

# Подходы к построению надежной структуры цифровой подстанции

Цифровые подстанции обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями при построении вторичных систем, в частности, позволяют уменьшить количество кабельных линий, повысить помехозащищенность и пожаробезопасность энергообъекта, а также упростить обслуживание системы в целом. Но несмотря на все преимущества цифровых подстанций, массового перехода на использование этих технологий не происходит.

Среди причин этого:

- отсутствие общепромышленной нормативно-технической базы по разработке, проектированию и эксплуатации оборудования Цифровой подстанции, в том числе нет полного перевода стандарта МЭК 61850 на русский язык и его гармонизации среди российских стандартов;
- отсутствие специализированного инструментария для проектирования Цифровых подстанций и навыков по работе с ним проектных организаций;
- не решены вопросы метрологической аттестации вторичных систем с поддержкой МЭК 61850-9-2;
- не определены стратегические пути развития систем защиты и автоматизации, в том числе оптимальная структура и показатели надежности Цифровой подстанции в целом и структуры построения отдельных систем.

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Отличительной чертой цифровых подстанций является широкое применение сетевых технологий Ethernet для передачи информации между всеми интеллектуальными электронными устройствами, включая доставку критически важной аналоговой и дискретной информации до устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Поэтому, в отличие от традиционных подстанций, существенное влияние на надежность цифровых подстанций оказывает локальная вычислительная сеть. В свою очередь, на надежность сети влияют два фактора: структура (архитектура построения и методы резервирования) и надежность отдельных элементов сети.

Второй важный фактор надежности цифровых подстанций – надежность отдельных элементов. В первую очередь это относится к новым элементам: выносным УСО и цифровым трансформаторам тока и напряжения (оптическим и электронным). Традиционные интеллектуальные электронные устройства на подстанции – контроллеры АСУ ТП, РЗА, ПА, АИИС КУЭ и др., также претерпели существенные изменения как в части ввода исходных данных (прием GOOSE и SV), так и в части логической обработки. Необходимо учитывать задержки в передаче мгновенных значений тока и напряжения, задержки передачи GOOSE сообщений и ряд других проблем связанных с сетевой природой технологий цифровой подстанции.

Третий существенный фактор – надежность системы единого времени. Для цифровых подстанций надежность синхронизации является критически важной для работы части элементов (например, для цифровых трансформаторов тока и напряжения).

Четвертый немаловажный фактор – человеческий. Обеспечение функциональной надежности ложится как на производителей ИЭУ, в части создания универсальных и в то же время надежных устройств, так и на персонал, которому необходимо правильно осуществить настройку и эксплуатацию заложенного функционала. При переходе от традиционных подстанций к цифровым меняются подходы к проектированию, наладке и эксплуатации оборудования. Это сопряжено с необходимостью освоения новых инструментов и методов.

## Авторы:

Горелик Т.Г.,  
Кабанов П.В.,  
Кириенко О.В.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Методы повышения надежности цифровых подстанций должны учитывать основные факторы, влияющие на надежность цифровых подстанций.

Повышение структурной надежности сети Ethernet возможно за счет применения современных подходов к проектированию и наладке сети:

- использования физического и логического (с помощью VLAN) разделения сети на сегменты;
- разделения сети на шину процесса и станционную шину;
- использования протоколов резервирования PRP или HSR и соответствующей топологии сети Ethernet.

Повышение надежности элементов сети Ethernet может быть достигнуто только за счет выбора оборудования с высокими показателями надежности (как пассивного оборудования сети, так и активного – коммутаторов). Показатели надежности активного оборудования сети, используемого на шине процесса, должны соответствовать требованиям к показателям надежности терминалов релейной защиты.

Повышение функциональной надежности отдельных интеллектуальных устройств, рассчитанных на работу в рамках цифровой подстанции, является также актуальным вопросом. Достижение поставленной цели возможно только с использованием современных методик тестирования оборудования. Все устройства, используемые на цифровой подстанции, должны проходить тестирование на специализированных испытательных стендах с использованием современного испытательного оборудования:

- генераторами сигналов МЭК 61850-9-2 (PETOM или Omicron);
- программно-аппаратными комплексами «Симуляторы устройств, работающих по стандарту МЭК 61850»;
- программно-аппаратными комплексами для моделирования электроэнергетической системы в реальном времени (RTDS и аналогичные).

Дополнительно повысить надежность новых элементов цифровой подстанции можно за счет совокупности архитектурных решений.

Структура цифровых подстанций подразумевает использование выносных

устройств сопряжения с объектом (УСО) для сбора дискретной информации и выдачи управляющих воздействий, а также цифровых трансформаторов для сбора аналоговой информации. Для обеспечения надежной работы оправдано использование отдельных УСО и цифровых трансформаторов для работы основных и резервных терминалов РЗА. На каждое присоединение должны устанавливаться два терминала выносных УСО и два блока мультиплексора (Merging Unit) цифровых трансформаторов тока и напряжения.

Следующим шагом к построению надежной структуры Цифровой подстанции является максимальное использование возможностей стандарта МЭК 61850, положенного в основу идеологии цифровой подстанции. В первую очередь стандарт отличается от предшествующих стандартов по передаче информации возможностью обмена информацией между отдельными интеллектуальными электронными устройствами (GOOSE). Это открывает возможность свободного распределения функций между устройствами и их дублирование в различных устройствах, что может значительно повысить надежность Цифровой подстанции.

Еще одно новшество стандарта МЭК 61850 – появление унифицированного способа описания структуры Цифровой подстанции с использованием языка SCL. Унификация инструментов для проектирования позволяет увеличить надежность за счет сокращения ошибок при проектировании и последующей наладке оборудования Цифровой подстанции.

Немаловажным вопросом является повышение эксплуатационной надежности цифровых подстанций. Этот показатель зависит от многих факторов, таких как:

- квалификация эксплуатационного персонала;
- качество технического обслуживания;
- простота и прозрачность структуры и др.

Эксплуатационная надежность тем выше, чем меньше элементов содержит структура и чем логичнее организованы связи ее элементов. Унификация протоколов передачи данных, конфигурационных инструментов, организация центров подготовки персонала должны помочь в решении этого вопроса.

Способы повышения надежности цифровой подстанции должны применяться в совокупности. Определение правильных

подходов для каждого отдельного проекта ложится на плечи проектировщиков и системных интеграторов. Важно разработать единые принципы в оценке надежности проекта цифровой подстанции, а также программные инструменты для соответствующих расчетов. Программные инструменты должны базироваться на хорошо известных методах, разработанных в рамках теории надежности.

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

Хотя специальных методов оценки надежности цифровых подстанций не существует, оценку можно производить на основе методов теории надежности:

- аналитический метод;
- метод дерева отказов;
- таблично-логический метод.

В основе аналитических методов оценки надежности лежат вероятностные модели [3, с. 83]. С их точки зрения система представляется набором из последовательно-параллельно соединенных элементов. Зная базовые формулы для расчета надежности группы последовательно либо параллельно соединенных элементов, вычисляется надежность всей системы.

Основная характеристика надежности – время безотказной работы элемента или наработка до отказа. Для оценки этой величины используют экспоненциальный закон, характеризующийся одним параметром  $\lambda$ .

Функция есть вероятность отказа элемента до момента времени  $t$ .

Вероятность безотказной работы есть понятие противоположное отказу:

$$R(t) = 1 - Q(t).$$

Функцию  $R(t)$  называют функцией надежности. Статистически она определяется как отношение количества исправных ко времени  $t$  объектов, к общему количеству объектов в системе.

В практических расчетах самой распространенной характеристикой надежности является интенсивность отказов  $\lambda(t)$  (1/год). Эта величина характеристика локальная, определяющая надежность элемента в каждый момент времени. Эмпирически доказано, что данная величина зависит от периода «жизни» объекта. Различают период приработки, нормальной работы и старения. В периоды приработки и старения эта величина непостоянна. В данном случае будет рассмотрен этап

нормальной работы, на котором величина интенсивности отказов постоянна.

При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа, величина интенсивности отказов  $\lambda(t)$  равняется параметру  $\lambda$  – экспоненциального закона распределения. Это допущение значительно упрощает выкладки для расчета характеристик надежности.

Функция надежности связана с интенсивностью отказов следующим соотношением:

$$R(t) = e^{-\lambda t}.$$

Средняя наработка до отказа связана с функцией надежности и интенсивностью отказов следующим соотношением:

$$\bar{T}_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

Последовательным с точки зрения надежности называют соединение элементов, при котором выход из строя одного элемента ведет к отказу всей системы. В этом случае вероятность безотказной работы  $n$  последовательно соединенных элементов в течение времени  $t$ :

$$R_c(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

Параллельным с точки зрения надежности называют соединение элементов, при котором выход системы из строя происходит только вследствие выхода из строя всех ее элементов. В этом случае вероятность безотказной работы  $n$  параллельно соединенных элементов:

$$R_c(t) = 1 - (1 - R_i(t))^n.$$

Аналитический метод применим к схемам, имеющим только последовательные и параллельные соединения. Последовательное эквивалентирование схемы позволяет вычислить характеристики надежности схемы с помощью соотношений рассмотренных выше. Данный метод прост и может быть применен для оценки надежности различных несложных систем, например, для оценки структурных схем подключения ИЭУ.

Метод дерева отказов [1, с. 94] строится на систематическом анализе событий, которые могут вызвать отказ системы. В результате анализа строится так называемое дерево отказов. Структура дерева позволяет легко воспроизводить алгоритмы, при помощи которых можно вычислить вероятность отказа системы.

Деревом называют связный граф, не содержащий замкнутых контуров. Между любыми двумя узлами дерева можно по-

строить только один единственный путь. Деревом отказов называют логическое дерево, в котором ветви представляют собой события, приводящие к отказу системы, подсистемы или элементов, а узлы – логические операции, связывающие исходные и результирующие события отказов.

Дерево отказов начинается с единственного события в корне дерева, называемого конечным событием; на следующем уровне появляются события, которые могут вызвать конечное событие (согласно логической операции, которая связывает эти уровни (блоки «И» или «ИЛИ»)); на конечных ветвях находятся первичные события.

Последовательный анализ дерева, позволяет построить логическую функцию отказов системы (ФО). Логическая функция отказов воспроизводится с помощью схемы минимальных сечений.

Сечение – множество элементов, удаление которых приводит к нарушению связи между входом и выходом схемы.

Минимальное сечение – сечение, удаление из которого хотя бы одного элемента приводит к тому, что оставшееся множество элементов уже не будет сечением.

Слагаемые функции отказов представляют собою сечения, отказ элементов которых приводит к отказу системы. Логическая ФО, содержащая только минимальные сечения, позволяет получить формулу для аналитического расчета частоты отказов по известным частотам отказов элементов.

Метод дерева отказов широко применяется для оценки структур различной сложности.

Суть таблично-логического метода [2, с. 87] состоит в построении таблицы расчетных логических связей отказов и аварий, в которой указывается, к каким последствиям приводят отказы тех или иных элементов в том или ином режиме. Количество строк таблицы равняется количеству элементов схемы, а количество столбцов равняется количеству режимов, в которых может находиться схема. Под режимами понимается «нормальный режим», когда все элементы системы находятся в работе и различные «ремонтные режимы», в которых то или иное оборудование выведено в ремонт. В большинстве случаев система строится таким образом, что любой единичный отказ системы, не приводящий ни к каким серьезным послед-

ствиям, тогда как в ремонтных режимах система становится более уязвимой. Суть данного метода в том, чтобы оценить изменение интенсивности отказов системы в тех или иных режимах работы.

Оценка надежности цифровых подстанций представляет собой комплексную задачу и для ее решения необходимо совмещение различных методов оценки. Данный вопрос затрагивает как структурную надежность объекта, обусловленную его структурой, так и функциональную надежность, обусловленную особенностями режимов функционирования.

## ВЫВОДЫ

За последние годы производители устройств РЗА, ПА и АСУ ТП проделали большой путь по созданию устройств и ПТК Цифровой подстанции. Ряд технологий является очень перспективным с точки зрения проектирования, наладки и эксплуатации. Однако отсутствие системного подхода к вопросам построения надежной структуры Цифровой подстанции – сдерживающий фактор при внедрении новых технологий. При проектировании цифровых подстанций могут использоваться методы повышения надежности, перечисленные в данной статье. Важно также, чтобы надежность конечного проекта была проверена с использованием программных инструментов, построенных на известных методиках теории надежности. Только в этом случае можно рассчитывать на надежное функционирование цифровых подстанций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гук Ю.Б., Карпов В.В., Лапидус А.А. ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ. ВВЕДЕНИЕ учебное пособие СПб.: Издательство Политехнического университета, 2009. – 171 с.
2. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 206 с.
3. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. – 220 с.