



PS5 – S2-01



Функциональное тестирование схем противоаварийной автоматики

А. АПОСТОЛОВ, Б. ВАНДИВЕР
OMICRON electronics
США

Alexander.Apostolov@omicronusa.com

1 ВВЕДЕНИЕ

Системы противоаварийной автоматики (ПАА) играют очень важную роль в обеспечении стабильности энергосистем. Это сложные иерархические системы, которые покрывают большие географические районы и имеют высокоскоростные каналы связи между многофункциональными Интеллектуальными Электронными Устройствами (IEDs), которые выполняют различные функции в пределах систем ПА.

Несрабатывание ПА или её ложное срабатывание в не критичном режиме энергосистемы может привести к нестабильной работе всей энергосистемы, а также к ложным отключениям нагрузки. В обоих случаях возможны большие материальные потери. Именно поэтому очень важно обеспечить правильную работу устройств ПА с помощью необходимых методик проверок и тестирования.

Для тестирования систем защиты и контроля наиболее широко распространены методы функционального и прикладного тестирования, которые должны гарантировать правильную работу устройств ПА при различных режимах энергосистемы. Для интеграции различных многофункциональных устройств ПА требуется применение стандартного протокола, который отвечает требованиям высокой скорости и надежности, которые необходимы для функций защиты по ГВС. Предположение, что в начале процесса тестирования ПА все устройства поддерживают выбранный протокол обмена данными и могут взаимодействовать друг с другом в случае использования устройств различных производителей. В докладе подробно рассматриваются требования для функционального тестирования устройств и функций ПА. Методы тестирования обоих типов систем предлагают основываться на следующем порядке испытаний компонентов системы:

- Функциональное тестирование отдельных IEDs, используемых в системе
- Функциональное тестирование функций ПА в пределах подстанции
- Функциональное тестирование функций ПА между подстанциями
- Функциональное тестирование ПА в полной схеме
- Тестирование между устройствами ПА

Методы тестирования компонентов системы, так же как и для всей системы в целом:

- Тестирование "черного ящика"
- Тестирование методом прозрачного ящика
- Восходящее тестирование
- Нисходящее тестирование

В статье описано применение каждого метода для различных типов тестов. Обсуждаются требования для конфигурации, мониторинга и отчета по тестированиям сложных систем ПА. Решения для тестирования отдельных устройств, так же как и для тестирования распределенных приложений описаны более подробно. Во время обслуживания ПА важно

гарантировать, что не будет ложного срабатывания ПА при сбое какого-нибудь компонента системы.

В статье описываются требования, методы и действия для обнаружения таких проблем и их предотвращения.

2 СХЕМЫ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ (ПА)

Схемы ПА это распределённые приложения, основанные на обмене информацией и контроле сигналов между интеллектуальными электронными устройствами, расположенными на различных подстанциях.

ПА играет очень важную роль в поддержании стабильности энергосистемы с помощью автоматической разгрузки и отключения генераторов. Поэтому очень важно проверять их до ввода в эксплуатацию.

ПА можно описать как систему, имеющую 3 типа функциональных элементов:

- Элементы системного контроля
- Элементы защиты
- Исполнительный орган

К функциям элемента системного контроля относятся:

- Определение изменений в топологии энергосистемы
- Определение изменений в нагрузке системы
- Определение изменений в энергосистеме

Функция ПА заключается в определении влияния любого из вышеуказанных изменений на стабильность энергосистемы. Если есть вероятность местных или глобальных повреждений, она должна сработать и послать сигналы чтобы предотвратить повреждение или уменьшить эффект от повреждения.

Функция элементов выполнения должна получать сигналы от системы защиты и выполнять необходимые действия.

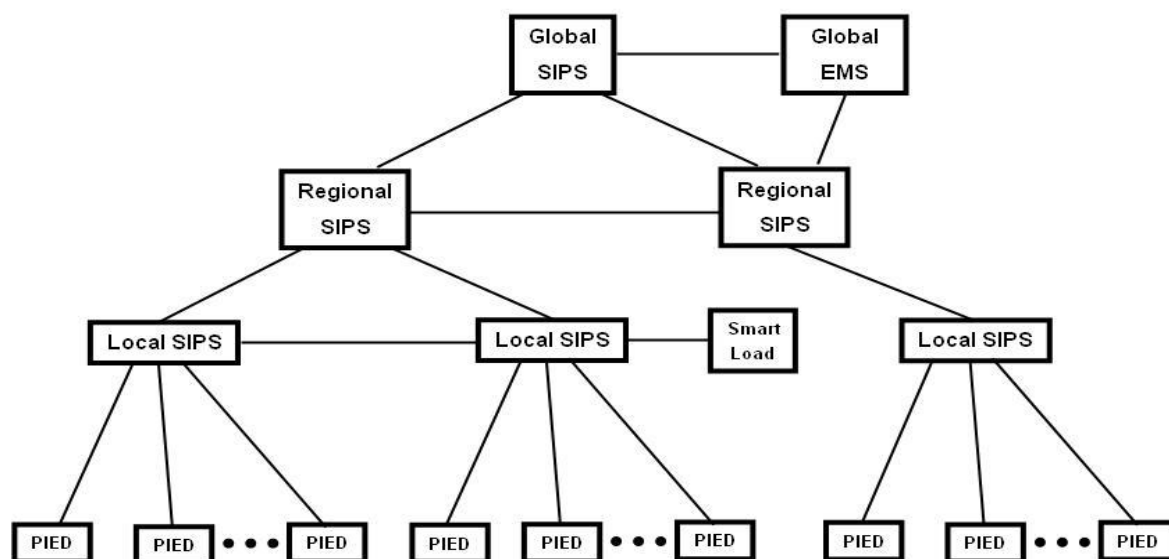


Рис. 1: Упрощенная блок-схема иерархической структуры ПА

Структуры системы ПА может быть простой и сложной с различным числом уровней в иерархии в зависимости от сложности системы. На рисунке 1 изображена многоуровневая структура системы ПА, в которой используется многофункциональная защита IEDs в качестве устройств на уровнях контроля и выполнения системы.

Как видно из рисунка 1, в структуре система ПА используются различные типы связей:

- Между многофункциональными IEDs на нижнем уровне иерархии и уровнем ПС (Местное устройство ПА)
- Между устройствами ПА на одном уровне

- Между разными уровнями устройств ПА
- Между устройствами ПА и нагрузкой

Все вышеупомянутые интерфейсы связи могут основываться на различных протоколах и использовать различные типы линий связи. IEC 61850 играет все более важную роль в результате влияния сообщений высокоскоростной передачи между равноправными узлами на выполнение различных функциональных элементов схемы.

Функции мониторинга основаны на:

- Измерении тока, напряжения, активной и реактивной мощности
- Измерении фаз
- Контроле состояния выключателей линий, трансформаторов и генераторов.

Исполнительный орган управляет выключателем для уменьшения нагрузки. Также можно уменьшить выходную мощность генератора или отключить его полностью.

3 ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПА

Функциональное тестирование – наиболее распространенный метод тестирования для систем защиты и контроля и очень важно, что ПА и все ее устройства будут работать правильно при различных системных условиях.

Для многих организаций до сих пор является проблемой определить, какие устройства в сложной системе были проверены и затраты времени, необходимые для обеспечения качества функционального тестирования становятся одной из самых больших проблем в правильной работе ПА.

С функциональным тестированием технический, пусконаладочный и ремонтный персонал переводят функциональные требования в совокупность тестовых данных, которые подтверждают, насколько ПА удовлетворяет требованиям системы при любых системных условиях в любой момент времени. План испытания должен быть разбит на набор тестов определения и проверки функциональных требований, обеспечивая быструю и объективную оценку выполнения проверенной функциональности. Эти испытания можно выполнять регулярно, чтобы убедиться в том, что функциональные изменения или обновление ПО не привели к изменению ранее проверенной функциональности.

Эффективная практика функционального тестирования включает в себя определение рекомендаций для эффективного использования технологий функционального тестирования, и затем реализацию и интеграцию этих инструкций в системе управления.

Для достижения эффективного контроля системы пользователь или производитель должен иметь не только определенную практику его использования, но также эта практика должна быть реализована и интегрирована в технологический процесс для последовательного и регулярного использования на предприятии. Определение функциональных тестов должно быть частью проектировки ПА. Когда определена функциональность каждого устройства ПА, необходимо определить, как проверить эти устройства.

В следующих разделах обсуждаются различные методы функционального тестирования ПА и ее устройств. Они включают некоторые определения типов и методов, которые используются для функционального и прикладного тестирования. Во время проверки сложных систем ПА, очевидно, что нужно использовать методы и программные средства для Контроля Системы.

Контроль системы проводится на полной, интегрированной системе для оценки соответствия системы указанным требованиям.

Как правило, системное тестирование включает все «интегрированные» элементы, которые успешно прошли проверку взаимодействия между собой и систему самого ПО, включающую любую доступную систему аппаратных средств.

Системное тестирование выполняется в соответствии с техническими требованиями к работоспособности и/или техническими требованиями к системе. Кроме того, системное тестирование это исследовательский этап испытания, который проверяет не только описание, но поведение и ожидаемый результат ПА.

4 МЕТОДЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕСТИРОВАНИЯ

Методы функционального тестирования можно разделить на несколько категорий. Это зависит от сложности функционального исполнения устройств, используемых на различных уровнях иерархической структуры системы.

Можно выделить наиболее используемые методы тестирования:

- Тестирование функциональных элементов
- Проверка взаимодействия и функционирования компонентов системы
- Функциональное тестирование
- Системное тестирование

В этом случае, функцию можно рассмотреть как подсистему с различными уровнями сложности. Например, функция контроля системы, где система – резервное устройство ПА.

Независимо от того, что проверяется, объект испытания должен отвечать требованиям тестируемости. Это особенность схемы, которая позволяет четко определить состояние системы (работоспособное, неработоспособное или ухудшение состояния) или любой подсистемы. Тестируемость определяет те свойства системного проектирования, которые способствуют выявлению и устранению ошибок вследствие влияния исполнения системы. С точки зрения тестируемости, функциональное устройство ПА – устройство, которое можно проверить, потому что это самая маленькая часть ПА, которая может существовать отдельно и обмениваться информацией с устройствами того же уровня.

С другой стороны это цель испытания и необходимо уточнить выполнены ли тесты по отношению одобрения нового продукта или функции, которые будут использоваться в качестве контроля системы или контроллера технологического процесса (или и то, и другое), разработки и ввода в эксплуатацию устройств ПС или «ПА в полной схеме» или ее обслуживание. С этой точки зрения различные методы тестирования можно применять даже для тестирования одного и того же функционального устройства или функции.

Например, тестирование функции контроля системы во время этапа приемки можно сфокусировать на определении характеристики измерительного элемента, используя методы поиска, с другой стороны, во время ввода в эксплуатацию, время срабатывания для различных системных условий важно для достижения

Сведения о поведении объекта испытания, в частности, логика или построение алгоритмов, задают алгоритм выполнения испытания. Наиболее используемые методы испытаний с этой точки зрения следующие:

- Тестирование «черного ящика»
- Тестирование методом прозрачного ящика

Важным аспектом в процессе тестирования является доступность резервированных устройств, выполняющих различные функции ПА.

В следующих разделах более подробно обсуждается вышеупомянутые методы.

4.1 Тестирование «черного ящика»

Тестирование «черного ящика» – наиболее используемый метод испытаний, в котором испытательный объект рассматривается как «черный ящик». Это значит, что нас не интересует внутренняя структура проверяемой функции.

В случае тестирования «черного ящика» испытательная система заинтересована только в определении состояний, при которых поведение испытательного объекта не соответствует техническим условиям. Данные испытаний получают исключительно из технических условий, не учитывая структуру функции.

Тестирование «черного ящика» обычно применяется для:

- тестирования функциональных устройств
- заводских испытаний ПА
- наладка ПА на объекте

Так как функциональные устройства заданы как единицы, которые могут существовать независимо и доступны для проверки, то очевидно, что тестирование «черного ящика» это единственный метод, который можно применить для их тестирования.

Реагирование проверяемого объекта на воздействия проверяется по коммуникационным сообщениям и отчетам.

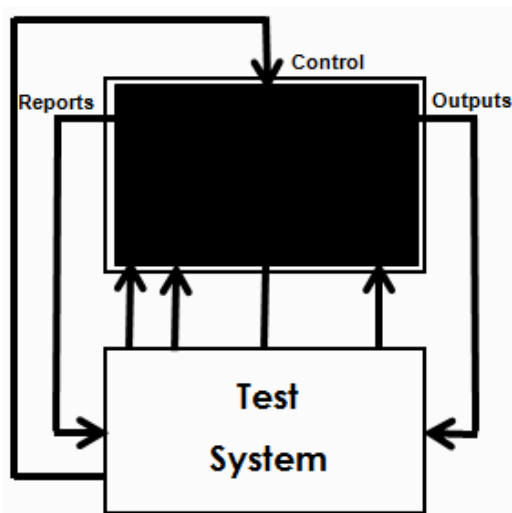


Рис. 2: Тестирование «черного ящика»

4.2 Тестирование методом прозрачного ящика

Тестирование методом прозрачного ящика – метод, в котором испытательная система учитывает не только поведение объекта испытания при условиях испытаний, но так же и рассматривается внутреннее поведение и структуру объекта испытания.

В случае ПА будет контролироваться не только действие системы в пределах функции, но так же и обмен сигналами между различными компонентами системы.

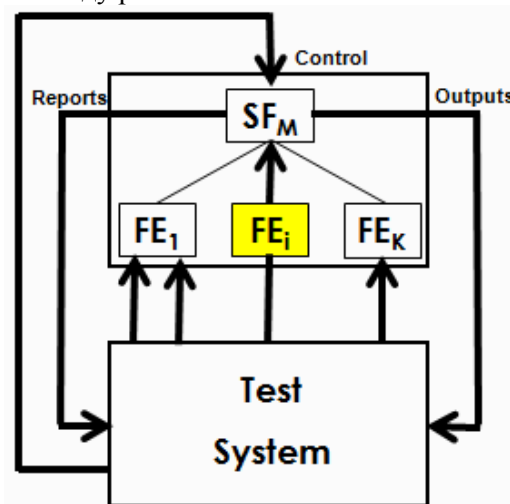


Рис. 3: Тестирование методом прозрачного ящика

Методика тестирования позволяет нам исследовать внутреннюю структуру объекта испытания. Это очень полезно при анализе поведения объекта испытания, особенно когда тест не пройден.

При использовании этой методики испытательная система берет данные испытаний, анализируя логику испытательного объекта, не пренебрегая техническими требованиями. Цель этого метода испытаний – достигнуть широких границ теста с помощью анализа действий различных компонентов сложной функции, обмена сигналами или сообщений между компонентами при заданных условиях испытаний.

Этот метод особенно полезен при проверке распределенных функций, основанных на различных интерфейсах. Анализ поведения подфункции или функциональных устройств осуществляется испытательной системой с помощью контроля обмена сообщений между компонентами объекта испытаний.

Методика испытания, тем не менее, не должна отличаться от методики, используемой при методе тестирования «черного ящика».

4.3 Нисходящее тестирование

Нисходящее тестирование – метод, который широко применяется для ПА, особенно при наладке на объекте, когда можно предположить, что все устройства уже сконфигурированы и проверены.

Нисходящее тестирование можно выполнить, используя и методы «черного ящика» и прозрачного ящика.

Тестирование начинается с полной системы, сопровождается тестирование функции или подфункции и в случае необходимости функциональным тестированием устройства.

В случае ПСИ, если не все компоненты системы или подсистемы доступны, необходимо смоделировать их действие при условиях, заданной методикой. В этом случае, испытательная система создает так называемые «Заглушки» для функций или функциональных устройств, которые пока еще не доступны.

Нисходящее тестирование вызывает повторное испытание устройств высшего уровня, когда добавляются устройства на нижнем уровне. Добавление новых устройств один за другим не должно быть слишком буквальным. Иногда набор устройств добавляется одновременно, и тогда весь набор устройств будет служить средством тестирования для каждого испытания функционального устройства.

Каждое функциональное устройство проверяется согласно методике испытания с помощью нисходящего тестирования.

«Заглушки» - модуль, который модулирует действие модуля, вызываемого в процессе испытания. Заглушку можно заменить реальным модулем.

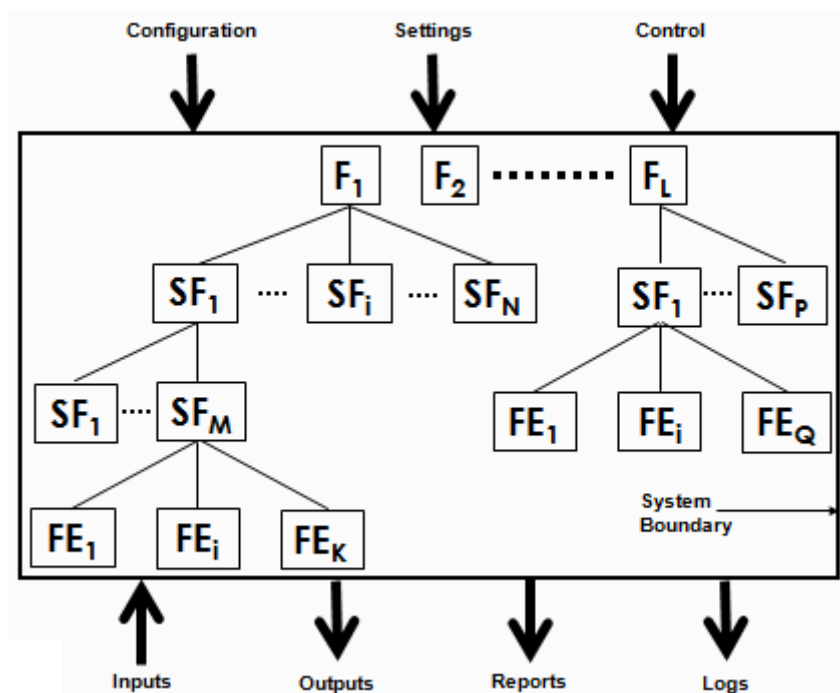


Рис. 4: Нисходящее тестирование функции системного контроля

Если рассматривать реализацию ПА в соответствии с протоколом МЭК 61850 для проверки, используя нисходящее тестирование, то нужно начать с определения границ функции.

Тестирование отдельных устройств функции системного контроля может потребоваться при отказе определенного теста, рис. 4. Границы функции для каждого из этих испытаний разные и требуют различного набора воздействий от испытательной системы, так же как и для контроля поведения функциональных устройств, используя различные сигналы или сообщения.

Например, если тест на выявление изменения состояния проверяемой линии выполнен неуспешно, и далее выполняемое нисходящее тестирование (рис. 4) тоже выполнен неуспешно, то вероятно, что необходимо будет выполнить тесты внизу иерархической структуры, включая тестирование функциональных устройств функции контроля линии, таких как измерение

линейного тока и активной мощности, представленной логическими узлами MMXU или логическим узлом линии передачи ZLIN.

4.4 Восходящее тестирование

Восходящее тестирование – метод, при котором тестирование начинается с функций более низкого уровня, как правило, с функциональных устройств системы, например, MMXU или ZLIN.

Этот метод наиболее подходит для типовых испытаний на заводе-изготовителе или приемосдаточных испытаний.

Испытательная система должна смоделировать действие любого недостающего компонента системы, например при приемосдаточных испытаниях.

Есть много сходства в методиках нисходящего подхода и восходящего. Основное отличие это последовательность выполняемых тестов и их число.

4.5 Регрессивное тестирование

Одна из характеристик современных многофункциональных подстанционных защит, устройств автоматики и контроля это непрерывное усовершенствование функциональных возможностей в соответствии с запросами пользователей и для устранения различных ошибок. При этом у пользователя возникает вопрос – что и как надо проверить, чтобы удостовериться, что измененное ПО готово к работе.

Тестирование, которое выполняется после функционального усовершенствования ПО называется регрессивное тестирование. Его задача определить, как влияют внесенные изменения на функциональность ПО. Как правило, необходимо полностью повторить функциональные тесты, если функциональный модуль был изменен, и дополнительные тесты, указывающие на исправленную ошибку, которые были добавлены к плану испытаний. Затем функциональное устройство будет восстановлено и повторно выполнена проверка взаимодействия и функционирования компонентов системы.

4.6 Приемосдаточные испытания

Процесс принятия любого нового продукта пользователем известен как приемосдаточное испытание. Цель испытания – проверить правильность работы отдельного устройства, которое будет использоваться для защиты подстанции, устройств автоматики и контроля.

Это осуществляется с помощью программных средств проверки системы при имитации режима работы подстанции, энергосистемы и условий рабочей среды.

Приемосдаточное испытание это входное условие для возможности использования продукта в ПА.

Приемосдаточные испытания выполняются с устройствами, которые выпускаются серийно.

В ПСИ применяется метод восходящего тестирования и включает проверку всех отдельных компонентов, функциональных устройств и функций в устройстве, которое предназначено для использования, как в настоящее время, так и в последующем. Его задача гарантировать, что устройство отвечает всем техническим требованиям, необходимым для пользователя.

При приемосдаточных испытаниях так же может потребоваться использование некоторых, определенных для пользователя, реальных осциллограмм аварийных режимов.

В зависимости от методики ПСИ и доступной испытательной аппаратуры, испытания так же могут охватывать различные климатические условия, включая и некоторые функциональные тесты при чрезвычайных условиях окружающей среды, определенных для территории пользователя.

Функциональная часть ПСИ должна основываться на ряде планов испытаний, которые настолько реально имитируют условия на ПС пользователя или условия энергосистемы, в которой будет работать проверяемое устройство.

Все IED устройства ПА должны пройти ПСИ. Можно использовать различные вышеуказанные методики.

4.7 Тест на совместимость устройств ПА между собой

Этот тест часть тестирования устройства, которое будет применяться в ПА. Это тест необходимо сделать прежде, чем устройства будет введено в эксплуатацию в ПА. Этот тест предназначен для проверки правильного поведения любого устройства в системе. По результатам теста можно определить работают ли устройства правильно между собой и могут ли использоваться в ПА.

Такие тесты должны быть ограничены имитацией, которая приведет к отправке и получению различных типов сообщений, необходимых для распределенных приложений между отдельными устройствами, таких как сообщения GOOSE в соответствии с IEC 61850.

Такой тест выполняется в лаборатории на этапе разработки устройств ПА для того, чтобы гарантировать, что все устройства используют одинаковый тип сообщений.

Тест на совместимость устройств является заключительным этапом утверждения устройств.

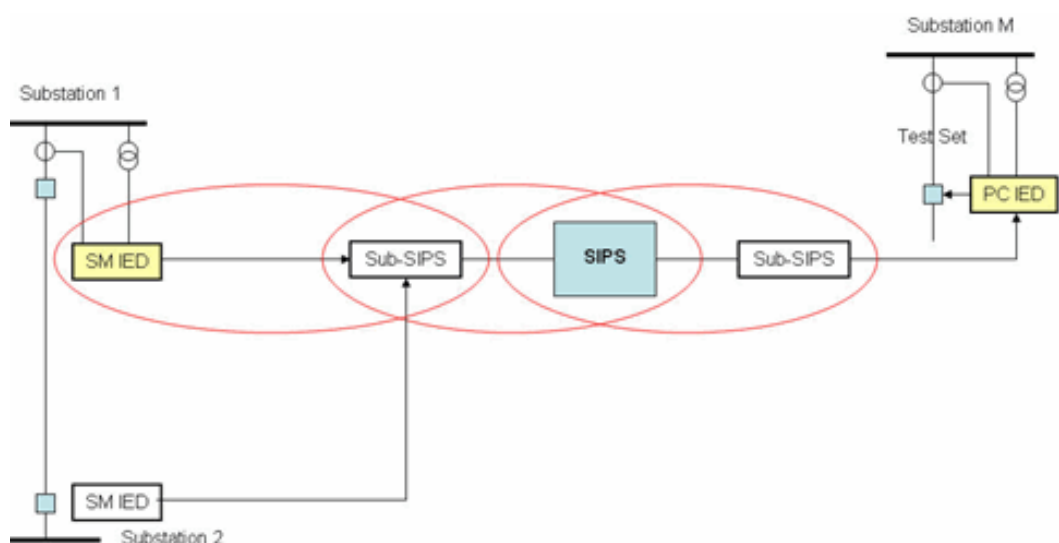


Рис. 5: Комплексное испытание

4.8 Комплексное испытание

Комплексное испытание необходимо для того, чтобы гарантировать, что отдельные компоненты системы не только правильно взаимодействуют между собой, но и отвечают всем требованиям спецификации систем ПА.

В этом случае, испытание будет включать тестирование устройств на обоих концах линии связи. Методы и инструменты, используемые для этого тестирования можно найти в разделе тестирование между устройствами и тестирование подсистем, описанные выше.

4.9 Заводские приемосдаточные испытания устройств ПА

Заводское испытание включает в себя функциональные тесты, специально предназначенные и выполненные для ПА, утвержденные пользователем. Это соглашение между конечным пользователем и поставщиком и настоятельно рекомендуется проводить эти испытания, так как они позволяют обнаружить любые потенциальные ошибки на раннем этапе проектирования, пока их дешевле и легче устранить.

Заводские испытания основаны на нисходящем методе тестирования, основанном на плане испытания, включая методику испытаний как часть проектирования системы.

Метод «черного ящика» можно применять до тех пор, пока не произойдет какая-либо ошибка системы для определенного теста. Затем применяется метод прозрачного ящика для определения причины ошибки теста.

Одна из главных особенностей заводских испытаний то, что испытание может проводиться, даже если нет какого-либо устройства системы. От испытательной системы требуется способность имитировать действие любого устройства, отсутствующего в системе, которое является частью реальной системы ПА.

Другой различающий фактор заключается в том, что все устройства системы сконфигурированы и установлены в соответствии с требованиями реальной системы.

Таким образом, заводские испытания должны основываться на конфигурации всех устройств, используя SCD файл для проекта.

4.10 Приемосдаточное испытание ПА

Приемосдаточное испытание ПА соответствует общим испытаниям на объекте подстанционных защит, устройств автоматизации и контроля, но включает полное тестирование ПА, которая находится в разных узлах. Это не только проверка всех данных, контрольных точек и правильного функционирования отдельных компонентов системы, но и связь между различными узлами. Наладка на объекте необходима для запуска ПА.

Приемосдаточное испытание ПА, подобно заводскому испытанию, включает в себя функциональные тесты специально разработанных подстанционных защит, устройств автоматизации и контроля, выполненных в полной системе аналогично установке на ПС.

Это так же договоренность между конечным пользователем и поставщиком по вопросам методики испытаний и обязанностей участвующих сторон.

Никаких конкретных руководящих указаний по методике приемосдаточных испытаний ПА нет. Развитие таких указаний будет иметь большую поддержку в области промышленности для того, чтобы гарантировать полноту процесса тестирования и уменьшить вероятность отказа системы при обслуживании.

При наладке на объекте применяется нисходящий подход, основанный на плане испытаний, включая методику испытаний, определенную как часть проектирования системы.

Метод «черного ящика» можно применять до тех пор, пока не произойдет какая-либо ошибка системы для определенного теста. Затем применяется метод прозрачного ящика для определения причины ошибки теста.

Одной из главных особенностей таких испытаний является доступность всех компонентов. В этом случае от испытательной системы требуется способность имитировать все необходимые аналоговые, двоичные или другие виды сигналов, требуемые для тестирования любых подстанций или условия энергосистемы, которые генерирует реальная система.

Таким образом, приемосдаточные испытания должны основываться на конфигурации всех устройств, используя SCD файл для проекта.

Заключительным этапом наладки ПА является проверка конфигурации связей между процессом и устройствами, входящими в подстанционную защиту, устройства автоматики и контроля.

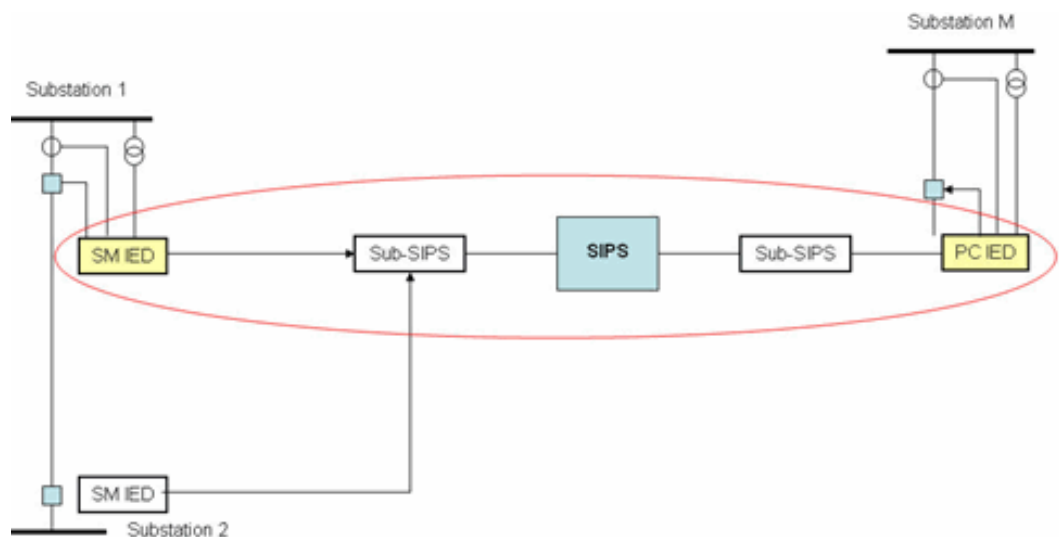


Рис. 6: Приемосдаточное испытание ПА

Сравнивая с заводскими испытаниями, которые выполняются вне места функционирования системы и должны контролировать выполнение системой всех требований по контракту между производителем и потребителем до отгрузки с завода, наладка включает в

себя завершение ввода в эксплуатацию и контроль за работой системы до начала работы на объекте.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования систем ПА необходимо отличное понимание функциональных возможностей и иерархической структуры системы.

Используются различные методы для проверки устройств системы, так же как и для систем с распределенными подфункциями и функциями.

Восходящее тестирование применяется на начальных стадиях разработки и исполнения системы и главным образом для устройств IED для контроля системы и процесса контроля уровнями системы.

Метод «черного ящика» и нисходящий метод можно использовать на этапах заводского тестирования и наладки на объекте.

Полное тестирование это заключительный этап тестирования системы ПА. Необходимо для разрешения ввода системы в эксплуатацию.