отклонений токов и напряжений от синусоидальной формы, так и в отсутствие таких отклонений, предлагается выполнить следующую совокупность операций [30]:

- произвести измерения с двух концов линии, получить 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 короткого замыкания;
- определить поврежденные фазы/фазу и получить осциллограммы токов и напряжений;
- обеспечить синхронизацию мгновенных значений токов и напряжений путем совмещения осциллограмм с двух концов линии по срезу начала короткого замыкания;
- выбрать на интервале 2–10 периодов от начала короткого замыкания и сформировать массивы из M ($m = 1, 2, \dots, M$) последовательных мгновенных значений для каждой из осциллограмм тока и напряжения поврежденной фазы $i'(m), i''(m), u'(m), u''(m)$;
- определить первые производные токов по времени для выбранных массивов мгновенных значений $di'(m)/dt_m, di''(m)/dt_m$, а также первые и вторые производные напряжений $du'(m)/dt_m, du''(m)/dt_m, d^2u'(m)/dt_m^2, d^2u''(m)/dt_m^2$;
- сформировать матрицы напряжений $U1$ и $U2$, используя активное сопротивление R , индуктивность L и поперечную емкость C ЛЭП, мгновенные значе-

ния массивов токов, напряжений $i'(m), i''(m), u'(m), u''(m)$, а также вычисленные мгновенные значения производных токов и напряжений $di'(m)/dt_m, di''(m)/dt_m, du'(m)/dt_m, du''(m)/dt_m, d^2u'(m)/dt_m^2, d^2u''(m)/dt_m^2$ согласно выражениям:

$$U1 = \begin{bmatrix} U1(1) \\ U1(2) \\ \vdots \\ U1(M) \end{bmatrix},$$

$$U2 = \begin{bmatrix} U2(1) \\ U2(2) \\ \vdots \\ U2(M) \end{bmatrix},$$

где $U1(m) = R \cdot (i'(m) + i''(m)) + L \cdot (di'(m)/dt_m + di''(m)/dt_m) - R \cdot C \cdot (du'(m)/dt_m + du''(m)/dt_m) - L \cdot C \cdot (d^2u'(m)/dt_m^2 + d^2u''(m)/dt_m^2)$,

$U2(m) = [u'(m) - u''(m)] + i''(m) \cdot R + L \cdot di''(m)/dt_m - R \cdot C \cdot du''(m)/dt_m - L \cdot C \cdot d^2u''(m)/dt_m^2$;

- определить относительное значение расстояния до места короткого замыкания n с использованием матриц напряжения $U1$ и $U2$ и метода наименьших квадратов по выражению

$$n = (U1^T U1)^{-1} \cdot U1^T \cdot U2;$$

- по полученному относительному значению расстояния до места короткого замыкания n определить расстояние до места повреждения со стороны конца с индексом 1.

Поясним изложенные выше операции обработки сигналов, необходимые для реализации предложений авторов по ОМП на воздушной ЛЭП при несинхронизированных замерах с двух ее концов.

Введем дискретную переменную времени и сгруппируем составляющие выражения (2), записав его в виде:

$$[u'(m) - u''(m)] + i''(m) \cdot R + L \cdot di''(m)/dt_m - R \cdot C \cdot du''(m)/dt_m - L \cdot C \cdot d^2u''(m)/dt_m^2 = n \cdot [R \cdot (i'(m) + i''(m)) + L \cdot (di'(m)/dt_m + di''(m)/dt_m) - R \cdot C \cdot (du'(m)/dt_m + du''(m)/dt_m) - L \cdot C \cdot (d^2u'(m)/dt_m^2 + d^2u''(m)/dt_m^2)], \quad (28)$$

где m — дискретная переменная, соответствующая моментам времени отсчетов осциллограмм тока и напряжения;

$m = 1, 2, \dots, M$, M — число отсчетов составляющих тока (напряжения), выбранных для реализации операций цифровой обработки сигналов способа ОМП ЛЭП.

Обозначим матрицами-столбцами $U1$ и $U2$ выражения для различных моментов дискретного времени m , входящие в состав равенства (28):

$$U1 = \begin{bmatrix} U1(1) \\ U1(2) \\ \vdots \\ U1(M) \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$U2 = \begin{bmatrix} U2(1) \\ U2(2) \\ \vdots \\ U2(M) \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Для реализаций выражения (28) в различные моменты времени m справедливо следующее матричное выражение:

$$U1 \cdot n = U2. \quad (31)$$

Для нахождения более точного n , характеризующего место КЗ воздушной ЛЭП в условиях отклонения токов и напряжений от синусоидальной формы, воспользуемся методом наименьших квадратов. При этом используется полный массив из M дискретных реализаций токов и напряжений (31), обеспечивающий минимизацию ошибки ОМП в условиях воздействия случайных факторов в отличие от способа [23], в котором используются лишь отдельные «временные срезы» осциллограмм.

Запишем равенство (31) в виде

$$U1 \cdot n = U2 + e, \quad (32)$$

где e — вектор-столбец ошибок измерений, связанный с искаженными мгновенными значениями осциллограмм токов и напряжений.

Задача минимизации ошибок при расчете величины n сводится к минимизации квадрата нормы вектора ошибок e , т.е.:

$$\sum_{m=1}^M e_m \cdot e_m = \|e\|^2 = e^T \cdot e. \quad (33)$$

Преобразуем равенство (33) с использованием подстановки (32):

$$U1 \cdot n - U2 = e, \quad (34)$$

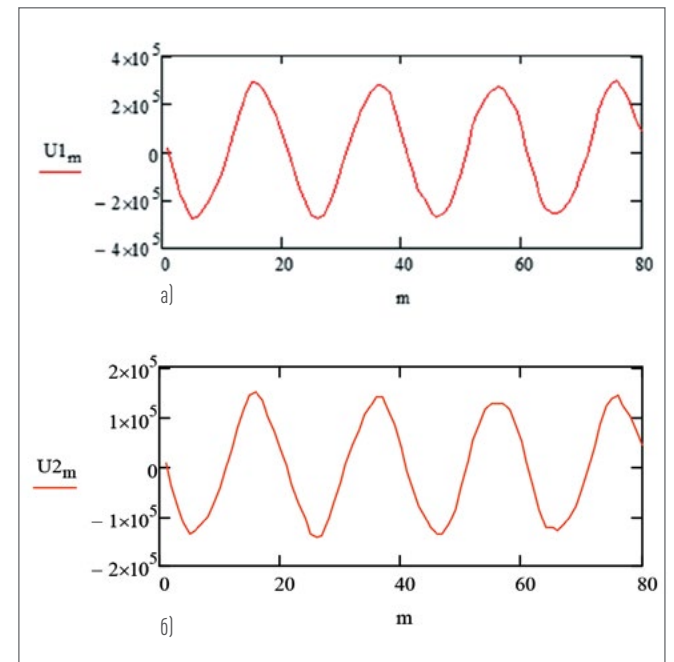
$$\text{тогда } e^T \cdot e = (U1 \cdot n - U2)^T \cdot (U1 \cdot n - U2) = U1^T \cdot n U1 \cdot n - 2 U1^T \cdot n U2 + U2^T U2. \quad (35)$$

Для отыскания минимума необходимо вычислить частную производную по n уравнения (35) и приравнять ее к нулю:

$$\partial e^T \cdot e / \partial n = 2 \cdot U1^T U1 \cdot n - 2 U1^T \cdot U2 = 0. \quad (36)$$

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ, МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОТОРЫХ СООТВЕТСТВУЮТ СОСТАВЛЯЮЩИМ МАТРИЦ $U1$ И $U2$

Рис. 4



Из последнего соотношения находим искомое значение n согласно выражению

$$n = (U1^T U1)^{-1} \cdot U1^T \cdot U2. \quad (37)$$

Таким образом, оценка относительного расстояния до места КЗ воздушной ЛЭП в условиях отклонения токов и напряжений от синусоидальной формы с использованием метода наименьших квадратов сводится к нахождению результатов матричного произведения по выражению (37).

Проиллюстрируем примером расчет расстояния до места КЗ применительно к рассмотренным выше условиям искажения тока $i'(m)$ фликером (см. рис. 3а), а также $i''(m)$ интергармоникой частоты $f_{\text{и}} = 135$ Гц с амплитудой $I_{\text{и}} = 0,15 \cdot I$ (см. рис. 3б).

Согласно ранее полученным выражениям (22–27), введенной задержке t_z матрицы $U1$ и $U2$ принимают следующий вид:

$$U1 = \begin{bmatrix} U1(1) \\ U1(2) \\ \vdots \\ U1(M) \end{bmatrix}, \quad (38)$$

$$U_2 = \begin{Bmatrix} U_2(1) \\ U_2(2) \\ \vdots \\ U_2(M) \end{Bmatrix}, \quad (39)$$

где $U_1(m) = [I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) + I''] \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + 0,15 \cdot I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] - R \cdot C (du_1(m)/dt_m + du_1''(m)/dt_m^2) - L \cdot C (d^2u_1(m)/dt_m^2 + d^2u_1''(m)/dt_m^2)$,

$U_2(m) = [(u_1(m) - u_1''(m)) + I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + 0,15 \cdot I' \cdot [R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] - R \cdot C du_1''(m)/dt_m - L \cdot C \cdot d^2u_1''(m)/dt_m^2]$,

$u_1'(m) = U + I' \cdot (1 - k \cdot \text{rnd}(m)) \cdot [n \cdot R \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + n \cdot L \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]$,

$u_1''(m) = U + (1 - n) \cdot R \cdot [I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + 0,15 \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))] + (1 - n) \cdot L \cdot [I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d)) + 0,15 \cdot I'' \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_3 + m \cdot t_d))]$,

$du_1(m)/dt_m = (u_1'(m+1) - u_1'(m-1))/(2 \cdot t_d)$, $du_1''(m)/dt_m = (u_1''(m+1) - u_1''(m-1))/(2 \cdot t_d)$,

$d^2u_1(m)/dt_m^2 = (u_1'(m+1) - 2 \cdot u_1'(m) + u_1'(m-1))/(t_d)^2$,

$d^2u_1''(m)/dt_m^2 = (u_1''(m+1) - 2 \cdot u_1''(m) + u_1''(m-1))/(t_d)^2$.

Численные значения параметров для проведения расчетов представлены в таблице.

Удельная поперечная емкостная составляющая $C_{уд}$ ЛЭП 110 кВ (см. рис. 2) выбиралась согласно [26]. Емкость ЛЭП C для проведения расчетов составила:

$$b = 2\pi \cdot f \cdot C_{уд} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}, \\ C = C_{уд} \cdot l = b \cdot l / (2\pi \cdot f) = 198,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}. \quad (40)$$

Дискретные значения матриц U_1 и U_2 (38) и (39) соответствуют мгновенным значениям осциллограмм напряжений, приведенных на рис. 4. Для реализации ОМП ЛЭП необходимо задать величину переменной M , которая определяет количество дискретных отсчетов токов и напряжений, участвующих в вычислениях по методу наименьших квадратов. Целесообразно выбирать значение M кратным N — числу отсчетов за период промышленной частоты (для рассматриваемого примера $N = 20$), а полный объем выборки последовательных мгновенных значений токов и напряжений, как и в [23], осуществлять в пределах интервала 2–10 периодов от начала короткого замыкания для осциллограмм тока и напряжения поврежденной фазы. Выберем значение $M = 80$, а задержку относительно начала короткого замыкания, как и ранее, установим равной $t_3 = 9 \cdot t_d = 0,0225$ с, $k = 0,15$.

Расчеты расстояния до места КЗ в условиях отклонения токов и напряжений от синусоидальной формы с подстановкой значений M , t_3 , а также значений параметров в выражения (38, 39) проводились в программном комплексе MATCAD. Итоговые результаты вычислений, соответствующие осциллограммам на рис. 3, 4 и выражению (37), позволили получить уточненное относительное расстояние до места КЗ:

$$n_i = (U_1^T U_1)^{-1} \cdot U_1^T \cdot U_2 = 0,499.$$

С учетом ранее выполненных расчетов ошибка ОМП ЛЭП составила

$$\Delta x = l \cdot (n - n_i) = 50 \cdot (0,5 - 0,499) = -0,05 \text{ км},$$

или (при длине ЛЭП $l = 50$ км) величину $-0,05/50 = -0,1\%$ от длины ЛЭП.

Таким образом, предложенный вариант ОМП ЛЭП при несинхронизированных замерах с двух ее концов обеспечивает высокоточный расчет расстояния до места повреждения воздушной ЛЭП в условиях отклонений токов и напряжений от синусоидальной формы и соответствует требованиям по точности, предъявляемым эксплуатационной практикой.

Отметим, что такой способ ОМП ЛЭП может быть реализован на основе применения современных цифровых терминалов релейной защиты, связанных между собой каналом связи для обмена осциллограммами токов и напряжений, например, производства ООО НПП «ЭКРА», ООО «Релематика», ООО «НПП Бреслер» и др. Требованиями к современным цифровым терминалам релейной защиты [31] определена обязательность реализации функции ОМП ЛЭП. Возможен также вариант реализации предложенного варианта ОМП ЛЭП в центрах диспетчерского управления промышленных предприятий, в управлении которых находятся воздушные ЛЭП, поскольку расчет расстояния до места повреждения возложен на оперативно-технологический персонал [32]. При этом осуществляется дистанционный сбор осциллограмм аварийных токов и напряжений с регистраторов аварийных событий (терминалов релейной защиты) и последующий расчет расстояния до места повреждения выполняется с помощью средств вычислительной техники.

Выводы

1. В системах промышленного электроснабжения реализация ОМП ЛЭП может сопровождаться существенными отклонениями показателей качества электроэнергии от нормативных значений. Актуальной задачей

является разработка новых методов ОМП ЛЭП, обеспечивающих высокую точность расчета расстояния до места повреждения в условиях таких отклонений.

2. Предложен новый двухсторонний метод ОМП ЛЭП при несинхронизированных замерах с двух ее концов. Снижение ошибок ОМП при искажениях сигналов тока и напряжения достигается за счет использования дополнительных уточняющих параметров ЛЭП, а также применения метода наименьших квадратов над мгновенными значениями осциллограмм аварийных событий.
3. Анализ операций цифровой обработки сигналов для предложенного метода ОМП ЛЭП показывает возможность его внедрения в существующие цифровые терминалы релейной защиты, а также в программное обеспечение диспетчерских центров управления электрическими сетями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Папков Б.В., Куликов А.Л., Илюшин П.В. Задачи надежности современного электро-снабжения: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022.
2. Илюшин П.В., Ковалев С.П., Куликов А.Л., Небера А.А., Непша Ф.С. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы. М.: ИТФ «Энергопрогресс», Библиотека электротехника. 2021. № 8 (272).
3. 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.
4. Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001.
5. Малый А.С., Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергия, 1972.
6. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010.
7. Гриб О.Г., Светелик А.А., Сендерович Г.А., Калужный Д.Н. Автоматизированные методы и средства определения мест повреждения линий электропередачи: Учеб. пособие. Под общ. ред. О.Г. Гриба. Харьков: ХГАГХ, 2003.
8. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009.
9. Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи: конспект лекций. СПб.: ПЭИПК, 2008.
10. Кузнецов А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1989.
11. Машенков В.М. Особенности определения места повреждения на ВЛ 110–750 кВ: Учеб. пособие. СПб.: ПЭИПК, 2005.
12. Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью: Учеб. пособие для СПТУ. М.: Высш. шк., 1988.
13. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А. и др. Диагностика линий электропередачи//Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992.
14. Шалыт Г.М. Определение места повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982.

15. Лачугин В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи//Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1 (50). С. 58–61.
16. Kulikov A.L., Anan'ev V.V., Vukolov V.Y., Platonov P.S., Lachugin V.F. Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location//Power Technology and Engineering. 2016. T. 49. № 5. С. 378–385.
17. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Исмуков Г.Н., Подшивалин С.А., Арутюнов С.А., Ключкин Н.Г., Шеметов А.С. Полигонные испытания системы волнового определения места повреждения на воздушных линиях//Электрические станции. 2021. № 8 (1081). С. 34–40.
18. Минуллин Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи: монография. Казань: КГЭУ, 2022.
19. Куликов А.Л. Дистанционное определение мест повреждения ЛЭП методами активного зондирования. М.: Энергоатомиздат, 2006.
20. 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.
21. 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.
22. ПАО «ФСК ЕЭС» Стандарт организации: СТО 56947007–29.240.55.224–2016 «Методические указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше», дата введения: 17.08.2016.
23. Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Тигунцев С.Г. Патент РФ № 2508556 «Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи при несинхронизированных замерах с двух ее концов», МПК G01R 31/08, опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6.
24. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционной защиты//Релейная защита и автоматизация. 2022. № 3 (48). С. 12–17.
25. Куликов А.Л., Колобанов П.А., Фальшина В.А. Алгоритм цифровых измерительных органов дистанционных защит на основе дифференциальных уравнений линии//Электрические станции. 2014. № 8. С. 44–49.
26. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения//Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 35–40.
27. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2013.
28. 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.
29. Обалин М.Д., Куликов А.Л. Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП//Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 35–39.
30. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Севостьянов А.А., Лоскутов А.А. Патент РФ № 2801438 «Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи при несинхронизированных замерах с двух ее концов», МПК G01R 31/08, опубл. 08.08.2023 Бюл. № 22.
31. ПАО «ФСК ЕЭС» Стандарт организации: СТО 56947007–29.120.70.241–2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА», дата введения: 28.02.2017 (с учетом изменений: 11.12.2019).
32. 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.