

**Автор:**  
к.т.н. Подшивалин А.Н.,  
ООО «Релематика»,  
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Podshivalin A.N.,  
Relematika LLC,  
Cheboksary, Russia.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОЭФФИЦИЕНТА ЭКСЦЕССА В ЗАДАЧЕ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

PROPERTIES OF EXCESS FUNCTION APPLIED TO TRAVELING WAVE  
FAULT LOCATION OF TRANSMISSION LINES

**Аннотация:** методы определения места повреждения (ОМП), основанные на анализе волновых процессов в электрической сети, набирают все большую популярность в связи с высокой точностью и простотой принципа. В статье аналитически исследован один из методов выявления фронта волны для пассивного волнового ОМП на основе коэффициента эксцесса. Порог срабатывания этого измерительного органа оказывается адаптивным и приспособливается к различным типам помех. При необходимости эта величина может быть скорректирована путем изменения параметров расчета: длины окна и порога эксцесса. Анализ показал, что вне зависимости от вида распределения выборок предшествующего режима поведение измерительного органа универсально описывается величиной отклонения при срабатывании.

**Ключевые слова:** волновые процессы, волновое определение места повреждения, выбор уставок, коэффициент эксцесса, измерительный орган, фронт волны, отношение сигнал-шум.

**Abstract:** fault location methods based on traveling waves analysis become more and more popular due to high precision of distance to fault estimation. One of wave-front detection methods based on excess function is studied in a closed-form in this paper. A threshold of the wavefront detector as adaptive to various noise signals. The threshold can be modified using parameters of the formula: window length and excess threshold. The study revealed that

## Введение

Средства автоматизации поиска места повреждения линий электропередачи – неотъемлемая часть системы автоматизации современных энергосистем. Отключение поврежденных элементов производится устройствами релейной защиты, основанными преимущественно на анализе процессов на промышленной частоте. Такие процессы и методы их распознавания можно отнести к классу низкочастотных. Развитие микроэлектронных технологий и повышение быстродействия вычислительных систем позволили внедрить в эксплуатацию приборы, способные регистрировать и автоматически обрабатывать процессы, сопровождающие распространение электромагнитных волн в электрической системе. Соответствующие методы и подходы к распознаванию

аварийных процессов и их параметров получили название волновых.

Среди волновых методов поиска места повреждения в настоящее время выделяют две большие группы. Активные методы основаны на анализе реакции электрической сети на искусственное воздействие, контролируемое устройством релейной защиты и автоматики (РЗА) для поиска места повреждения. Пассивные методы, напротив, используют естественные источники волновых процессов, как правило, связанные с коммутацией короткого замыкания. Пассивное устройство наблюдает электрические процессы в одном или нескольких узлах или ветвях энергосистемы с целью анализа времени и характера распространения электромагнитной волны по сети [1].

В статье рассмотрена реализация пассивного волнового метода ОМП. Критиче-

ским этапом волнового ОМП можно считать выявление фронтов волн в регистрируемых электрических сигналах и определение моментов времени начала переходного процесса, вызванного коммутацией повреждения [2]. Существует множество алгоритмов выявления фронта волны, подразделяемых в статье на следующие виды:

- статистические [3],
- с анализом формы кривой (модельные) [4],
- с анализом подобия формы волны (корреляционные) [5],
- пороговые [6],
- фильтровые [7, 8].

В условиях реальной подстанции существенное значение для распознавания волны имеет шум, величина которого не нормируется действующими стандартами. Величина волны (ее амплитуда) может варьировать в широком диапазоне в зависимости от условий повреждения, режимных условий, параметров электрической сети и способа измерения для целей волнового ОМП [9]. Адаптивную отстройку от шумов обеспечивают статистические и отдельные фильтровые решения. Далее рассмотрен один из перспективных измерительных органов, основанный на функции эксцесса [10]. Его применение для целей ОМП аналитически описано впервые.

Коэффициент эксцесса является мерой отклонения функции распределения заданной выборки от нормальной. В статье будет использована аналогичная ему функция эксцесса, применяемая к интервалу электрического или иного сигнала, изменяющегося во времени. Функция эксцесса, как и большинство других методов поиска фронта волны, применяется к скользящему окну отсчетов входного сигнала. Предположим, что функция эксцесса применена к выборке  $X$ , тогда коэффициент эксцесса вычисляется по формуле

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3,$$

где  $\mu_4 = E(X - EX)^4$  – четвертый центральный момент  $X$ ;

$\sigma = \sqrt{E(X - EX)^2}$  – стандартное отклонение  $X$ . Здесь использован оператор  $E$  математического ожидания соответствующей случайной величины.

В задачах волнового ОМП случайная величина  $X$  является дискретной, так как от-

счеты входной электрической величины получают в дискретные моменты времени с частотой 1 МГц и более [11].

Проанализируем величину коэффициента эксцесса для разных видов случайной величины  $X$ , которые могут оказаться типичными для волнового ОМП. Множество  $X$  будет охватывать два примыкающих режима: до коммутации и после коммутации – аварийный режим. Анализ будет проводиться в предположении известных характеристик процесса, предшествующего коммутации в электрической сети и выраженного подмножеством  $X_{\text{пд}}$ . Также будет задаваться аварийный режим, выраженный в форме сигналов во времени при достижении электромагнитной волной места наблюдения, – подмножество  $X_{\text{ав}}$ .

### Прямоугольная волна на фоне нулевого предшествующего режима

Для наглядности примем, что последовательность  $X$  представлена  $N$  отсчетами  $x_i$ , первые  $N - 1$  из которых нулевые, а последний отсчет, относящийся к аварийному процессу  $X_{\text{ав}}$ , равен  $a$ . Это условие определяет возможное срабатывание измерительного органа волнового ОМП на первом же отсчете нового, аварийного процесса. Тогда

$$EX = \sum_{i=1}^N x_i / N = a / N.$$

Соответственно, четвертый центральный момент

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N-1} (0 - a/N)^4 + (a - a/N)^4 \right) = \\ &= a^4 \frac{N-1}{N^4} (N^2 - 3N + 3). \end{aligned}$$

Квадрат стандартного отклонения

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N-1} (0 - a/N)^2 + (a - a/N)^2 \right) = a^2 \frac{N-1}{N^2}.$$

Тогда коэффициент эксцесса

$$\gamma_2 = N - 5 + \frac{1}{N-1}. \quad (1)$$

Этот пример показывает важные свойства величины  $\gamma_2$ :

1) Величина  $\gamma_2$  для заданной последовательности не зависит от величины приращения  $a$ , а определяется лишь длиной последовательности  $X$ . В этом выражает-

the excess function is sensitive to certain deviation level for different types of noise and wave-front raise rate.

**Keywords:** traveling wave, traveling wave fault location, settings, excess, starting element, wave-front, signal to noise ratio.



**Подшивалин**

**Андрей Николаевич**

В 2004 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. В 2005 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Метод информационного анализа и его приложение к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи». Заведующий отделом ООО «Релематика».

ся ее преимущество по отношению к пороговому измерительному органу, реагирующему на абсолютную величину или приращение входного сигнала. Отсутствует необходимость выбора уставки измерительного органа.

2) Формула (1) описывает значение  $\gamma_2$  и для случая, когда в выборке  $X$  соотношение числа отсчетов аварийного режима  $X_{\text{пд}}$  и всего объема выборки  $X$  соответствует  $1:N$ . Из этого следует, что при одинаковом объеме последовательностей  $X$  коэффициент эксцесса больше для той последовательности, которая содержит больше отсчетов предшествующего режима. На рис. 1 показано, как меняется величина коэффициента эксцесса при смещении плавающего окна измерительного органа на прямоугольную волну при  $N=100$ . Величина  $\gamma_2(n)$  вычислена по данным окна  $[n-N+1;n]$ .

Из этих двух свойств следует, что длина выборки  $X$  должна быть значительной (например,  $N=100$ ), чтобы обеспечить контраст фронта волны в ее начальный момент.

3) Важно отметить, что формула (1) справедлива и для выборки, где предшествующий режим представлен одинаковыми ненулевыми отсчетами, а величина  $a$  указывает смещение (приращение) прямоугольной волны, наложенной на продолженный предшествующий режим. Это свойство  $\gamma_2$  приобретает благодаря использованию в расчете величин  $\mu_4$  и  $\sigma^2$ , являющихся соответствующими центральными моментами.

Из этого следует важное качество  $\gamma_2$  для анализа электрических сигналов: постоянное смещение электрической величины на любую конечную величину не влияет на значение  $\gamma_2$ , а значит, и на чувствительность соответствующего измерительного органа. Смещение во входном сигнале могло быть обусловлено способом измерения, фазой возникновения повреждения в сети или низкочастотными (по отношению к частоте дискретизации) составляющими в сигнале.

4) Формула (1) может использоваться как приближенное значение  $\gamma_2$  в тех случаях, когда отсчеты в предшествующем режиме не равны между собой и допуска-

ют максимальное отклонение  $\delta$  от среднего  $EX_{\text{пд}}$  при условии, что  $\delta \ll a$ .

5) При вычислении функции эксцесса на постоянном сигнале в предшествующем режиме возникает неопределенность при делении на ноль. Истинное аналитическое значение при этом оказывается равно  $N-3$  и превышает значение по формуле (1). Это свойство эксцесса указывает лишь на теоретический, но не практический результат, где вычисления с ограниченной точностью могут дать и другие значения функции эксцесса.

### Прямоугольная волна на нормальном фоне

По сравнению с рассмотренным выше нулевым предшествующим режимом более реалистичным представляется случай, когда коммутации предшествует режим, характеризуемый нормальным распределением со стандартным отклонением  $\sigma = b$ . Поскольку среднее значение предшествующего режима не влияет на расчет  $\gamma_2$ , то оно принимается нулевым, а величина  $a$  рассматривается как отклонение от этого среднего  $EX_{\text{пд}}$ .

Для нормального распределения

$$\mu_4 = 3\sigma^4.$$

Тогда для выборки, включающей один отсчет аварийного режима,

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - EX)^2 + (a - EX)^2 \right), \quad (2)$$

где  $EX = a/N$ .

Используем свойство  $\sigma^2 = EX^2 - (EX)^2$ . Тогда

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - a/N)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} x_i^2 + \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} a/N \right)^2. \quad (3)$$

С учетом нулевого среднего предшествующего режима можно записать:

$$b^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} x_i^2. \quad (4)$$

Подставляя найденные составляющие (3) и (4) в (2), получим после упрощения

$$\sigma^2 = \frac{N-1}{N^2} (b^2 N + a^2).$$

Соответственно,

$$\sigma^4 = \frac{(N-1)^2}{N^4} (b^2 N + a^2)^2. \quad (5)$$

Запишем четвертый центральный момент

$$\mu_4 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - a/N)^4 + (a - a/N)^4 \right). \quad (6)$$

Используя (4) и равенство первого и третьего моментов нулю, получаем

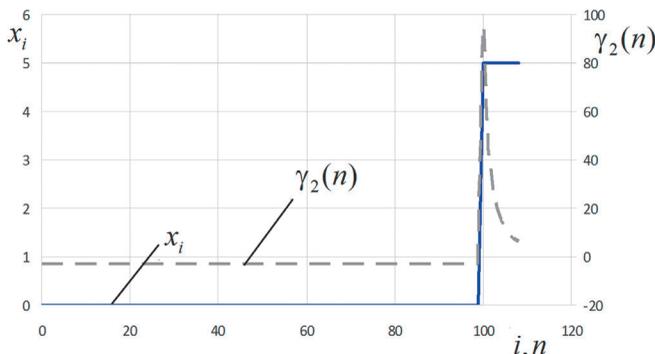


Рис. 1. Коэффициент эксцесса  $\gamma_2(n)$  в начале аварийного режима

$$\sum_{i=1}^{N-1} (x_i - a/N)^4 = (N-1)(3b^4 + 0 + 6b^2(a/N)^2 + 0 + (a/N)^4).$$

Тогда значение (6) может быть выражено в следующем виде:

$$\mu_4 = \frac{N-1}{N^4} (3b^4 N^3 + 6b^2 a^2 N + a^4 N^2 - 3a^4 N^2 - 3a^4 N + 3a^4). \quad (7)$$

Определим коэффициент эксцесса с использованием (5) и (7). После преобразований получим:

$$\gamma_2 = \frac{3}{N-1} - \frac{6}{M} + \frac{N+1}{M^2} - \frac{2}{M^2(N-1)}, \quad (8)$$

где  $M = (b/a)^2 N + 1$ .

Легко убедиться, что при  $b = 0$  выражение (8) сводится к (1) как к своему частному случаю.

Обсуждаемый измерительный орган имеет смысл только при  $a > b$ , а потому в (8) обнаруживается различная зависимость каждого слагаемого от величины  $N$ . При больших  $N$  значимыми остаются лишь второе и третье слагаемые, в которых  $M$  в знаменателе возрастает пропорционально  $N$ , но множитель  $(b/a)^2$  тормозит это нарастание.

Определим отношение  $a/b$ , при котором  $\gamma_2 \geq \Gamma$ , то есть значение  $\gamma_2$  достаточно для срабатывания измерительного органа. Прямые требования к величине порога  $\Gamma$  отсутствуют. Очевидно, что большая величина порога обеспечит меньшую чувствительность измерительного органа. Известны значения коэффициента эксцесса для употребимых распределений случайной величины от  $-3$  до  $-1,5$ . Ограничением сверху можно считать значения, полученные на рис. 1. С некоторой отстройкой примем  $\Gamma = 2$ , что не позволит срабатывать измерительному органу в предшествующем режиме, но обеспечит некоторую чувствительность к аварийным режимам.

Тогда первым и четвертым слагаемыми можно пренебречь. Можно получить граничное значение

$$\delta = (a/b)^2 \approx 3 + \sqrt{N\Gamma}. \quad (9)$$

При больших  $N$  равенство (9) может быть упрощено:

$$a/b \approx \sqrt[4]{N\Gamma}. \quad (10)$$

Из (8) можно определить, что упрощенные выражения (9) и (10) справедливы, если

$$N \geq (6 + \Gamma) / \Delta,$$

где  $\Delta$  – принимаемая относительная погрешность оценки  $\delta$ .

Например, если погрешность не должна превышать  $\Delta = 5\% = 0,05$ , то при прочих заданных параметрах можно получить условие для объема выборки:  $N \geq 160$ .

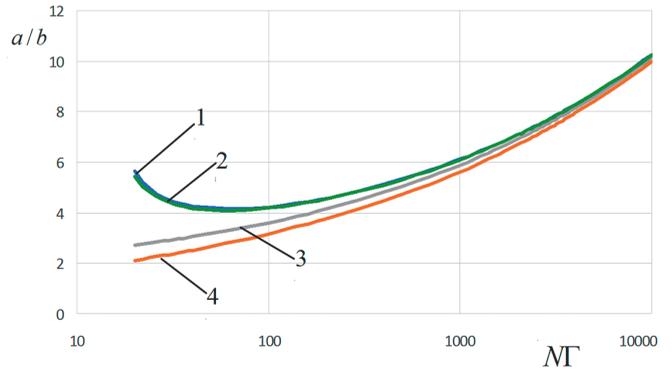


Рис. 2. Зависимость чувствительности  $a/b$  от произведения  $N\Gamma$ . Виды расчета: 1 – точный расчет, 2 – формула (11), 3 – формула (9), 4 – формула (10)

Высокую точность оценки граничного отношения дает следующее выражение:

$$(b/a)^2 \approx \frac{1}{3 + \sqrt{N\Gamma}} - \frac{1}{N}. \quad (11)$$

Здесь  $N \geq 6 + \Gamma$ , то есть выражение (11) справедливо для больших  $N$ .

Как видно из (8), (9) и (11), величина  $\gamma_2$  зависит от отношения сигнал-шум: чем больше стандартное отклонение  $b$  в предшествующем режиме, тем больше величина  $M$  и меньше величина  $\gamma_2$ , то есть тем менее чувствительным оказывается измерительный орган на основе коэффициента эксцесса. Выражение (10) удобно для качественного анализа зависимости между величиной шума (оценивается величиной  $b$ ), величиной волны (приращение  $a$ ) и уставкой измерительного органа  $\Gamma$ .

На рис. 2 показана зависимость  $a/b$  от произведения  $N\Gamma$ . Из рисунка видно, что в широком диапазоне практических значений  $N\Gamma$  график имеет пологий характер, а потому измерительный орган обнаруживает почти одинаковую чувствительность. Рисунок также демонстрирует аппроксимацию зависимости разными функциями. Как видно, формула (11) дает наилучшее приближение в широком диапазоне значений произведения  $N\Gamma$ .

Определим соотношение сигнал-шум измерительного органа, используя формулу мощности:

$$SNR = 10 \lg(a/b)^2.$$

С учетом (9) получим:

$$SNR \approx 10 \lg(3 + \sqrt{N\Gamma}) \approx 5(\lg N + \lg \Gamma). \quad (12)$$

При малых  $\Gamma > 1$  и рассматриваемых значениях  $N$  от 100 до 1000 величина  $SNR$  находится в диапазоне от 11,5 до 16,5 дБ. Эти значения показывают минимальное необходимое для срабатывания измерительного органа значение отклонения, если срабатывание ожидается на первом отсчете аварийного режима.

В практических задачах соотношения (9), (10), (11), (12) позволяют выбрать уставку  $\Gamma$  при заданных  $N$  и  $SNR$ .

### Прямоугольная волна на фоне периодического сигнала

Рассмотрим случай, когда во входных сигналах присутствует принужденная синусоидальная составляющая. Аналогично предыдущему случаю примем, что стандартное отклонение синусоиды  $\sigma = b$ , а ее период много меньше  $\tau N$ , где  $\tau$  – период дискретизации входного сигнала. Последнее условие означает, что принужденная составляющая имеет сравнительно высокую частоту и может быть обусловлена помехами, загромождение которых имело бы негативные последствия для распознавания фронта полезного сигнала аварийного режима.

Поскольку среднее значение сигнала в предшествующем режиме не влияет на расчет, оно принимается нулевым, а величина  $a$  рассматривается как отклонение от среднего  $EX_{пл}$  предшествующего режима. Для расчета удобно использовать свойства  $\beta$ -распределения [12]. Это распределение описывает свойства выборки, составленной из отсчетов синусоиды, полученных с равным шагом аргумента на целом числе периодов. С учетом введенных ограничений не кратность наблюдаемого интервала и частоты сигнала предшествующего режима не повлияет на результаты расчета. Тогда, используя известные соотношения для  $\beta$ -распределения и изложенный выше аналитический метод, можно получить

$$\gamma_2 = \frac{3}{2(N-1)} - \frac{3}{M} + \frac{3}{M(N-1)} + \frac{N}{M^2} - \frac{1}{2M^2} - \frac{7}{2(N-1)M^2} - \frac{3}{2}. \quad (13)$$

Снова определим граничное значение  $a/b$ , достаточное для срабатывания измерительного органа  $\gamma_2 = \Gamma$ :

$$(b/a)^2 \approx \frac{1}{1,5 + \sqrt{N(\Gamma + 1,5)}} - \frac{1}{N}. \quad (14)$$

Если принять  $N > 50$ , то можно определить приближенное соотношение порогов срабатывания измерительных органов на сигналах с различным распределением предшествующего режима: нормальное  $a_n$  (из выражения (11)) и  $\beta$ -распределение  $a_\beta$  (из выражения (14)):

$$\frac{a_n}{a_\beta} \approx 4 \sqrt{\frac{\Gamma}{\Gamma + 1,5}} < 1. \quad (15)$$

Рассмотренные выборки с нормальным распределением и  $\beta$ -распределением обладают очень разными

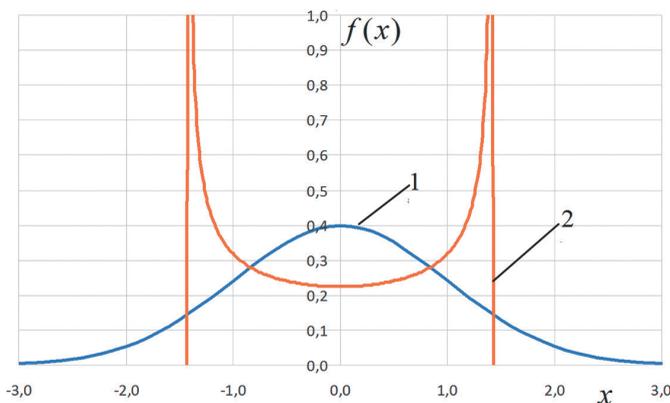


Рис. 3. Плотность распределения вероятностей  $f(x)$  сигналов с нормальным распределением (1) и  $\beta$ -распределением (2)

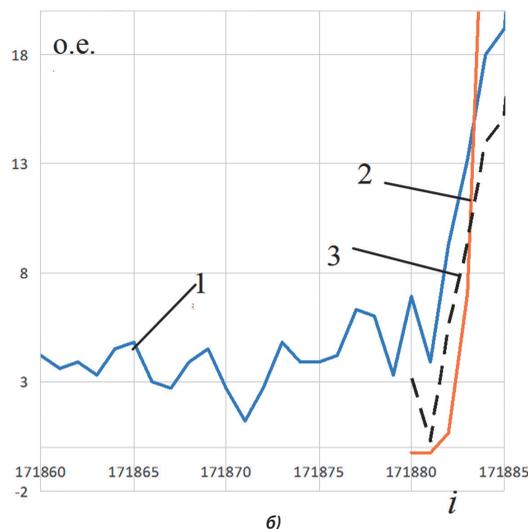
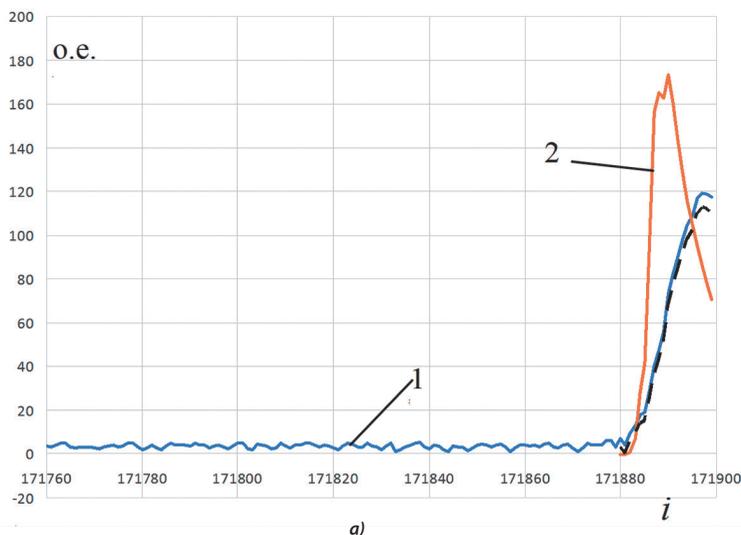


Рис. 4. Срабатывание измерительного органа на осциллограмме сигнала электрической сети: 1 – входной сигнал  $x_i$ , 2 – функция эксцесса  $\gamma_2$ , 3 – отношение  $a/b$

характеристиками: разной плотностью распределения вероятностей (рис. 3), соответственно, неограниченным и ограниченным диапазоном значений отсчетов. Тем не менее, расчет (15) и анализ выражения (13) демонстрируют, что выделенные для нормального распределения свойства во многом могут быть отнесены и к синусоидальному предшествующему режиму. Отношение сигнал-шум при этом снижается на 1,2 дБ.

Можно ожидать, что в условиях наложения нормального шума на принужденные составляющие поведение измерительного органа также останется предсказуемым, а характеристики могут быть аппроксимированы формулами (11) и (14). Это иллюстрирует анализ осциллограммы, записанной в цепях напряжения при повреждении электрической сети 220 кВ. На рис. 4 показано срабатывание измерительного органа в начале аварийного режима при соотношении  $a/b = 9,3$  в двух масштабах. Неточность соблюдения соотношения (14) при срабатывании объясняется дискретностью входного сигнала во времени, а также высокой скоростью нарастания этого сигнала.

Из анализа также следует, что для повышения эффективности (чувствительности) измерительного органа на основе коэффициента эксцесса необходимо максимально ослабить периодические составляющие во входном сигнале, например, при помощи полосовых или адаптивных фильтров. Отметим, что срабатывание измерительного органа на синусоиде предшествующего режима не происходит, поскольку ее амплитудное значение  $\sqrt{2}\sigma$  всегда меньше порога срабатывания.

### Линейно нарастающий сигнал на фоне нормального распределения

Практическое значение имеет анализ поведения функции эксцесса в условиях аварийного сигнала в виде  $n$  отсчетов, подчиняющихся линейному закону:  $x_{N-n+m} = kbm$ , где  $m = \overline{1, n}$ . Коэффициент  $k$  связывает изменение полезного сигнала за единицу времени (интервал дискретизации) с величиной стандартного отклонения сигнала в предшествующем режиме. Здесь, как и ранее, среднее предшествующего режима принимается нулевым.

Очевидно, что если  $kb = a$ , где  $a$  – величина, достаточная для срабатывания измерительного органа на первом же отсчете и найденная выше, то линейное изменение сигнала не изменит характеристики срабатывания. Поэтому ставится задача определения величины  $k < a/b$ , при которой срабатывание измерительного органа происходит не позже отсчета с заданным номером  $n$  аварийного режима.

Компоненты коэффициента эксцесса определены поэтапно по изложенному выше алгоритму с той разницей, что  $n$  из  $N$  отсчетов принадлежат новому режиму с известными моментами.

Для больших  $N$  можно получить приближенную формулу:

$$\gamma_2 \approx \frac{k^2 n^2 - 10}{5 \cdot \left( \frac{2}{3} + \frac{N}{k^2 n(n+1)^2} \right)}. \quad (16)$$

С большей погрешностью может использоваться и следующая формула, в которой явно прослеживаются основные зависимости параметров:

$$\gamma_2 \approx \frac{k^4 n^3 (n+1)^2}{10N}. \quad (17)$$

При поиске приближенных решений (16) и (17) учтено, что срабатывание измерительного органа ожидается не позже  $n \leq 10$ , а  $N \gg n$ . Наибольшая достоверность формул обеспечена вблизи порога срабатывания измерительного органа, выбранного в соответствии с изложенными выше соображениями.

На рис. 5 показано сравнение значений коэффициента эксцесса, определенных по формуле (17) и точного расчета для  $n = 5$  и  $N = 500$  при вариации значения  $k$ .

Как видно, выражение (16) обладает высокой достоверностью, а оценка (17) оказывается несколько заниженной. Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1) При прочих равных увеличение длины окна расчета  $N$  снижает значение коэффициента эксцесса, что означает снижение чувствительности измерительного органа или, по крайней мере, затягивание его срабатывания. Это свойство коэффициента эксцесса наблюдалось во всех рассмотренных вариантах аварийного режима.

2) Чем выше коэффициент  $k$ , то есть чем быстрее нарастает аварийный режим, тем меньше время срабатывания измерительного органа. Коэффициент  $k$  и число отсчетов срабатывания  $n$  находятся в обратной зависи-

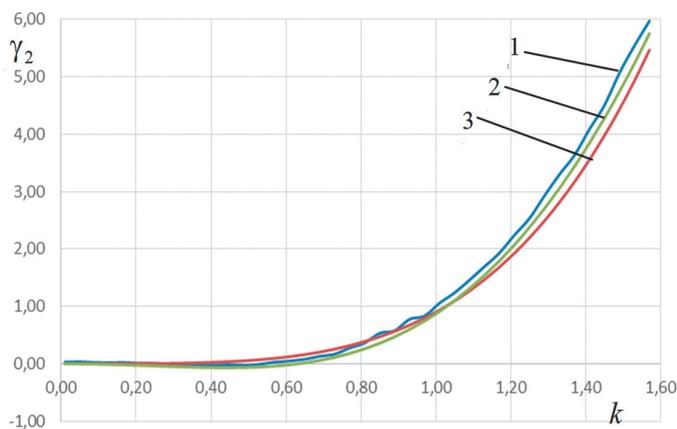


Рис. 5. Аппроксимация коэффициента эксцесса. Виды расчета: 1 – экспериментальные данные, 2 – формула (16), 3 – формула (17)

мости, что фактически означает срабатывание измерительного органа при превышении сигналом величины  $x_N/b$ , как при ступенчатом сигнале. Это иллюстрирует рис. 6, построенный при  $N = 500$ . Видно, что расчет по формуле (17) дает несколько меньшее значение  $k$  при заданном числе отсчетов срабатывания вследствие завышенной оценки  $\gamma_2$ . Однако формула (16) правильно указывает аналитическую зависимость коэффициента эксцесса от основных параметров.

Для сравнения на рис. 6 показана граница области срабатывания измерительного органа с синусоидальным предшествующим режимом. Чувствительность к аварийному сигналу на этом фоне снижается незначительно.

Схематично запаздывание  $n_c$  срабатывания измерительного органа по отношению к началу аварийного процесса с заданным коэффициентом нарастания  $k$  показано на рис. 7. Коэффициент  $k$  отражен углом на-

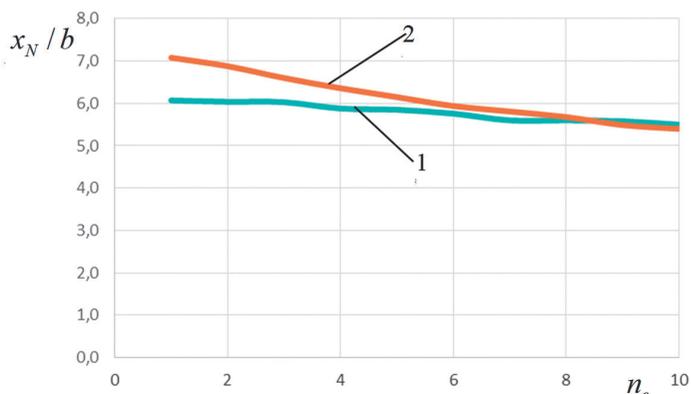


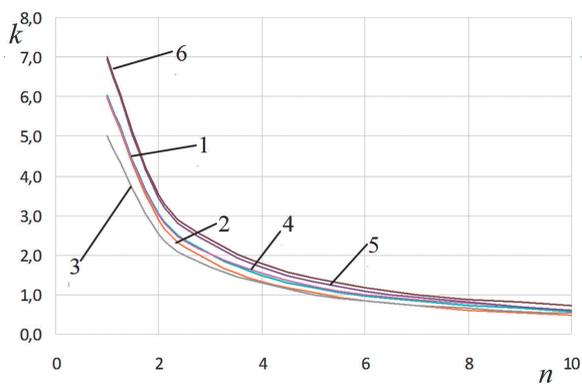
Рис. 7. Запаздывание срабатывания измерительного органа: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация по выражению (17)

клона отрезка, соединяющего начало координат и отсчет срабатывания. Рисунок также позволяет наблюдать величину  $x_N/b = kn_c$  в момент срабатывания измерительного органа. Как видно, в эксперименте она оказалась в диапазоне от 5,5 до 6,1.

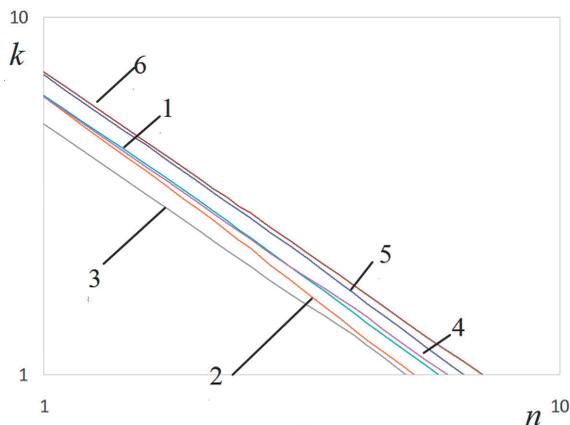
3) Величина порога  $kbn$  совпадает с расчетом (14) с погрешностью не более 20%. Это свидетельствует о том, что при больших  $N$  для срабатывания измерительного органа на основе коэффициента эксцесса необходима определенная величина отклонения отсчета в аварийном режиме.

4) Характеристики функции эксцесса близки к характеристикам измерительного органа со сравнением текущего отсчета  $x_i$  со значением  $k_S\sigma$ , рассчитанного по текущему значению  $\sigma$  и заранее заданному коэффициенту  $k_S$ .

Теоретически нормальное распределение не ограничивает диапазон значений множества  $X$ , а потому вероятность излишнего срабатывания измерительного органа оценивается вероятностью превышения очередным отсчетом  $x_i$  заданного порога. Для найденных выше пороговых величин вероятность такого срабатывания составляет менее  $10^{-6}$ . Мощность единичного импульса невелика, однако коэффициент эксцесса не позволяет регулировать мощность срабатывания контролем длительности превышения порога, так как дальнейший сдвиг окна не приводит к изменению соотношения мощности шума и этого выброса. Поэтому выявленные зависимости нужно рассматривать как чувствительность измерительного органа. Если выброс не случаен (относится к полезному сигналу), то дальнейшее нарастание сигнала приведет к возрастанию коэффициента эксцесса и его срабатыванию с опозданием, которое можно отнести к разрешающей способности функции эксцесса при выявлении фронта волны. Уточнение метки времени начала процесса и, соответственно, повышение разрешающей способности измерительного органа целесообразно производить с



а)



б)

Рис. 6. Граница зоны срабатывания измерительного органа в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе: 1 – экспериментальные данные для нормального распределения, 2 – приближение по формуле (17), 3 – пороговый измерительный орган при  $k_S = 5,5$ , 4 – пороговый измерительный орган при  $k_S = 6,0$ , 5 – пороговый измерительный орган при  $k_S = 7,0$ , 6 – экспериментальные данные для  $\beta$ -распределения

использованием модели сигнала на заданном (найденном) интервале времени, как это показано на рис. 7.

### Выводы

Таким образом, проведенное аналитическое исследование показало, что коэффициент эксцесса обладает характеристиками, которые могут быть использованы для построения измерительного органа выявления фронта волны. К его положительным свойствам относятся адаптивность к фоновому шуму в сигнале, а также универсальность применения, в том числе и к величине принужденных составляющих. При рассмотренных значениях параметров коэффициент эксцесса обеспечивает отношение сигнал-шум от 11 до 17 дБ, что вполне удовлетворяет требованиям РЗА. При необходимости эта величина может быть скорректирована путем изменения параметров расчета. Анализ показал, что вне зависимости от вида распределения выборок предшествующего режима поведение измерительного органа универсально описывается величиной отклонения при срабатывании.

### Литература:

1. Лачугин В.Ф., Сидорук С.В. Преимущества применения волновых методов в релейной защите и при определении места повреждения на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – №1. – С. 16-20.
2. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Бычков Ю.В. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждения за счет отраженных волн // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №4. – С. 34-37.

3. Лачугин В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.14.02. – Иваново, 2016. – 40 с.
4. Патент US 6597180B1. Fault point location system / Takaoka M., Sugiura M. Publ. 22.07.2003.
5. Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Пелевин П.С. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов // Электричество. – 2018. – № 3. – С. 11-17.
6. Ермаков К.И. Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ермаков Константин Игоревич. – Чебоксары, 2022. – 209 с.
7. Dong X.Z., Redfern M.A., Bo Z., Jiang F. The application of the wavelet transform of travelling wave phenomena for transient based protection // International conference on power systems transients - IPST. – New Orleans, USA, 2003. – P.1-6.
8. Lopes F., Leite E. Jr., Ribeiro J.P., Lopes L., Piardi A., Otto R., Neves W. Using the differentiator-smoother filter to analyze traveling waves on transmission lines: fundamentals, settings and implementation // Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2019 (IPST). – Perpignan, France, 2019. – P.1-6.
9. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н., Арутюнов С.А., Ключкин Н.Г., Шеметов А.С. Полигонные испытания системы волнового определения места повреждения на воздушных линиях // Электрические станции. – 2021. – № 8. – С. 34-40.
10. Патент РФ на изобретение № 2739433. МПК G 01 R 31/08. Способ определения места повреждения на линии электропередачи / Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Иванов С.В., Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н., Алексеев В.Г., Вазюлин М.В., Митрофанов Н.Н., Попов С.Г., Шеметов А.С. Заявл. 16.07.2020; опубл. 24.12.2020.
11. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных // Известия РАН. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 137-146.
12. Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Статистический измерительный орган волновых устройств РЗА // Известия Академии электротехнических наук РФ. – Выпуск 23, июль. – 2021. – С. 16-27.

# ПОДПИСКА

## через редакцию на 2023 год



[srzau-ric.ru](http://srzau-ric.ru)



печатная версия

**1100** ₺

(в т.ч. НДС 10% + пересылка)

электронная версия

**700** ₺

(в т.ч. НДС 20%)



[adv@srzau-ric.ru](mailto:adv@srzau-ric.ru)



**+7 (905) 346 87 55**