

# Пусконаладка устройства защиты (IED) на принципе субгармоник с использованием современных инструментов тестирования

Р. Миданс (R. Midence), А. Оливейра (A. Oliveira), Н. Перера (N. Perera), ERLPhase Power Technologies Ltd

Э. Карвалейра (E. Carvalheira), К. Дональдсон (K. Donaldson), OMICRON electronics

## Аннотация

В последние годы все большую распространенность приобретают устройства защиты, регистрирующие возникновение такого явления, как подсинхронный резонанс (Sub-Synchronous Resonance, SSR). Появление таких устройств защиты привело к необходимости их тестирования (в том числе, при вводе в эксплуатацию), которое осуществляется по иной процедуре, нежели испытание других микропроцессорных устройств. Авторы этой статьи излагают свой опыт ввода реле защиты от субгармоник в эксплуатацию, описывают процесс использования комплексной системы тестирования реле (OMICRON CMC 356, модули Ramping и PQ Signal Generator пакета Test Universe и шаблон OCC), а также рекомендуемые подготовительные и испытательные процедуры.

В статье рассматриваются следующие вопросы:

- Характеристики реле защиты от субгармоник
- Процесс настройки параметров
- Выбор испытаний для надлежащего тестирования всех функций реле
- Использование комплексной системы тестирования реле для подготовки планов, используемых в процессе тестирования реле
- Ввод реле в эксплуатацию на объекте с использованием комплексного программного обеспечения и оборудования для тестирования реле

Во время ввода в эксплуатацию реле защиты от субгармоник авторы

обнаружили, что даже специалисты очень мало знают о таких явлениях, как SSR и SSCI, и не понимают, как правильно настраивать и тестировать устройства IED для защиты от субгармоник, поэтому крайне важно предоставить им актуальную информацию по этой тематике.

В документе описывается использование комплексной системы тестирования реле, которая содержит программное обеспечение для создания сценариев, используемых при тестировании функций и проверке настроек реле. Перед созданием плана испытаний необходимо изучить сценарии моделирования энергосистемы, которые использовались для расчета уставок реле. Это позволит создать исчерпывающий план проверки всех функций защиты. По процедуре необходимо проверить такие характеристики:

- Частотные диапазоны субгармоник — реле не должно срабатывать для частот за пределами обозначенного диапазона
- Амплитуды субгармоник — реле не должно срабатывать на субгармоники с амплитудами ниже пороговых
- Тестирование всех связанных функций, таких как подсчет количества инцидентов за заданное время, измерение полного коэффициента субгармонических искажений, блокировка по второй и пятой гармоникам и т. д.
- Функции защиты на основной частоте

*Ключевые слова:* подсинхронный резонанс, SSR, подсинхронные

*взаимодействия, линии передач, продольная компенсация, субгармоники, комплексные системы тестирования реле*

## **Общие сведения**

За последние годы было опубликовано несколько статей, описывающих различные типы подсинхронных взаимодействий элементов энергосистемы. В частности, крупногабаритных парогенераторов, ветроэлектростанций, высоковольтных систем электропередач постоянного тока (HVDC) и линий электропередач с продольной компенсацией.

Подсинхронные взаимодействия (Sub-synchronous Interactions, SSI) — это группа физических взаимодействий, в результате которых происходит обмен энергией между генератором и системой передачи на частотах переменного тока ниже основной частоты системы. Среди основных компонент подсинхронных взаимодействий можно выделить подсинхронный резонанс (Sub-Synchronous Resonance, SSR), подсинхронные торсионные взаимодействия (Sub-Synchronous Torsional Interactions, SSTI) и подсинхронную нестабильность управления (Sub-Synchronous Control Interactions, SSCI). SSR и SSTI подробно описаны и хорошо изучены такими авторами, как Эндрю Л. Айзекс (Andrew L. Isaacs), Гэрт Д. Ирвин (Garth D. Irwin) и Амит К. Джиндал (Amit K. Jindal) в [1].

Институтом IEEE опубликовано руководство по подсинхронному резонансу [2]. В этом руководстве рассматриваются основные аспекты SSR и аппаратно-зависимых подсинхронных колебаний. В нем также приведены справочные ссылки, которые могут помочь при изучении вопроса.

Организацией NERC 26 июля 2011 года опубликован документ Lesson Learned - Sub-Synchronous Interaction between Series-Compensated Transmission

Lines and Generation (Важные выводы: подсинхронное взаимодействие между линиями электропередач с продольной компенсацией и генераторами). В документе описывается, как при недавних событиях подсинхронных колебаниях между добавочным конденсатором в магистральной сети электропередачи и ветровыми турбинами последние получили значительные повреждения. Обычное отключение повреждения на линии 345 кВ привело к послеаварийной конфигурации сети, когда две ветроэлектростанции радиально подключены к линии передачи 345 кВ с продольной компенсацией. Это вызвало подсинхронную нестабильность управления (SSCI) между ветроустановками и линией электропередачи с продольной компенсацией, в результате чего возникли значительное перенапряжение, искажение тока, отключение дополнительного оборудования системы электропередач и повреждение контура управления ветрогенераторов. В документе содержится вывод о том, что при проектировании магистральных систем электропередачи необходимо учитывать возможную интеграцию крупных ветроэлектростанций. Например, можно установить дополнительные системы защиты для выявления и устранения SSR, а также системы для предотвращения SSR с учетом топологии системы.

Ведущие производители защитных устройств используют рекомендации NERC для разработки реле защиты от субгармоник, способных выявлять подсинхронные взаимодействия для своевременного устранения последствий или даже предотвращения аварий.

К. Нарендра (K. Narendra) с соавторами в [3] дают подробное описание микропроцессорного реле, специально спроектированного для выявления подсинхронных взаимодействий и защиты от их воздействия. В [4][5][6] подробно описано

использование реле защиты от субгармоник, а также расчёта уставок и проверки эффективности реле.

Основное внимание в этом документе уделяется процедуре приемо-сдаточных испытаний реле защиты от субгармоник. Тестируются как функции выявления субгармоник, так и функции защиты на основной частоте.

### Описание уставок защиты от субгармоник

[6] Реле защиты от субгармоник защищает от субгармонических колебаний. Оно измеряет величину напряжений и токов субгармоник с диапазоном частот 5–45 Гц для систем 50 Гц или 5–55 Гц для систем 60 Гц. Реле имеет четыре токовых входа и две трехфазные группы входов по напряжению. Каждый вход можно настроить для обнаружения отдельных частот в диапазоне 5–45 Гц для систем 50 Гц или 5–55 Гц для систем 60 Гц с двумя уровнями обнаружения. Устройство также может суммировать значения тока на любых двух входах (это полезная функция, которая позволяет отслеживать токи в линиях с двумя

выключателями) и задействовать для этих суммированных значений детекторы уровня.

Каждый детектор тока или напряжения имеет следующие уставки обнаружения субгармоник:

- Диапазон частот выбирается между 5 и 45 Гц для систем 50 Гц или 5 и 55 Гц для систем 60 Гц
- Значение срабатывания по уровню субгармоники
  - Номинальный коэффициент (Nominal Ratio)
  - Фундаментальный коэффициент (Fundamental Ratio)
- Задержка срабатывания
- Полный коэффициент субгармонических искажений
- Событий в минуту
- Блокировка по второй гармонике (только для детекторов тока)
- Блокировка по пятой гармонике (только для детекторов тока)

На рис. 1 и рис. 2 ниже показано, как это выглядит.

Рис 1. Настройки детекторов тока

**Main Voltage**

Detector 1		Detector 2	
Name:	Main Voltage Det 1	Name:	Main Voltage Det 2
Pickup Delay:	10.000 s	Pickup Delay:	10.000 s
Minimum Frequency:	5 Hz	Minimum Frequency:	5 Hz
Maximum Frequency:	25 Hz	Maximum Frequency:	25 Hz
Nominal Ratio		Nominal Ratio	
<input type="checkbox"/> Enabled		<input type="checkbox"/> Enabled	
Setting: 5 % of 69V = 3.45V		Setting: 5 % of 69V = 3.45V	
Fundamental Ratio		Fundamental Ratio	
<input type="checkbox"/> Enabled		<input type="checkbox"/> Enabled	
Setting: 5 %		Setting: 5 %	
Total Sub-Harmonic Distortion		Total Sub-Harmonic Distortion	
<input type="checkbox"/> Enabled		<input type="checkbox"/> Enabled	
Setting: 5 %		Setting: 5 %	
Operations / Minute Setting		Operations / Minute Setting	
<input type="checkbox"/> Enabled		<input type="checkbox"/> Enabled	
Setting: 20 operation/minute		Setting: 20 operations/minute	

**Рис 2. Настройки детекторов напряжения**

В следующих разделах описаны функции защиты, показанные на рис. 1 и рис. 2.

### **Диапазон частот**

Диапазон частот — это диапазон частот субгармоник, который будет мониториться устройством защиты. Границы диапазона частот определяются минимальной и максимальной частотой, как показано на рис. 1 и рис. 2. Гармоники, частота которых выходит за пределы диапазона частот, не принимаются в рассмотрение (исключение составляет полный коэффициент субгармонических искажений).

[3] Принцип выявления субгармоник состоит в сравнении амплитуды каждой субгармоники в заданном пользователем диапазоне между минимальным и максимальным значениями частоты с заданным пользователем пороговым значением амплитуды.

При проверке функций реле необходимо убедиться, что оно различает частоты субгармоник в заданном диапазоне и за его пределами.

### **Срабатывание по уровню субгармоники**

Значение срабатывания по уровню субгармоники связаны с уставками Номинальный и Фундаментальный коэффициент.

[3] Функция измерения субгармоник по номинальной частоте сравнивает уставку срабатывания с отношением амплитуды субгармоники к номинальному току или напряжению. Аналогичным образом детектор субгармоник по основной частоте сравнивает уставку срабатывания с отношением амплитуды субгармоники к амплитуде на основной частоте. Реле срабатывает, если номинальный или фундаментальный коэффициент любой субгармоники в пределах диапазона частот превысит уставку срабатывания. [3] На рис. 3 можно видеть графическое представление этой процедуры.

При тестировании необходимо убедиться, что реле точно рассчитывает номинальный и фундаментальный коэффициенты амплитуд и стабильно срабатывает при превышении соответствующего значения.

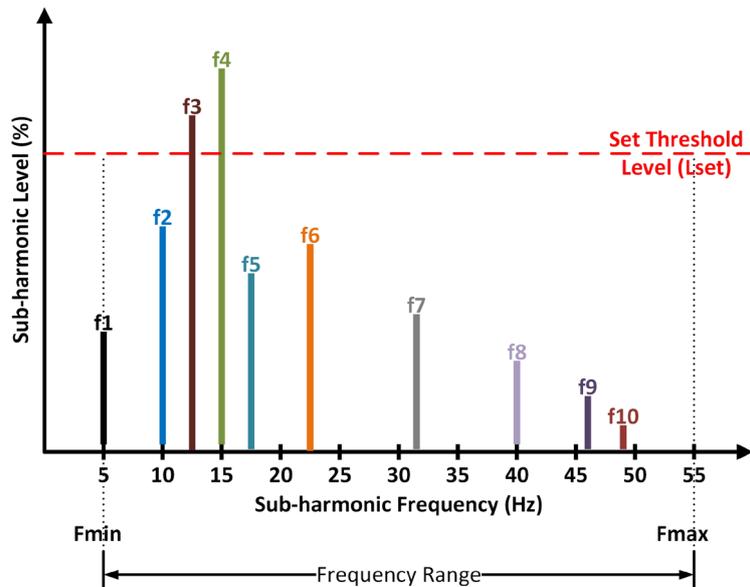


Рис. 3. Уровни субгармоник для расчета Номинального и Фундаментального коэффициента амплитуд для системы 60 Гц

**Полный коэффициент субгармонических искажений**

[3] Детектор полного коэффициента субгармонических искажений (TSHD) рассчитывает уровень искажения следующим образом:

$$TSHD(\%) = \frac{\sqrt{f_{5Hz}^2 + f_{6Hz}^2 + f_{7Hz}^2 + \dots + f_{55Hz}^2}}{f_{60Hz}^3}$$

[3] Обратите внимание, что в уравнении выше при расчете TSHD по напряжению или току основной частоты (60 Гц) либо по виртуальному выделенному каналу учитываются все амплитуды субгармоник в диапазоне 5–45 Гц для систем 50 Гц или 5–55 Гц для систем 60 Гц. Это же применимо к системам 50 Гц.

При тестировании этой функции следует убедиться, что реле правильно

рассчитывает TSHD и срабатывает при превышении уставки с заданной точностью.

**Событий в минуту**

[3] Эта функция подсчитывает количество субгармонических колебаний, превышающих заданное пороговое значение, продолжительность которых меньше указанного времени задержки. Обычными детекторами такие колебания не регистрируются. Периодическое возникновение таких колебаний (даже если их продолжительность меньше заданного времени задержки) может отрицательно повлиять на сеть и компоненты энергосистемы, например крупногабаритные тепловые или ветровые генераторы. Для обнаружения этих событий был разработан специальный детектор количества событий в минуту. Принцип его работы показан на рис. 4.

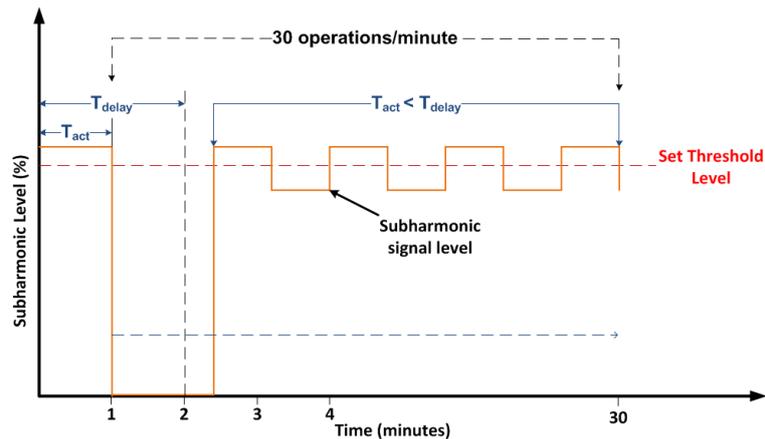


Рис. 4. Принцип работы детектора количества событий в минуту

[3] В примере выше показан случай с 30 событиями в минуту (без соблюдения масштаба). Время  $T_{act}$  соответствует фактической продолжительности изучаемого субгармонического сигнала. Типовые детекторы, описанные в предыдущем разделе, не могут выявить это событие, так как значение временной задержки на срабатывание ( $T_{delay}$ ) не превышает. В данном случае все 30 событий (превышение установленного порога) регистрируются и подсчитываются. Если их количество в минуту превышает расчетное значение, этот специальный детектор подает сигнал тревоги или команду на отключение в зависимости от конфигурации. Таким образом можно фиксировать периодические возмущения, продолжительность которых меньше установленного порогового значения.

При тестировании этой функции следует убедиться, что реле точно измеряет продолжительность каждого случая, регистрирует каждое событие длительностью меньше значения временной задержки ( $T_{delay}$ ) и точно подсчитывает количество таких кратковременных инцидентов.

### **Блокировка по второй и пятой гармоникам**

Поскольку реле подвергается воздействию переходных процессов, в т. ч. действию пусковых токов намагничивания трансформаторов или фидеров, или токов перевозбуждения первичных обмоток трансформаторов, реле измеряет содержание второй и пятой гармоники в токе и блокирует срабатывание, тем самым исключая излишнее отключение (пусковой ток может содержать существенную составляющую второй гармоники, а ток перевозбуждения — составляющую пятой гармоники).

Тестируя эти функции, следует убедиться, что реле правильно вычлняет вторую и пятую гармоники из токового сигнала (которые также могут содержать субгармоники) и правильно блокирует отключение, когда содержание второй и пятой гармоник превышает установленное пороговое значение.

### **Тестирование функций реле**

#### **Настройка испытания**

На рис. 5 показана конфигурация оборудования для тестирования.

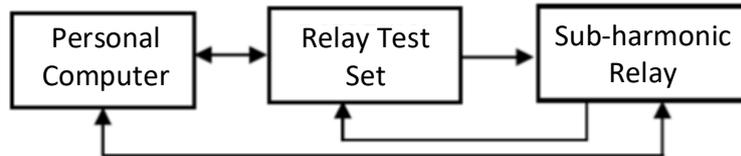


Рис. 5. Конфигурация оборудования для тестирования

Система тестирования реле должна обладать функцией генерирования различных субгармонических сигналов, наложенных на основную частоту. Это позволяет проверить работу реле и правильность его настроек.

### **Тестирование границ диапазона и значения срабатывания**

Чтобы настроить параметры детекторов субгармоник (напряжения и тока), устанавливается диапазон частот субгармоник в разделе Minimum Frequency (Минимальная частота) и Maximum Frequency (Максимальная частота). Значения минимальной и максимальной частоты используются функциями Nominal Ratio (Номинальный коэффициент), Fundamental Ratio (Фундаментальный коэффициент) и связанными с ними элементами. Для каждого элемента можно отдельно установить пороговые значения двумя разными способами: (а) С помощью параметра Nominal Ratio. Уставка определяется соотношением амплитуды субгармоники и амплитуды номинальных величин. (б) С помощью параметра Fundamental Ratio. Уставка определяется соотношением амплитуд субгармоники и амплитуд напряжения и тока основной гармоники.

Для срабатывания функций Nominal Ratio и Fundamental Ratio должны выполняться два условия: коэффициент амплитуды субгармоники должен превышать значение уставки, а частота субгармоники должна находиться в заданном диапазоне.

Для тестирования границ частотного диапазона и порогового значения срабатывания реле используется программное обеспечение, позволяющее

изменять значения напряжения и тока на частотах определенных субгармоник. При выполнении теста, описанного ниже, был установлен частотный диапазон от 5 до 45 Гц, а пороговое значение тока для срабатывания реле равно 100 мА.

На Figure 6 показан снимок экрана тестового модуля, настроенного для выполнения этого теста. Весь цикл испытаний был выполнен при номинальном напряжении и токе нагрузки 2,5 А на каждой фазе на номинальной частоте (см. {1} на Figure 6). Для моделирования условий испытания было создано пять участков с линейно изменяемыми сигналами.

- ЛИС 1. Это состояние позволяет проверить несрабатывание реле, если значение частоты субгармоники меньше нижней границы диапазона частот. На сигнал накладывается ток с частотой субгармоники 4 Гц и амплитудой, превышающей пороговое значения срабатывания реле (см. {2}). Во временном представлении сигналов (см. {3}) можно убедиться, что реле не срабатывает.
- ЛИС 2. Проверка срабатывания реле при обнаружении значительного содержания субгармоник в заданном диапазоне. Амплитуда тока на частоте 5 Гц растет до срабатывания реле. Длительность шага прироста составляет 5 секунд. Это больше времени задержки срабатывания реле. В окне оценки (см. {4}) показано, что реле срабатывает при измеренном значении 102 мА.
- ЛИС 3. Аналогично ЛИС 1, но в этом случае используется субгармоника с частотой 46 Гц.

Поскольку эта частота лежит за пределами заданного диапазона, реле не срабатывает.

- ЛИС 4. Аналогично ЛИС 2, но в этом случае используется субгармоника с частотой 45 Гц. В окне оценки (см. {4}) показано, что реле срабатывает при достижении амплитудой тока значения 102 мА.

- ЛИС 5. Используется сигнал только на номинальной частоте. Реле возвращается в исходное состояние.

Эту же процедуру можно повторить для проверки границ диапазона частот и значения срабатывания детектора напряжения (если он включен).

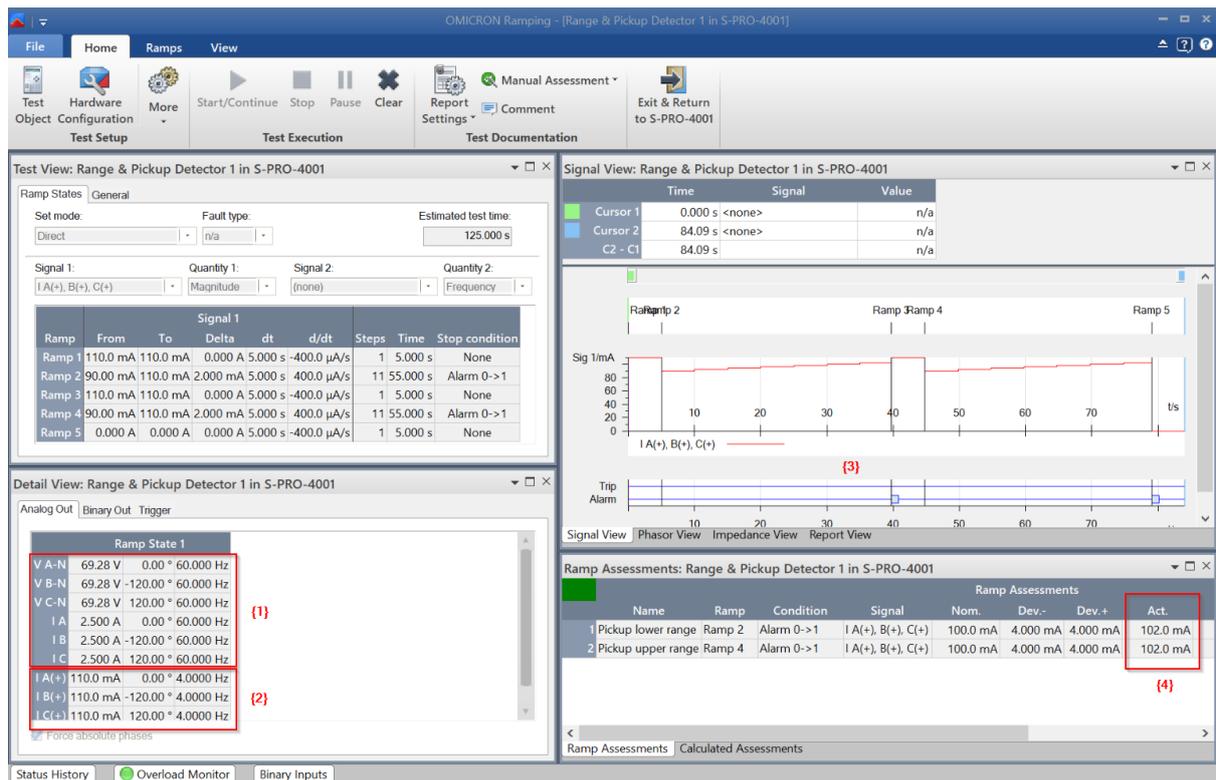


Рис. 6. Конфигурация испытания границ диапазона частот и значений срабатывания

### Тестирование функции полного коэффициента субгармонических искажений (TSHD)

Пороговое значение для полного коэффициента субгармонических искажений (TSHD) определяется отношением суммы всех амплитуд в диапазоне 5–45 Гц для систем 50 Гц (или 5–55 Гц для систем 60 Гц) к амплитуде основной компоненты. Для срабатывания функции TSHD сумма всех амплитуд субгармоник должна превышать пороговые значения TSHD (для этого испытания установлено значение 5 %).

Для выполнения этого испытания

использовались номинальное напряжение и сила тока в 1 А на номинальной частоте. К токовым сигналам были добавлены субгармонические частоты (5, 25 и 45 Гц). Были смоделированы два сигнала со следующими параметрами субгармоник:

- Полный коэффициент гармонических искажений 6,93 % — для подтверждения того, что реле срабатывает, если превышено установленное пороговое значение (Figure 7).
- Полный коэффициент гармонических искажений 4,92 % — для подтверждения того, что реле не

сработает, если значение ниже установленного порогового значения.

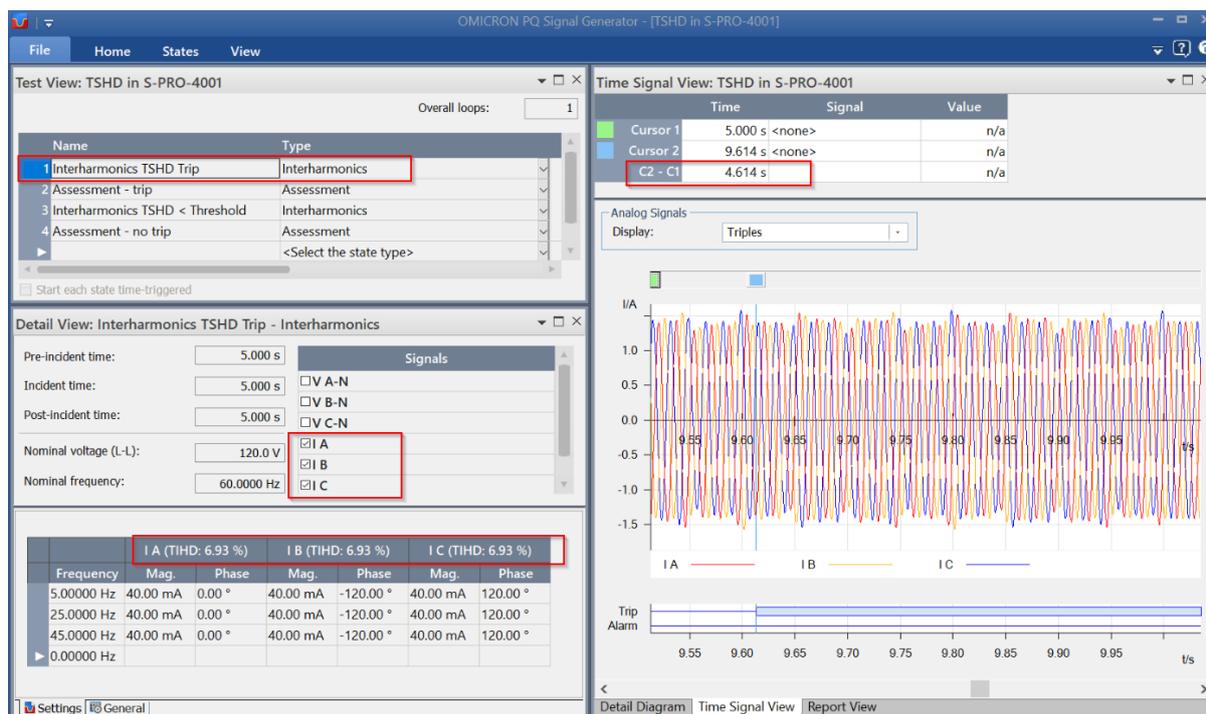


Рис. 7. Токковый сигнал, используемый для проверки срабатывания реле по полному коэффициенту субгармонических искажений (TSHD)

### Тестирование функции подсчета событий за заданное время

Для настройки функции Operations/Duration (Событий за время) для напряжения и тока задаётся количество событий за определенный интервал (в минутах). Событие — это пуск любого из элементов Nominal Ratio, Fundamental Ratio или TSHD, если его продолжительность не превышает значения задержки на срабатывания реле S-PRO. Функция Operations/Duration (Событий за время) доступна только в том случае, если активирован один из связанных элементов обнаружения субгармоник.

Для срабатывания элемента Operations/Duration (Событий за время) количество событий в минуту должно превышать заданное пороговое значение.

На Figure 8 показана конфигурация

для этого испытания. На сигнал наложена амплитуда субгармоники с частотой 25 Гц, которая превышает значение срабатывания реле, но длится лишь 3 секунды, что меньше, чем заданная задержка срабатывания 4 секунды.

Испытательное оборудование позволяет повторять один и тот же сигнал, задав параметр No. of loops (К-во циклов), как показано на Figure 8. Элемент был установлен на 25 событий за 2 минуты, поэтому для сигнала было задано 25 циклов. Так как каждый цикл длится 4 секунды (1 секунда до события и 3 секунды события), общее время теста составляет приблизительно 1 минуту 40 секунд. После 25-го цикла должно сработать реле. На Figure 9 показан протокол испытания, где видно, что испытательный комплект зафиксировал срабатывание реле по завершении 25-го события за 2 минуты.

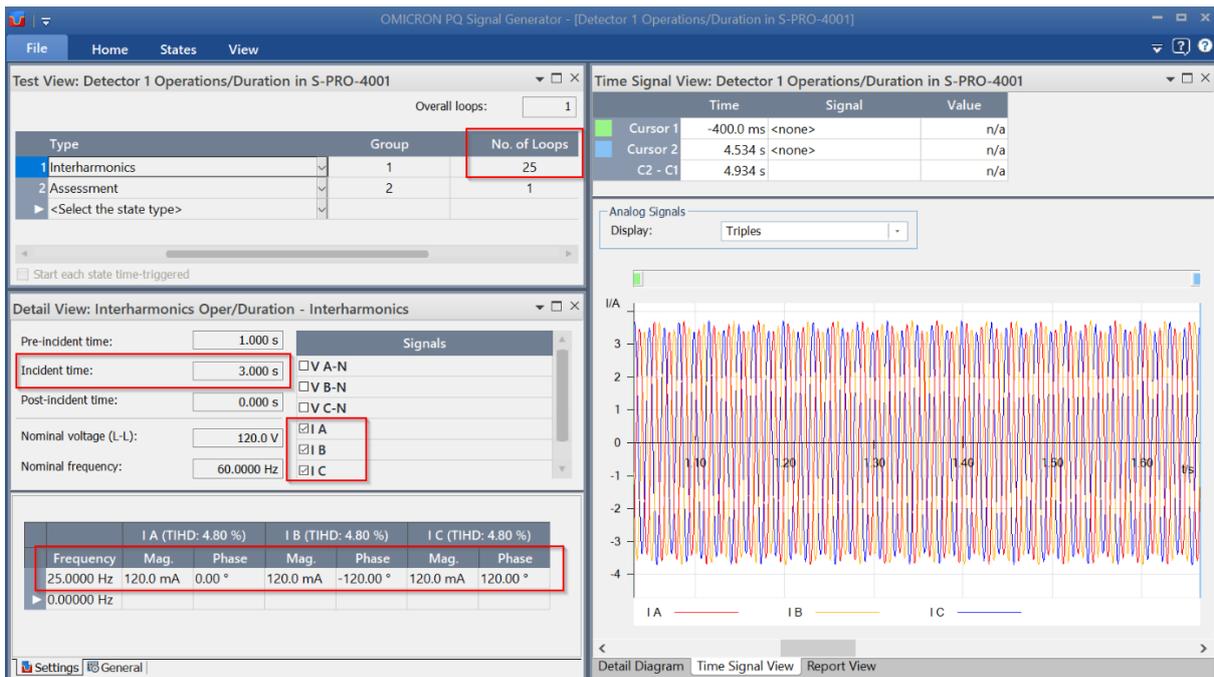


Рис. 8. Сигнал, используемый для испытания функции Событий в минуту

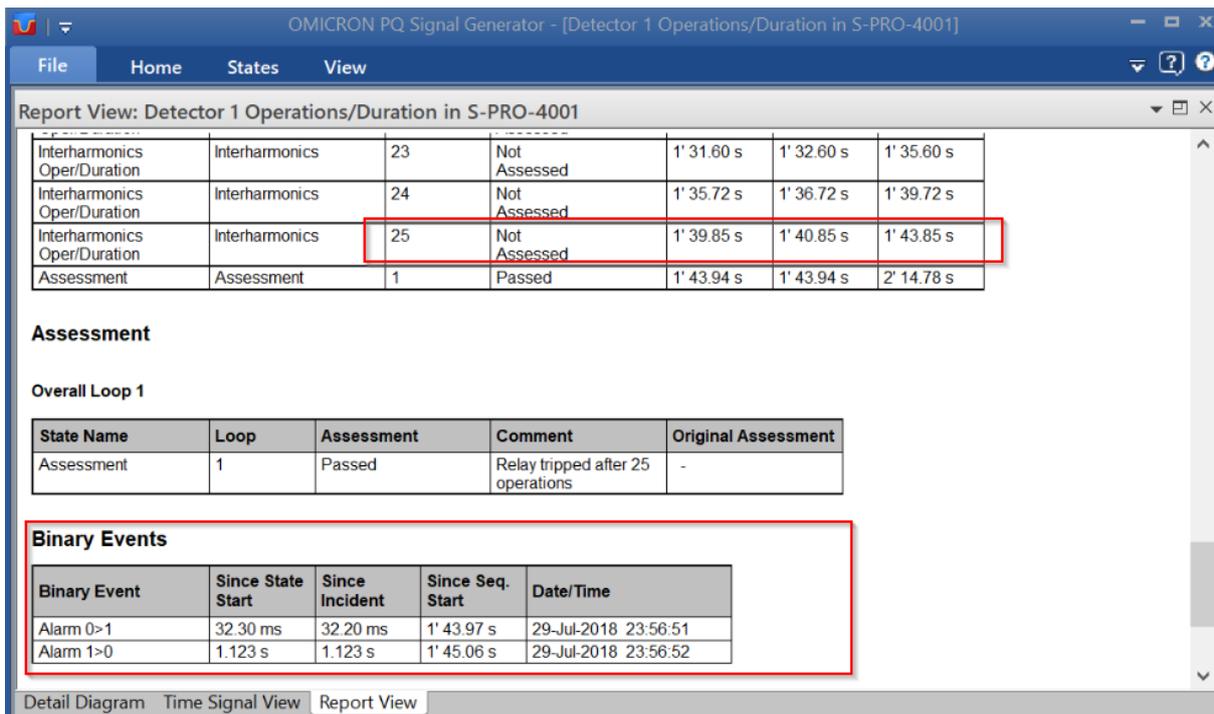


Рис. 9. Протокол испытания функции подсчета количества инцидентов в минуту с регистрацией бинарного события

### Испытание функции задержки срабатывания

Для проверки времени задержки срабатывания реле создается сигнал с основной и субгармонической компонентами на частоте 25 Гц.

Содержание основной и субгармонической составляющих в токе является фиксированным, а их амплитуды достаточны для срабатывания детекторов субгармоник S-PRO. Время задержки срабатывания реле можно увидеть на осциллограмме в виде бинарного события,

как показано на Figure 10.

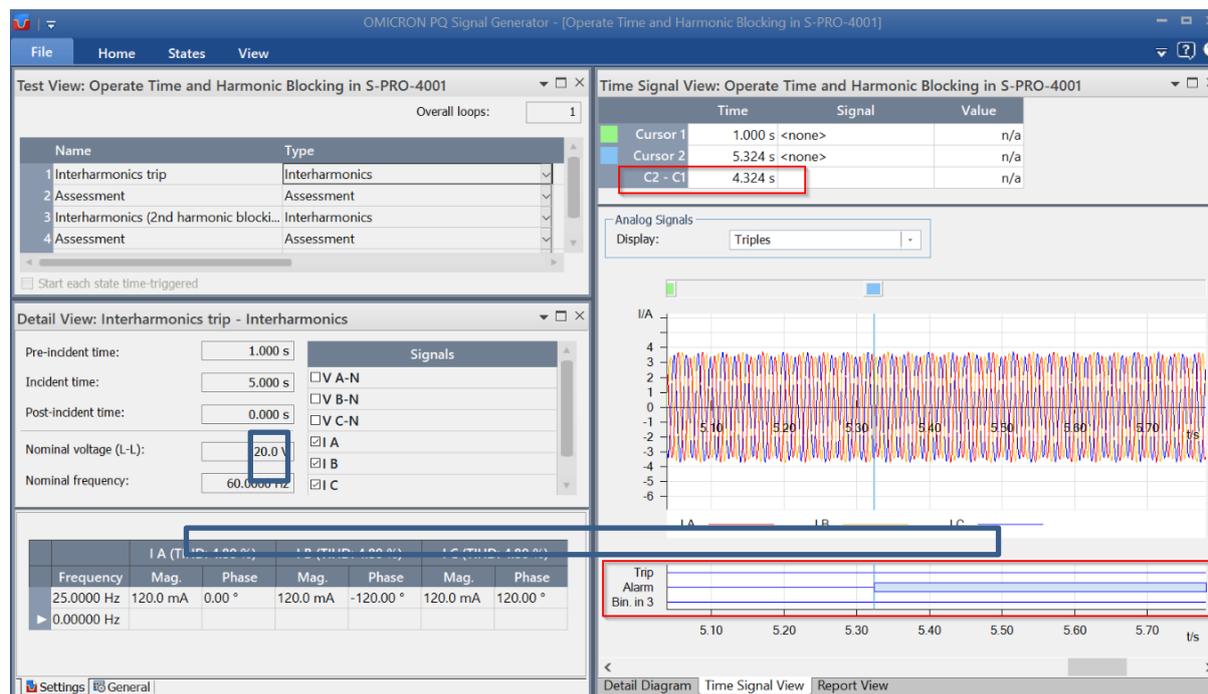


Рис. 10. Испытание времени задержки срабатывания

### Тестирование блокировки по второй гармонике

При тестировании функции блокировки по второй и пятой гармоникам (только для тока) отдельно определяются отношения пороговых значений амплитуды компоненты второй или пятой гармоники к амплитуде номинального тока в 5 А или 1 А.

Для блокирования детектора субгармоник S-PRO элементом «Блокировка по второй гармонике» или «Блокировка по пятой гармонике» отношение амплитуды токовой компоненты второй и/или пятой гармоники и амплитуды номинального

тока должно превышать соответствующее значение уставки.

Это испытание выполняется аналогично проверке времени задержки срабатывания, показанной на Figure 10. Однако теперь к сигналу добавляется компонента второй гармоники, как показано на Figure 11. Заданное значение амплитуды второй гармоники превышает пороговое значение функции блокировки по второй гармонике, которая блокирует срабатывание детектора субгармоник.

Функция блокировки по пятой гармонике тестируется точно так же, как функция блокировки по второй гармонике.

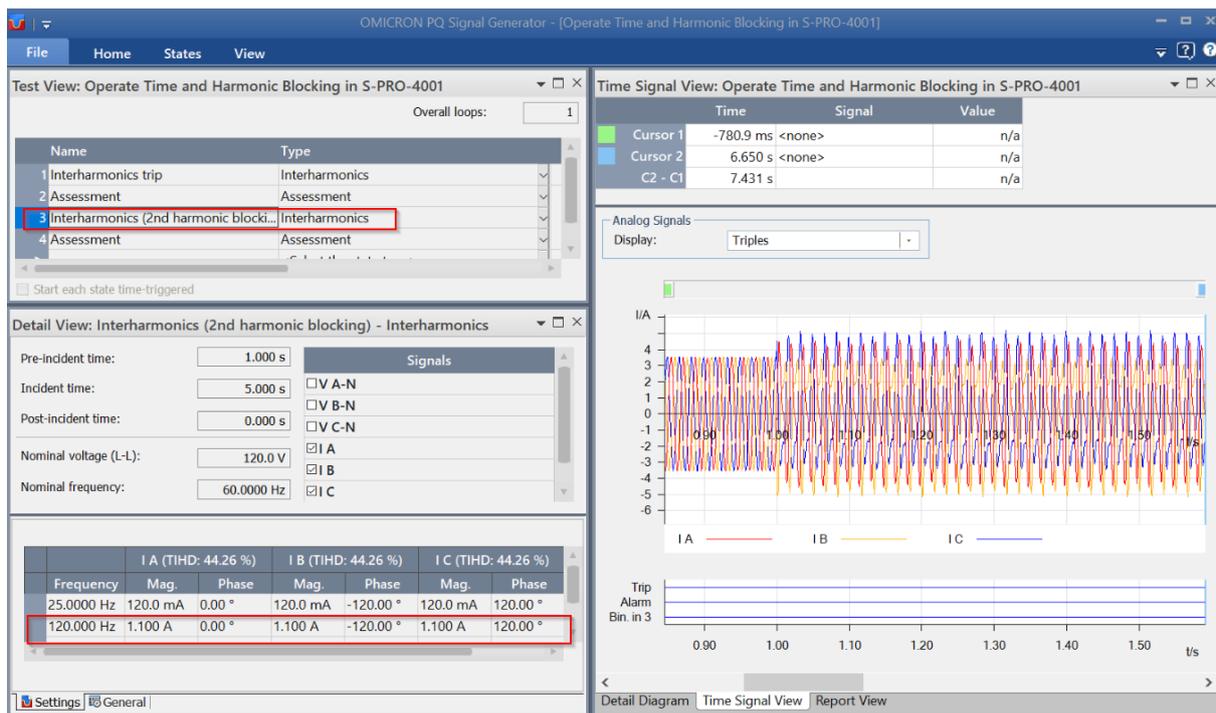


Рис. 11. Сигнал тестирования функции блокировки по второй гармонике

## Заключение

В данной статье описана процедура испытания реле защиты от субгармоник при его вводе в эксплуатацию с помощью комплексной системы тестирования реле, способной генерировать необходимые сигналы для соответствующих имитационных испытаний.

В частности, приведено подробное описание процедуры испытания, а также примеры типовых сигналов, используемых для тестирования каждой функции.

Важно отметить, что реле защиты от субгармоник нельзя проверить путем простой подачи тока и напряжения, поскольку для каждого испытания требуется определенная комбинация основной гармоники и субгармоник.

В документе приведена процедура испытания детекторов тока или напряжения по таким параметрам обнаружения субгармоник:

- Доступный диапазон частот: 5–55 Гц

- Значение срабатывания по уровню субгармоники
  - Номинальный коэффициент (Nominal Ratio)
  - Фундаментальный коэффициент (Fundamental Ratio)
- Задержка срабатывания
- Полный коэффициент субгармонических искажений
- Событий в минуту
- Блокировка по второй гармонике
- Блокировка по пятой гармонике

## 1. ЛИТЕРАТУРА

- [1] «Sub-Synchronous Control Interactions between Type 3 Wind Turbines and Series Compensated AC Transmission Systems», Andrew L. Isaacs, *Member, IEEE*, Garth D. Irwin, *Member, IEEE* and Amit K. Jindal, *Member, IEEE*

- [2] «Reader's Guide to Sub-Synchronous Resonance» and IEEE Committee Report by Sub-Synchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee, Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992
- [3] «A Microprocessor-Based Sub-Harmonic Protection Technique for Wind Farms», Krish Narendra, Dave Fedirchuk, Adi Mulawarman, Pratap Mysore, IEEE EPEC Conference 2011
- [4] «New Microprocessor Based Relay to Monitor and Protect Power Systems against Sub-Harmonics», K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, N. Zhang, A. Mulawarman, P. Mysore, V. Sood., IEEE EPEC Conference 2011
- [5] «Performance Evaluation of a Sub-Harmonic Protection Relay Using Practical Waveforms» N. Perera, K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, V. Sood, IEEE EPEC Conference 2012
- [6] «Sub-harmonic protection application for interconnections of series compensated lines and wind farms», René Midence, Joe Perez, P.E., Adi Mulawarman, Western Protection Relay Conference 2012, Pullman, Washington.

OMICRON — ведущий мировой производитель высокотехнологичного испытательного и диагностического оборудования для предприятий электроэнергетической отрасли. Устройства OMICRON позволяют с высокой точностью оценивать состояние первичного и вторичного оборудования энергосистем. Компания также предоставляет услуги по вводу устройств в эксплуатацию, тестированию и диагностике оборудования, консультированию и обучению персонала.

Клиенты из более чем 160 стран доверяют опыту компании OMICRON, используя высококачественное передовое оборудование ее производства. Сервисные центры компании расположены по всему миру, что позволило создать обширную базу знаний и обеспечить всестороннюю поддержку клиентов. Благодаря всем этим преимуществам, а также развитой дистрибьюторской сети компания прочно занимает лидирующие позиции в области электроэнергетики.

Посетите наш веб-сайт, чтобы  
узнать больше о компании и  
получить контактную информацию  
по региональным офисам.