

Эффективные алгоритмы обработки входных сигналов цифровой автоматики ограничения повышения напряжения

- Антонов В. И., канд. техн. наук, Чувашский государственный университет
- Наумов В. А., канд. техн. наук, ООО “НПП “ЭКРА”
- Петров В. С.¹, ООО “НПП “ЭКРА”

Показано, что в цифровой автоматике ограничения повышения напряжения НПП “ЭКРА” для оценки максимальных и действующих значений напряжений используются алгоритмы, учитывающие особенности цифрового представления информации; для удаления из измеряемых сигналов импульсных помех применяется цифровой фильтр-интерполятор.

Ключевые слова: автоматика ограничения повышения напряжения, фильтрация импульсных помех, оценка максимального и действующего значения.

Автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН) контролирует действующее и максимальное значения напряжения в высоковольтных сетях и определяет допустимое время нахождения изоляции высоковольтного оборудования под повышенным напряжением по вольт-секундной характеристике [1].

При разработке цифровых устройств АОПН необходимо учитывать особенности цифрового представления информации о действующем и максимальном значениях контролируемого напряжения. Кроме того, при оценке максимального значения напряжения проводится анализ мгновенных значений (отсчётов) и его точность в значительной степени зависит от влияния различных импульсных помех (выбросов в данных). Учитывая, что это напрямую связано с точностью расчёта контролируемых величин [2], в автоматике необходимо предусмотреть специальный быстродействующий алгоритм прецизионной коррекции отсчётов с выбросами в сигнале напряжения.

В то же время максимальное значение напряжения недоступно для непосредственного измере-

ния из-за дискретизации входного сигнала. И алгоритм определения действующего значения напряжения тоже должен учитывать влияние эффектов дискретизации. При отклонении частоты сети от номинального значения в оценке действующего значения появляется смещение, обусловленное недостаточным подавлением оператором усреднения составляющих суммарных частот, вызванных гармониками во входном сигнале.

С целью повышения эффективности АОПН необходима разработка алгоритмов обработки входных сигналов, свободных от указанных недостатков.

Удаление импульсных помех. Выбросы в отсчётах входного сигнала могут привести к существенному искажению оценки ресурса высоковольтного оборудования, особенно при значительном уровне перенапряжения. Например, ложное из-за выброса увеличение оценки контролируемой величины (максимального или действующего значения) с 1,67 до 1,76 (в относительных единицах) согласно вольт-секундной характеристике приведёт к ошибке в оценке ресурса до 0,09 в течение одного полупериода напряжения, что представляет собой значительную величину.

В цифровой АОПН НПП “ЭКРА” обнаружение, локализация и коррекция выброса производятся автоматически [3] с помощью специального фильтра-интерполятора, амплитудно-частотная характеристика $H(\omega T_s)$ которого оптимально настроена на выявление импульсных помех (рис. 1, характеристика построена для нормированной частоты $\omega T_s = 0 \div \pi$, где T_s – период дискретизации; частоте сигнала f соответствует нормированная частота $\omega T_s = 2\pi f T_s$).

Фильтр представляет собой совокупность линейных фильтров предсказания вперёд и назад, формирующих одновременную оценку двух отсчётов сигнала. Обнаружение выброса происхо-

¹ Петров Владимир Сергеевич: petrov_vs@ekra.ru

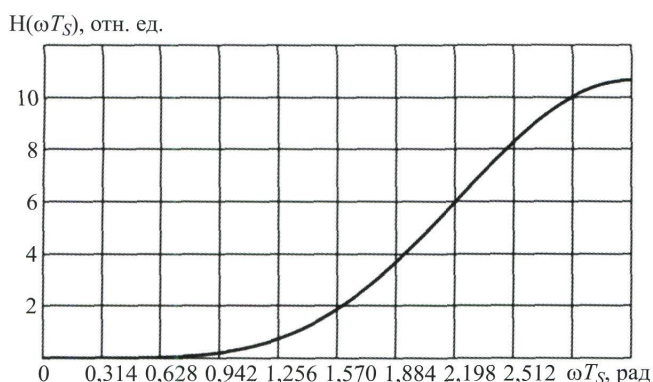


Рис. 1. АЧХ цифрового фильтра-интерполятора

дит в результате сравнения обобщённой невязки, определяемой как разница между предсказываемыми отсчётами и их оценками, с заданным порогом. Появление в окне фильтра-интерполятора выброса приводит к нарушению баланса между фильтрами предсказания, из-за чего обобщённая невязка резко вырастает, превышая заданный порог. Величина порога выбирается исходя из уровня шумов сигнала. Высокая чувствительность фильтра-интерполятора к выбросам обеспечивается тем его свойством, что продвижение отсчёта с выбросом в глубь окна фильтра приводит к значительному росту относительного уровня обобщённой невязки. Обнаруженный отсчёт с выбросом заменяется его оценкой. Как показали специальные исследования, при отсутствии шума погрешность восстановления отсчёта синусоидального сигнала частотой 50 Гц не превышает 0,1%.

Проверка алгоритма выявления и коррекции выбросов проводилась на сигнале, соответствующем наиболее тяжёлому случаю – возникновению перенапряжений при параметрическом резонансе на второй гармонике [4]. Проведённые в электрических системах опыты [5] показали, что вторая гармоника, пренебрежимо малая в установившемся режиме, существует длительно (порядка 1,5 с) и имеет соизмеримый с первой гармоникой уровень, который медленно уменьшается от периода к периоду [6, 7]. Учитывалось, что частота сети может отличаться от номинального значения до 12 Гц (при отключении линии во время асинхронного режима сети [8]). Этот вид перенапряжения принят за самый тяжёлый с учётом того, что феррорезонанс на третьей и пятой гармониках возможен, но потери на корону значительно ограничивают уровень перенапряжений [7].

Исследования на математической модели показали, что алгоритм способен определить выброс величиной 5% максимального значения напряжения в режиме параметрического резонанса, включающего в себя первую (62 Гц) и вторую (124 Гц) синфазные гармоники равной амплитуды.

Для определения максимального и действующего значений в измерительных органах АОПН используются отсчёты напряжения только после удаления импульсных помех (выбросов).

Оценка максимального значения. Поскольку в цифровой автоматике отсчёты контролируемого напряжения известны лишь в дискретные моменты времени, то очевидно, что определить его максимальное значение непосредственно из измерений невозможно. В связи с этим максимальное значение напряжения оценивается путём определения экстремума интерполяционной кривой, проведённой через отсчёты напряжения вблизи его предполагаемого максимума. Для этого в выпрямленном сигнале выделяется отрезок, отсчёты которого выше некоторого порога (отсчёты между точками a и b на рис. 2). Тем самым на каждом полу-

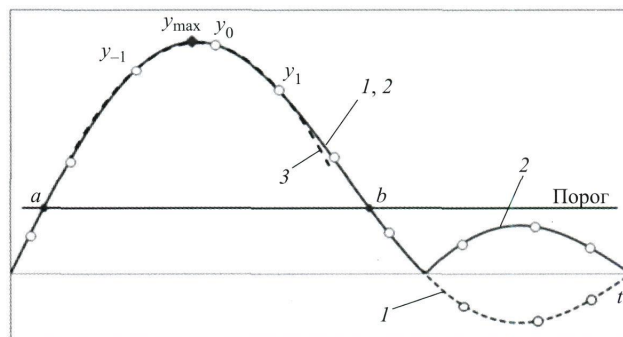


Рис. 2. Оценка максимального значения при периодическом несинусоидальном напряжении, содержащем синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды (показан полупериод напряжения):

1 – напряжение; 2 – выпрямленный сигнал; 3 – интерполяционная кривая

периоде сигнала (на периоде выпрямленного сигнала) определяется отрезок, содержащий в себе абсолютное максимальное значение напряжения.

Как видно из рис. 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 приведёт к неправильному учёту ресурса. Для обеспечения однозначности определения необходимого отрезка выпрямленного сигнала при выборе порога нужно учитывать режимы высоковольтной электрической сети, при которых есть вероятность появления нескольких экстремумов на периоде выпрямленного сигнала. С этой точки зрения наиболее характерен параметрический резонанс, выпрямленный сигнал которого (кривая 2) имеет два экстремума. Для правильного выделения отрезка, содержащего абсолютный максимум на полупериоде сигнала, упомянутый порог выбирается выше малой полуволны выпрямленного сигнала.

Поскольку в промежутке между измерениями значение напряжения недоступно, то наибольший на выделенном отрезке сигнала отсчёт y_0 , как правило, не соответствует максимальному значению сигнала. Проблема неопределённости решается интерполяцией кривой напряжения полиномом с единственным максимумом, проведённым по измеренным значениям напряжения, расположенным по обе стороны от отсчёта с максимальным значением на выделенном отрезке (кривая 3). Экстремум интерполяционной кривой y_{max} принимается за абсолютное максимальное значение электрического напряжения на полупериоде. Максимальное значение определяется на каждом полу-

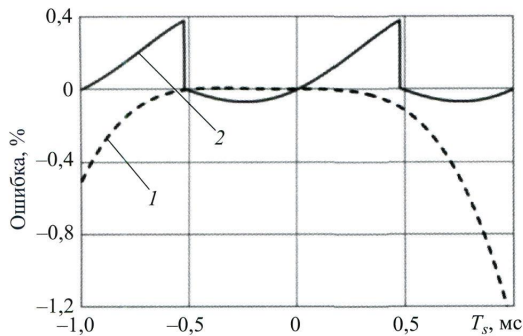


Рис. 3. Погрешность оценки максимального значения сигнала, содержащего синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды, в зависимости от положения экстремума входного сигнала в пределах периода дискретизации (частота дискретизации сигнала 1000 Гц, максимальное значение сигнала 1,76 отн. ед.):

1 – погрешность ряда Тейлора; 2 – погрешность полинома второго порядка

периоде сигнала напряжения по следующему выражению:

$$y_{\max} = y_0 - \frac{(y_{-1} - y_1)^2}{8(y_{-1} - 2y_0 + y_1)}. \quad (1)$$

Как видно из рис. 3, оценка максимального значения, получаемая с помощью интерполяционного полинома второго порядка, не уступает по точности представлению сигнала в окрестности отсчёта с максимальным значением y_0 рядом Тейлора, ограниченным квадратичным членом. Понятно, что использование интерполяционного полинома алгоритмически проще и выигрышнее.

Оценка действующего значения. В АОПН НПП “ЭКРА” оценка действующего значения напряжения отвечает равенству Ляпунова (эквивалент теоремы Парсеваля для периодических сигналов), согласно которому квадрат действующего значения электрической величины равняется сумме квадратов действующих значений её гармоник.

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

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

где N – число отсчётов на периоде сигнала $u(k)$. Несложно показать, что при отклонении частоты сети от номинальной в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное недостаточным подавлением составляющих суммарной частоты. Это хорошо видно из АЧХ (рис. 4) сумматора в определении (2). Присутствие гармоник в напряжении ещё больше усугубляет положение. В силу особенностей АЧХ сумматора наибольшая погрешность возникает при уменьшении частоты.

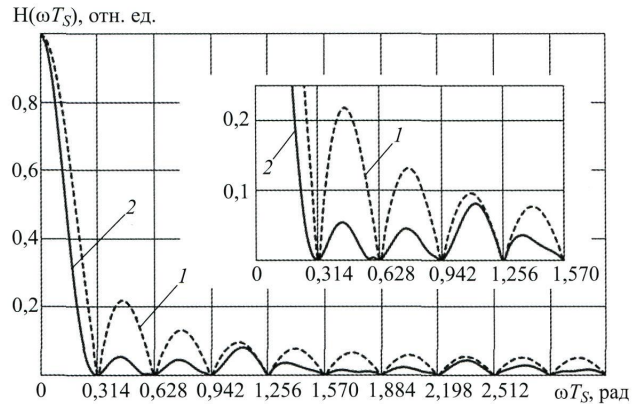


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика:

1 – по алгоритму уравнения (2); 2 – по новому алгоритму

Например, при падении частоты сети до 38 Гц погрешность определения действующего значения напряжения при параметрическом резонансе достигает 17%.

С целью снижения влияния переменной составляющей в выражении (2) алгоритм определения действующего значения дополнен специальными фильтрами, усиливающими подавление составляющих суммарных и разностных частот. Как видно из рис. 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 в 3 раза по сравнению с определением действующего значения напряжения по выражению (2).

Работа алгоритма не зависит от того, содержит ли сигнал высшие гармоники или включает лишь составляющую основной гармоники. Предпринимаемые алгоритмом действия будут инвариантны на множестве предусмотренных в нем операций.

Выводы

1. Для формирования алгоритмов измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения в цифровой автоматике ограничения повышения напряжения НПП “ЭКРА” учитываются особенности цифрового представления информации об измеряемых величинах.

2. Контроль максимального значения напряжения связан с анализом мгновенных значений (отсчётов) и его точность зависит от влияния различного рода помех и выбросов, поэтому в автоматике предусмотрена коррекция выбросов в сигнале напряжения.

3. Высокую точность оценки максимального значения контролируемого напряжения, измерения которого известны лишь в дискретные момен-

ты времени, обеспечивают алгоритмы, использующие интерполяционные полиномы.

4. Повышение точности оценки действующего значения в условиях отклонения частоты сети от номинального значения достигается использованием специального фильтра, предназначенного для подавления составляющих суммарной частоты и имеющего седловидный характер кривой амплитудно-частотной характеристики в окрестности суммарных частот.

Список литературы

1. *ГОСТ 1516.3–96*. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
2. *Совершенствование* защиты от повышения напряжения для сетей 500 кВ и выше / Бондаренко А. Ф., Наумов А. М., Наумов В. А., Петров В. С., Левиуш А. И., Лоханин А. К., Фокин Г. Г. – *Электричество*, 2012, № 2.
3. *Антонов В. И., Лазарева Н. М., Пуляев В. И.* Методы обработки цифровых сигналов энергосистем. М.: Энергопрогресс. Библиотечка электротехника (приложение к журналу “Энергетик”), 2000, вып. 11(23).
4. *Левиуш А. И., Катунян В. И.* Исследование на математической модели параметрического резонанса на второй гармонике для анализа работы релейной защиты ВЛ. – *Электричество*, 1990, № 1.
5. *Тиходеев Н. Н., Шур С. С.* Изоляция электрических сетей. Л.: Энергия, 1979.
6. *Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А.* Техника высоких напряжений. Минск: Вышэйшая школа, 1982.
7. *Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения* / Костенко М. В., Кадомская К. П., Левинштейн М. Л., Ефремов И. А. Л.: Наука, 1988.
8. *Гоник Я. Е., Иглицкий Е. С.* Автоматика ликвидации асинхронного режима. М: Энергоатомиздат, 1988.