

Цифровая автоматика ограничения повышения напряжения: алгоритмы и практическая реализация

В.И. АНТОНОВ, В.А. НАУМОВ, Ю.Н. АЛИМОВ, В.С. ПЕТРОВ
ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный университет
Россия
Petrov_vs@ekra.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Автоматика ограничения повышения напряжения, перенапряжения, ресурс изоляции.

1 ВВЕДЕНИЕ

Перенапряжения на электрическом оборудовании связаны с различными коммутациями в электрической сети как в нормальном, так и аварийном режимах. В основном, перенапряжения возникают при включении и отключении ненагруженных линий, отключении ненагруженных трансформаторов и реакторов, конденсаторных батарей, при работе АПВ [1] и т.д.

Особой разновидностью перенапряжений являются резонансные перенапряжения, вызванные изменением нелинейной индуктивности под действием апериодической составляющей, когда в электрической цепи создаются условия для параметрического резонанса. Резонансные перенапряжения могут достигнуть максимальных уровней, если линия оказалась подключенной к источнику напряжения только с одной стороны (режим одностороннего включения), а также при аварийном отключении линии с одной стороны или при действии АПВ на одной стороне линии [1].

Для изоляции электрооборудования опасными являются как коммутационные, так и резонансные перенапряжения. Основным средством ограничения коммутационных перенапряжений являются разрядники, а длительные резонансные перенапряжения ограничиваются устройствами автоматического ограничения повышения напряжения (АОПН) путем включения шунтирующих реакторов.

Согласно [2], устройство АОПН должно обеспечивать пофазную фиксацию превышения действующим значением напряжения наибольшего рабочего значения по условию допустимого нагрева трансформаторов, а также максимальным значением – по условию электрической прочности изоляции. Допустимые времена перенапряжений задаются вольт-секундной характеристикой (ВСХ) [3].

Интеграция автоматики в интеллектуальную среду цифровых подстанций повышает требования к алгоритмам цифровых измерений максимального и действующего значений напряжения. Прямое использование понятий и определений, изложенных в классическом курсе основ электротехники, для формирования алгоритмов измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения неэффективно из-за особенностей цифрового представления информации. Кроме того, контроль максимального значения напряжения связан, так или иначе, с анализом мгновенных значений (отсчетов), и его точность подвержена значительному влиянию различных импульсных помех (выбросов в данных). Учитывая, что это напрямую влияет на точность расчёта контролируемых величин [4], характеризующих остаточный ресурс изоляции оборудования, в автоматике необходимо предусмотреть специальный алгоритм прецизионной коррекции выбросов в сигнале напряжения.

В то же время, максимальное значение напряжения недоступно для непосредственного измерения из-за дискретизации входного сигнала. Это же обстоятельство накладывает свои особенности на алгоритм определения действующего значения напряжения. При номинальной

частоте сети классический метод определения действующего значения свободен от погрешностей, но при уходе частоты сети от номинального значения в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное тем, что усреднение не обеспечивает подавления составляющих суммарных частот от гармоник входного сигнала. Поэтому алгоритм определения действующего значения должен учитывать эту особенность.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В цифровой АОПН НПП «ЭКРА» используются нетрадиционные с точки зрения теоретических основ электротехники алгоритмы, но в полной мере обеспечивающие необходимые метрологические характеристики измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения.

Фильтрация импульсных помех. Во избежание влияния случайных импульсных помех на оценку контролируемых величин, в устройстве предусмотрен специальный быстродействующий фильтр, обеспечивающий локализацию и прецизионное исправление отсчетов, содержащих выбросы. Действительно, выбросы в отсчетах могут привести к существенной потере точности оценки ресурса высоковольтного оборудования, особенно при значительном уровне перенапряжения. Если, например, выброс увеличит отсчёт (в относительных единицах) с 1.025 до 1.05, то это приведет к ошибочному уменьшению оценки ресурса изоляции всего лишь на $5.787 \cdot 10^{-7}$, поскольку влияние перенапряжения на запас ресурса (начальное значение равно 1) в этом случае не столь высоко. В то же время, изменение отсчета с 1.67 до 1.76 из-за выброса приведет к ошибке в оценке ресурса до 0.09, что уже представляет собой значительную величину.

В цифровой АОПН НПП «ЭКРА» развивается метод выявления и коррекции выбросов, изложенной в [5]. Обнаружение, локализация и коррекция выброса производится автоматически с помощью специального фильтра-интерполятора, частотная характеристика которого усиливает высокочастотную часть спектра сигнала (рисунок 1).

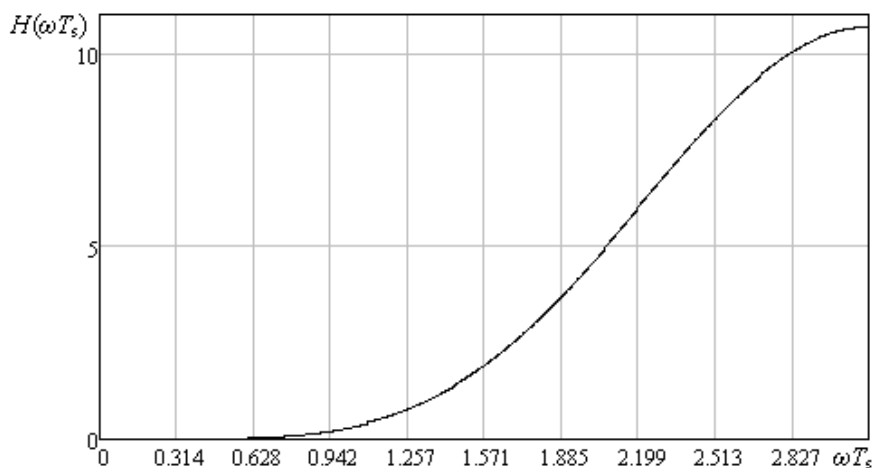


Рис. 1: АЧХ цифрового фильтра-интерполятора

Фильтр представляет собой совокупность линейных фильтров предсказания вперед и назад, формирующих одновременную оценку двух отсчетов сигнала. Обнаружение выброса происходит за счет вычисления обобщенной невязки между предсказываемыми отсчетами и их оценками и сравнения ее с заданным порогом. При появлении в окне фильтра-интерполятора выброса происходит разбалансировка между фильтрами предсказания, из-за чего обобщенная невязка резко вырастет, превышая заданный порог. Величина порога выбирается исходя из уровня шумов сигнала. Высокая чувствительность фильтра-интерполятора к выбросам обеспечивается тем его свойством, что продвижение отсчета с выбросом вглубь окна фильтра приводит к значительному росту относительного уровня обобщенной невязки. Обнаруженный

отсчет с выбросом заменяется его оценкой. При отсутствии шума погрешность восстановления отсчета синусоидального сигнала частотой 50 Гц не превышает 0,1%.

Проверка алгоритма выявления и коррекции выбросов проводилась на сигнале, соответствующем наиболее тяжелому случаю перенапряжения. Это – случай параметрического резонанса на второй гармонике [6], обусловленного наличием в магнитном потоке трансформатора, включенного на линию электропередачи с одной стороны, медленно затухающей аperiodической составляющей. Проведённые в электрических системах опыты [7] выявили, что вторая гармоника, пренебрежимо малая в установившемся режиме, существует в течение длительного переходного режима (порядка 1,5 с) и имеет соизмеримый с первой гармоникой уровень, медленно уменьшаясь от периода к периоду [8, 9]. Учитывалось, что частота сети может отличаться от номинального значения до 12 Гц (при отключении линии в асинхронном режиме сети [10]). Этот вид перенапряжения принят за самый тяжелый, имея в виду, что феррорезонанс на третьей и пятой гармониках возможен, но потери на корону значительно ограничивают уровень перенапряжений.

Вычислительный эксперимент показал, что алгоритм способен определить выброс величиной 5 % от максимального значения напряжения в режиме параметрического резонанса, включающего в себя первую (62 Гц) и вторую (124 Гц) синфазные гармоники равной амплитуды.

В измерительных органах АОПН для определения максимального и действующего значений используются отсчеты напряжения только после фильтрации импульсных помех (выбросов).

Оценка максимального значения. Поскольку в цифровой автоматике измерения контролируемого напряжения известны лишь в дискретные моменты времени, то определение мгновенного значения непосредственно из измерений невозможно. В связи с этим максимальное значение напряжения оценивается путем определения максимального значения интерполяционной кривой, проведенной через отсчеты напряжения вблизи его предполагаемого максимума. Для этого вначале выпрямляется напряжение, а затем выделяется в выпрямленном сигнале отрезок, расположенный между двумя отсчетами ниже некоторого порога (порог 1 на рисунке 2), и все отсчеты которого выше упомянутого порога (отсчеты между точками *a* и *b*). Тем самым на каждом полупериоде сигнала (на периоде выпрямленного сигнала) определяется отрезок, содержащий в себе абсолютное максимальное значение напряжения.

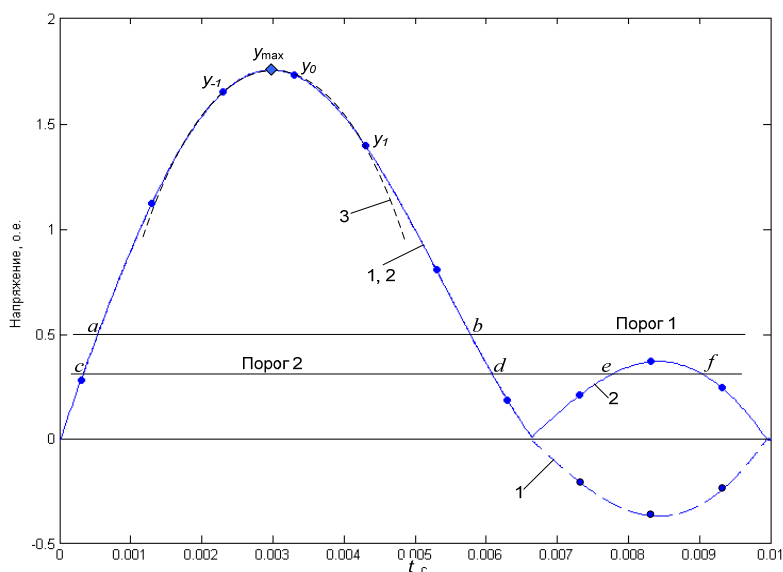


Рис. 2: Оценка максимального значения при периодическом несинусоидальном напряжении (кривая 1), содержащем синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды (показан полупериод напряжения)

Как видно из рисунка 2, порог должен обеспечивать однозначное определение отрезка с максимальным значением напряжения для данного периода выпрямленного сигнала. Неудачный выбор порога может привести к выделению на периоде нескольких отрезков со своими максимумами, что приведет к неправильному учету ресурса. Этот случай иллюстрируется рисунком 2 при работе способа с неправильно выбранным порогом 2, когда на периоде будут выделены два отрезка $c - d$ и $e - f$.

Для обеспечения однозначности определения необходимого отрезка выпрямленного сигнала порог нужно выбирать с учетом режимов высоковольтной электрической сети, при которых есть вероятность появления нескольких экстремумов на периоде выпрямленного сигнала. С этой точки зрения наиболее характерным является параметрический резонанс, выпрямленный сигнал которого (кривая 2 на рисунке 2) имеет два максимума. Для правильного выделения отрезка, содержащего абсолютный максимум на полупериоде сигнала, порог 1 выбирается выше малой полуволны выпрямленного сигнала.

Поскольку в промежутке между измерениями значение напряжения недоступно, то максимальный отсчет y_0 на выделенном отрезке сигнала, как правило, не соответствует максимальному значению сигнала. Эту проблему неопределенности способ решает путем интерполяции кривой напряжения полиномом с единственным максимумом, проведенным по измеренным значениям напряжения, расположенным по обе стороны от отсчета с максимальным значением на выделенном отрезке (кривая 3). Максимум интерполяционной кривой $y_{\max}$ принимается за абсолютное максимальное значение электрического напряжения на полупериоде (на рисунке 2 значение $y_{\max}$ отмечено меткой в виде ромбика). Максимальное значение определяется на каждом полупериоде сигнала напряжения.

Проведенный анализ (рисунок 3) показал, что оценка максимального значения с помощью интерполяционного полинома [11], в частности параболы, не уступает по точности методу, использующему для этой же цели представление сигнала рядом Тейлора в окрестности отсчета с максимальным значением y_0 . В то же время использование интерполяционного полинома алгоритмически проще.

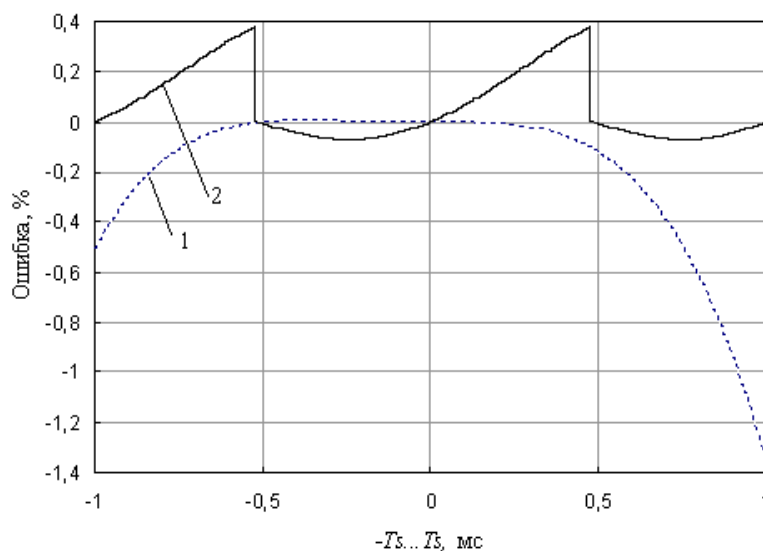


Рис. 3: Погрешность оценки максимального значения сигнала, содержащего синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды. Частота дискретизации сигнала 1000 Гц, максимальное значение сигнала 1.76 о.е.: 1 – ряд Тейлора, 2 – полином 2-го порядка.

Оценка действующего значения. В АОПН НПП «ЭКРА» оценка действующего значения напряжения соответствует равенству Ляпунова (эквивалент теоремы Парсеваля для периодических сигналов), согласно которому квадрат действующего значения электрической величины равняется сумме квадратов действующих значений ее гармоник. В зарубежной

литературе такую оценку действующего значения (действующего значения периодического несинусоидального сигнала) иногда называют как true RMS.

Как известно, квадрат действующего значения $U^2(k)$ периодического напряжения $u(k)$ в текущий момент времени k определяется как

$$U^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u^2(m), \quad (1)$$

где N – число отсчётов на периоде $u(k)$. Несложно показать, что при уходе частоты сети от номинальной, в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное недостаточным подавлением составляющих суммарной частоты. Это хорошо видно из АЧХ (рисунок 4) сумматора в (1). Присутствие гармоник в напряжении еще больше усугубляет положение. В силу особенностей АЧХ сумматора, наибольшая погрешность возникает при уменьшении частоты. Например, в случае уменьшении частоты сети до 38 Гц погрешность определения действующего значения напряжения при параметрическом резонансе достигает 17%.

С целью снижения влияния переменной составляющей в (1), алгоритм определения действующего значения дополнен специальными фильтрами, усиливающими подавление составляющих суммарных и разностных частот в (1). Как видно из рисунка 4, новый фильтр имеет лучшие подавляющие свойства. Исследования показали, что погрешность оценки новым алгоритмом действующего значения напряжения при параметрическом резонансе – в режиме, отмеченном для АОПН как самый тяжёлый, – не превышает 5%. Таким образом, разработанный метод позволяет снизить погрешность 3 раза по сравнению с классическим способом (1).

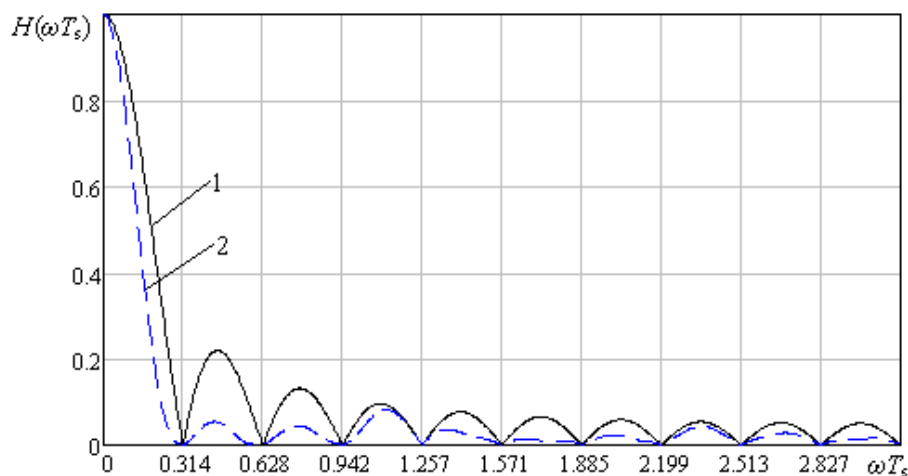


Рис. 4: АЧХ: 1 – классический алгоритм, 2 – предлагаемый авторами

Для работы алгоритма не важно, богат ли сигнал высшими гармониками или содержит лишь составляющую основной гармоники. Предпринимаемые алгоритмом действия будут инвариантны на множестве предусмотренных в нем операций.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прямое использование понятий и определений, изложенных в классическом курсе основ электротехники, для формирования алгоритмов измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения неэффективно из-за особенностей цифрового представления информации. Поэтому в цифровой автоматике ограничения повышения напряжения НПП «ЭКРА» используются нетрадиционные с точки зрения теоретических основ электротехники алгоритмы, но в полной мере обеспечивающие необходимые метрологические

характеристики измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения.

Контроль максимального значения напряжения связан, так или иначе, с анализом мгновенных значений (отсчетов), и его точность подвержена значительному влиянию различного рода помех и выбросов. Учитывая, что это напрямую влияет на точность расчёта остаточного ресурса изоляции оборудования, в автоматике предусмотрен специальный алгоритм прецизионной коррекции выбросов в сигнале напряжения. Алгоритм адаптивен к изменению уровня сигнала напряжения и автоматически обнаруживает появление выброса в сигнале, локализует и прецизионно восстанавливает искаженный отсчет.

Поскольку в цифровой автоматике измерения контролируемого напряжения известны лишь в дискретные моменты времени, то определение мгновенного значения непосредственно из измерений невозможно. В связи с этим максимальное значение напряжения оценивается с помощью интерполяционной кривой, проведенной через отсчеты напряжения вблизи его предполагаемого максимума. Способ хорошо работает и в случае формирования максимума кривой наложением высших гармоник.

При уходе частоты сети от номинальной, в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное недостаточным подавлением составляющих суммарной частоты. Присутствие гармоник в напряжении еще больше усугубляет положение. С целью снижения влияния переменной составляющей, алгоритм определения действующего значения дополнен специальными фильтрами, усиливающими подавление составляющих суммарных и разностных частот, вызванных наличием в напряжении высших гармоник. Предложенный в работе метод позволяет снизить погрешность 3 раза по сравнению с классическим способом.

Алгоритмы внедрены в шкафах противоаварийной автоматики энергосистем, серийно выпускаемых Научно-производственным предприятием «ЭКРА».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. Автоматика энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [2] Аттестационные требования к устройствам противоаварийной автоматики. СТО 56947007-33.040.20.123-2012. ОАО «ФСК ЕЭС». 2012.
- [3] ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
- [4] Бондаренко А.Ф., Наумов А.М., Наумов В.А., Петров В.С., Левиуш А.И., Лоханин А.К., Фокин Г.Г. Совершенствование защиты от повышения напряжения для сетей 500 кВ и выше // Электричество. 2012. № 2. С. 11-14.
- [5] Антонов В.И., Лазарева Н.М., Пуляев В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем. М.: НТФ «Энергопрогресс» // «Энергетик». 2000. - 83 с.
- [6] Левиуш А.И., Катунян В.И. Исследование на математической модели параметрического резонанса на второй гармонике для анализа работы релейной защиты ВЛ // Электричество. 1990. № 1. Стр. 57-62.
- [7] Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. Л.: Энергия. 1979.
- [8] Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. Минск: Вышэйшая школа. 1982.
- [9] Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Ленинград: Наука. 1988.
- [10] Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С. Автоматика ликвидации асинхронного режима. – М.: Энергоатомиздат. 1988.

- [11] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука. 1981.