

Авторы:

д.т.н. Булычев А.В.,
ООО «НПП Бреслер»,
к.т.н. Гвоздев Д.Б.,
Грибков М.А.,
ПАО «Россети
Московский регион»,
г. Москва, Россия.

D.Sc. Bulichev A.V.,
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia,
Ph.D. Gvozdev D.B.,
Gribkov M.A.,
PJSC «Rosseti Moscow
Region»,
Moscow, Russia.

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ 6-20 кВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ ТОКА

ENGINEERING AND ECONOMIC ANALYSIS OF RELAY PROTECTION SCHEMES IN 6-20 kV NETWORKS BASED ON DIGITAL CURRENT SENSORS

Аннотация: рассмотрены цифровые датчики тока со встроенными функциями токовых защит для распределительных электрических сетей 6-20 кВ. Показаны особенности построения схем релейной защиты на основе вновь разработанных цифровых датчиков тока. Приведены результаты сравнительного инженерно-экономического анализа возможных схем построения релейной защиты. Показаны преимущества двойной кольцевой схемы организации связи между отдельными устройствами релейной защиты. В примерах приведены количественные показатели, характеризующие улучшение свойств релейной защиты в распределительных сетях.

Ключевые слова: цифровизация, датчик тока, цифровая подстанция, релейная защита, отказы, резервирование.

Abstract: digital current sensors with built-in current protection functions for 6-20 kV distribution electric networks are considered. The features of constructing relay protection circuits based on newly developed digital current sensors are shown. The results of a comparative engineering and economic analysis of possible relay protection schemes are presented. The advantages of a double ring circuit for organizing communication between individual relay protection devices are shown. The examples show quantitative indicators characterizing

Введение

Техника измерения, регистрации и обработки сигналов релейной защиты (РЗ) в энергосистемах вступила в новую цифровую стадию развития – использования превосходящих возможностей микропроцессорной элементной базы. Но ключевыми элементами трактов преобразования сигналов по-прежнему остаются первичные датчики тока. Смысл измерения сигналов для целей РЗ состоит в том, что поступающая от контролируемого объекта измеряемая величина, как правило, аналоговая, должна быть по возможности без потери информации воспроизведена, обработана и выдана устройству или устройствам релейной защиты (УРЗ) в требуемом цифровом виде [1].

Реализация желаемых процедур идеальной передачи первичных сигналов в цифровые коды определенных форматов для использования микропроцессорными УРЗ является важной и актуальной научно-технической проблемой, а научно обоснованные предложения, выводы и рекомендации, способствующие ее решению, могут

повлиять на пути развития цифровой РЗ в будущем.

В рамках выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) между ПАО «Россети Московский регион» и ООО «НПП Бреслер» разработаны однофазные и трехфазные цифровые датчики тока (ЦДТ) с широким диапазоном линейного преобразования измеряемых токов от 0,01 до 40 номинальных.

Применение этих датчиков открывает перспективы совершенствования структуры РЗ в сетях 6-20 кВ. Для того, чтобы преобразовать выходной сигнал датчика в цифровой код, соответствующий принятым в нашей стране протоколам МЭК 61850-9-2 и МЭК 61850-9-2 LE, необходим цифровой блок с широкими вычислительными возможностями. Объединив в этом вычислительном блоке выполнение не только операций аналогово-цифровых преобразований (АЦП) и мультиплексирования, но и обработки сигналов по алгоритмам РЗ, можно получить существенное улучшение

свойств РЗ в целом. Положительный опыт применения подобных решений есть в сетях низкого напряжения ниже 1000 В (в автоматических выключателях с электронными расцепителями) и в сетях с напряжением 6-10 кВ (выключатели с приводами, в которые встроены реле серий РТВ и РТМ).

Задача выбора наиболее выгодной структуры РЗ на основе многофункционального датчика тока, выполняющего еще и функции РЗ, представляется актуальной. Эту задачу можно решить разными, близкими по технической сущности методами. Поэтому для оценки преимуществ решений с близкими показателями технического совершенства приходится привлекать и учитывать дополнительные экономические факторы, выполняя комплексный инженерно-экономический анализ.

Технические решения задачи

Учитывая, что на этапе разработки и опытной эксплуатации опытных образцов стоимость ЦДТ и схем цифровизации возможно определить только приблизительно, оценку эффективности разработки ЦДТ целесообразно выполнить путем сравнения вариантов. Новые возможные варианты надо сравнить с базовым, используемым в настоящее время. Для предварительных оценок можно рассмотреть возможные, применительно к реальным условиям,

наиболее распространенные варианты построения этих подстанций (ПС) в части отходящих присоединений.

При сравнении, как принято, можно не учитывать цены общего для сравниваемых вариантов оборудования, которое присутствует в сравниваемых вариантах примерно в одинаковых количествах. Кроме этого, можно не учитывать эксплуатационные расходы (периодическое обслуживание, потребление электроэнергии и др.), расходы на монтаж и наладку, считая их примерно равнозначными в сравниваемых вариантах.

На рис. 1 показана схема базового варианта управления секцией шин (СШ) класса напряжения 6-20 кВ.

На каждом присоединении в каждой фазе установлены электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) и трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП). Каждое присоединение оснащено терминалом РЗ присоединения. С целью организации управления выключателями по шине процесса (по протоколу МЭК 61850) на каждом присоединении предусмотрено реле промежуточное цифровое (РПЦ), обеспечивающее сопряжение цифровой шины и блока управления выключателем. Для реализации общесекционных функций релейной защиты и автоматики (РЗА) предусмотрен терминал централизованных защит. В нем, как правило, реализуются функции диффе-

the improvement of relay protection properties in distribution networks.

Keywords: digitalization, current sensor, digital substation, relay protection, failures, redundancy.



Бульчев

Александр Витальевич

В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик.

В 1998 г. окончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей».

Директор по науке ООО «НПП Бреслер», профессор.

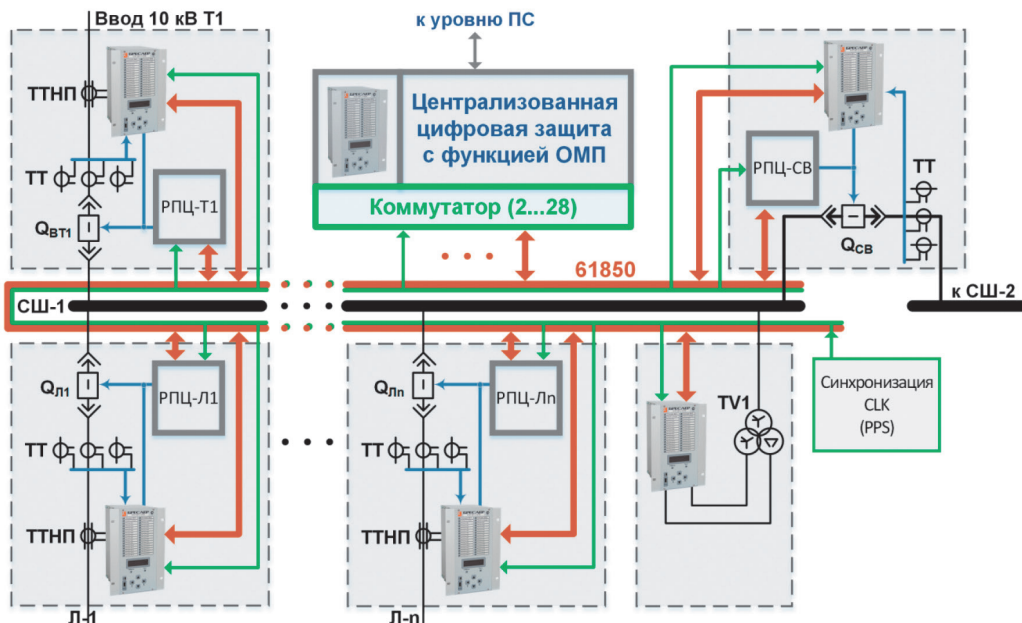


Рис. 1. Структурная схема базового варианта цифрового управления СШ класса напряжения 6-20 кВ



Гвоздев Дмитрий Борисович

В 1996 г. окончил Кузбасский государственный технический университет по специальности «Электроснабжение». В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение безопасности эксплуатации взрывозащищенных аппаратов на примере шахтных пускателей». Первый заместитель генерального директора – главный инженер ПАО «Россети Московский регион».



Грибов Максим Александрович

В 2005 г. окончил Московский энергетический институт (ТУ) по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Директор департамента релейной защиты и режимной автоматики электрических сетей ПАО «Россети Московский регион».

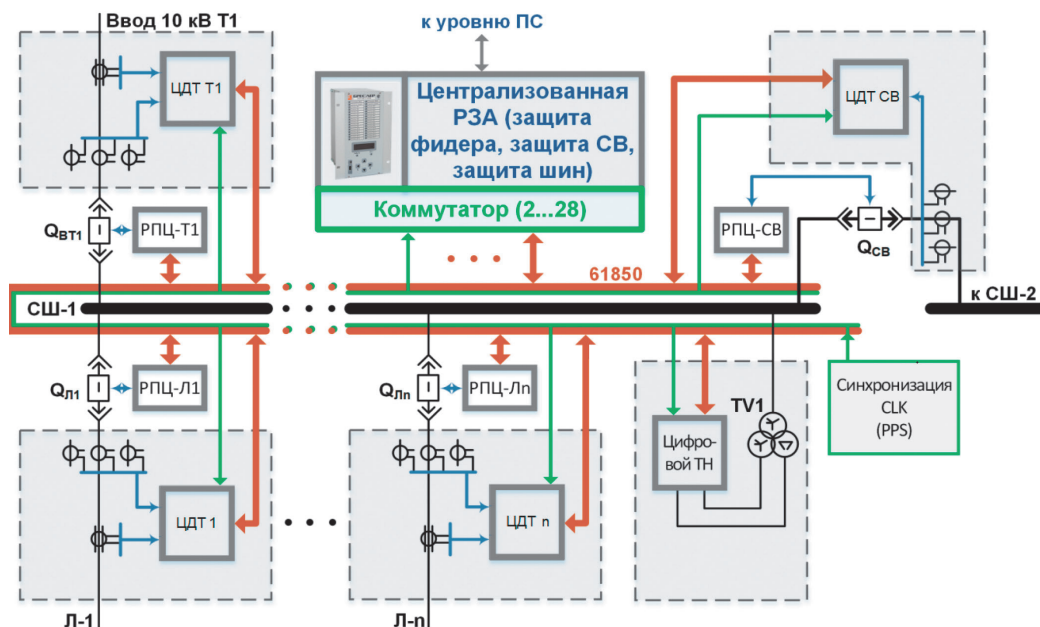


Рис. 2. Структурная схема сети с ЦДТ и централизованной для СШ РЗА

ренциальной защиты шин, централизованной защиты от однофазных замыканий на землю, автоматической частотной разгрузки, определения места повреждения и др. Цифровая шина процесса организована на основе коммутатора, к которому по радиальным цепям через соответствующие порты подключены все показанные на схеме цифровые устройства, включая централизованный терминал РЗА.

Второй вариант схемы с централизованной для СШ РЗА, в которой используется разработанный ЦДТ, показан на рис. 2.

Здесь в качестве датчиков тока может быть предусмотрен, как трехфазный модуль ЦДТ, так и комплект однофазных ЦДТ с общим электронным модулем (равнозначные по стоимости). На каждом присоединении установлен ЦДТ, который подключен к цифровой шине процессов. Функции защиты всех присоединений СШ выполняет централизованный терминал РЗА, к которому так же, как и в первом варианте, по радиальным связям через коммутатор поступает информация о токах от ЦДТ всех присоединений. Важнейшей особенностью этого варианта является отсутствие терминалов РЗА на каждом присоединении и выполнение всех функций РЗА в центральном терминале. Здесь, в случаях необходимости обеспечения более высокой надежности коммуникационной сети и функционала

РЗА, возможно использование двух взаимно резервирующих коммутаторов и централизованных терминалов.

В ряде случаев возможно управление выключателями непосредственно по шине процессов, и установку РПЦ можно не предусматривать. Это позволит снизить стоимость новых вариантов. На рынке появляются выключатели, которые комплектуются блоками управления, совместимыми с шиной процессов по протоколу МЭК 61850, например, фирмы «Таврида-Электрик» [2].

На рис. 3 показана схема СШ с кольцевой структурой организации передачи цифровых данных.

Здесь, в отличие от первых двух схем, использована кольцевая, а не радиальная структура организации цифровой сети. Эта сеть может быть построена без коммутатора путем соединения последовательными связями в кольцо всех цифровых устройств. Повышение надежности в случаях необходимости достигается за счет организации двойного кольца и сохранения транзита передачи данных при выводе из работы любого цифрового устройства, включенного в кольцо. Для реализации этого варианта необходимо, чтобы все цифровые устройства, включаемые в кольцевую сеть, имели по 4 порта связи для передачи данных по протоколу МЭК 61850, в том числе и ЦДТ, установлен-

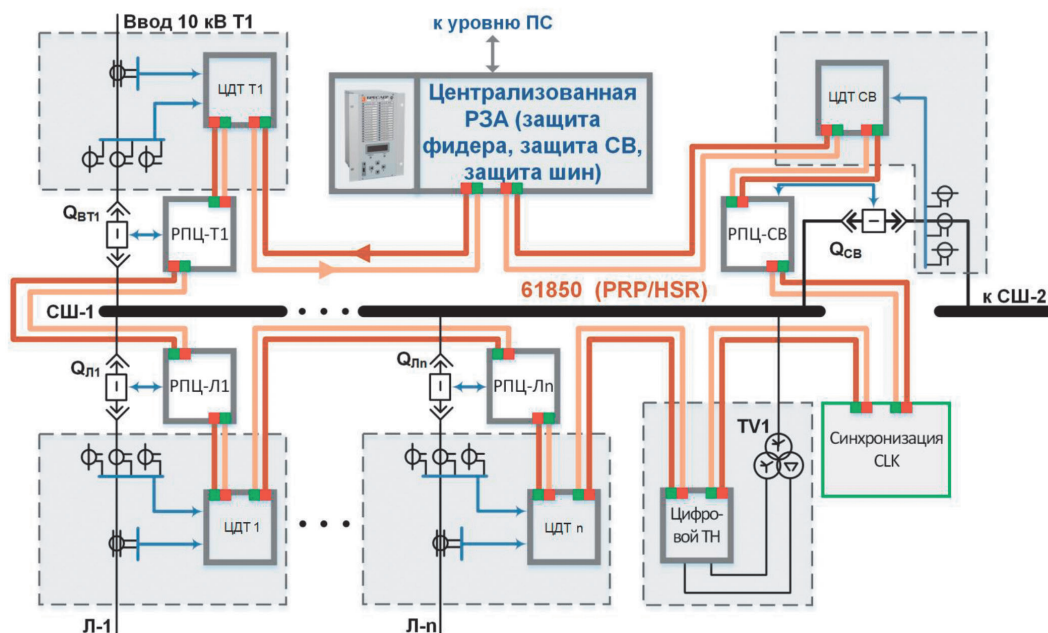


Рис. 3. Структурная схема СШ с кольцевой структурой организации передачи цифровых данных

ные на каждом силовом присоединении к СШ. Это потребует незначительного удорожания ЦДТ (которое можно не учитывать на фоне базовой стоимости), но за счет отсутствия коммутатора эта схема может быть более выгодной с экономических позиций и не уступать другим вариантам по показателям технического совершенства и надежности.

Оценка экономических показателей

Исходные данные для приближенной оценки экономических показателей базового варианта схемы показаны в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные базового варианта

№	Наименование изделия	Обозначение	Стоимость, тыс. руб.	Поставщик изделия
1	ТТ ТПОЛ-10-1000/5	СТТ	25	Свердловский завод ТТ [3]
2	ТТНП Бреслер-ТЗРЛ-200	СТ0	22,8	ООО «НПП Бреслер» [4]
3	Терминал РЗА	СТЕР	237,6	ООО «НПП Бреслер» [4]
4	Контроллер РПЦ для выключателя	СРПЦ	82	ООО «НПП Бреслер» [4]
5	Централизованный терминал Бреслер-0107.800	СЦТ1	720	ООО «НПП Бреслер» [4]
6	Коммутатор РТ-G7728	СКОМ	275	ИЕНШАНЦ АВТОМАТИКА [5]

Исходные данные для оценки экономических показателей варианта 1 схемы (рис. 2) с радиальной структурой цифровой сети показаны в табл. 2.

Исходные данные для оценки экономических показателей варианта 2 схемы (рис. 3) с кольцевой структурой цифровой сети показаны в табл. 3.

Оценка примерной стоимости ЦДТ приведена в калькуляции (табл. 4), которая составлена на основе доступных цен на комплектующие и материалы.

Таблица 2. Исходные данные варианта 1

№	Наименование изделия	Обозначение	Стоимость, тыс. руб.	Поставщик изделия
1	ЦДТ	СЦДТ	182	Калькуляция ЦДТ (табл. 4)
2	Контроллер РПЦ для выключателя	СТ0	82	ООО «НПП Бреслер» [4]
3	Централизованный терминал с цифровыми входами по МЭК	СЦТ2	720	ООО «НПП Бреслер» [4]
4	Коммутатор РТ-G7728	СКОМ	275	КПНИЕНШАНЦ-АВТОМАТИКА [5]

Таблица 3. Исходные данные варианта 2

№	Наименование изделия	Обозначение	Стоимость, тыс. руб.	Поставщик изделия
1	ЦДТ	СЦДТ	182	Калькуляция ЦДТ (табл. 4)
2	Контроллер РПЦ для выключателя	СТ0	82	ООО «НПП Бреслер» [4]
3	Централизованный терминал с цифровыми входами по МЭК	СЦТ2	720	ООО «НПП Бреслер» [4]

Таблица 4. Калькуляция ЦДТ

№	Наименование составляющей	Стоимость, тыс. руб.	Источник для оценки стоимости
1	Сердечник из наноматериала типа АМАГ-200	1,13	Счет от НПП Гаммамет на сердечники из наноматериала типа АМАГ-200
2	Катушка первичного преобразователя ЦДТ	13,9	Калькуляция на изготовление катушек для ЦДТ ООО «НПП «Динамика»
3	Эпоксидный компаунд	12,5	Стоимость с учетом цен и состава компонентов для заливки 1 ЦДТ
4	Первичная обмотка ЦДТ	3,5	Стоимость материала с учетом конструкции с сайта Торговый дом «Бронзовый век» bvek.ru/
5	Закладные детали и комплектующие	6	http://www.csk-technogroup.ru/metricheski-krepez.html
6	Электронный блок ЦДТ с портами по МЭК 61850	82	ООО «НПП Бреслер» [4]
7	Изготовление (сборка) ЦДТ	32	
Стоимость в целом		182	

Численные показатели сравнения первого варианта построения схемы СШ с радиальной цифровой сетью с базовым вариантом приведены в табл. 5.

Таблица 5. Показатели сравнения вариантов

Наименование оборудования	Цена единицы, тыс. руб.	Количество присоединений к СШ, штук	Количество элементов, штук	Цена комплекта на СШ, тыс. руб.
ТТ	25	10	30	750
ТО	22,8	10	10	228
Терминал присоединения	237,6	10	10	2376
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	1	1	720
Коммутатор	275	1	1	275
Сумма-Базовый				5169
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				516,9
Вариант 1				
ЦДТ	182	10	10	1820
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	1	1	720
Коммутатор	275	1	1	275
Сумма-Вариант 1				3635
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				363,5
Кратность стоимости нового относительно базового, о.е.				0,70

Стоимость цифровизации управления по первому варианту меньше по отношению к базовому из расчета на одно присоединение и составляет примерно 70% стоимости базового варианта. Снижение стоимости обусловлено, в основном, за счет централизации РЗА и отказа от цифровых терминалов на каждом присоединении.

Если в этом варианте предусмотреть двойное резервирование коммутатора и централизованного терминала, то стоимость второго варианта возрастет (табл. 6), но не превысит стоимость базового (составит примерно 90% стоимости базового).

Таблица 6. Показатели варианта 1 при резервировании коммутатора и центрального терминала

Наименование оборудования	Цена единицы, тыс. руб.	Количество присоединений к СШ, штук	Количество элементов, штук	Цена комплекта на СШ, тыс. руб.
ТТ	25	10	30	750
ТО	22,8	10	10	228
Терминал присоединения	237,6	10	10	2376
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	1	1	720
Коммутатор	275	1	1	275
Сумма-Базовый				5169
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				516,9
Вариант 1				
ЦДТ	182	10	10	1820
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	2	2	1440
Коммутатор	275	2	2	550
Сумма-Вариант 1				4630
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				463
Кратность стоимости нового относительно базового, о.е.				0,90

Численные показатели сравнения второго варианта построения схемы СШ с двойной кольцевой цифровой сетью с базовым вариантом приведены в табл. 7.

Таблица 7. Показатели варианта 2 с двойной кольцевой цифровой сетью

Наименование оборудования	Цена единицы, тыс. руб.	Количество присоединений к СШ, штук	Количество элементов, штук	Цена комплекта на СШ, тыс. руб.
ТТ	25	10	30	750
ТО	22,8	10	10	228
Терминал присоединения	237,6	10	10	2376
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	1	1	720
Коммутатор	275	1	1	275
Сумма-Базовый				5169
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				516,9
Вариант 2				
ЦДТ	182	10	10	1820
РПЦ выключателя	82	10	10	820
Терминал централизованный	720	1	1	720
Сумма-Вариант 2				3360
Средняя стоимость на 1 присоединение СШ				336
Кратность стоимости нового относительно базового, о.е.				0,65

Сравнительный анализ

Как видно, стоимость цифровизации управления по второму варианту по отношению к базовому из расчета на одно присоединение меньше и составляет примерно 65% стоимости базового варианта. Снижение стоимости обусловлено, в основном, за счет централизации РЗА, отказа от цифровых терминалов на каждом присоединении, организации цифровой сети по двойной кольцевой структуре вместо радиальной структуры и коммутаторов.

Необходимо отметить, что стоимость цифровизации управления зависит от количества присоединений. В табл. 8 приведены финансовые показатели по варианту 1 применительно к ПС с разным количеством присоединений 6-20 кВ от 5 до 25.

Для наглядного сравнения использован коэффициент сокращения стоимости, который определяется как отношение стоимости базового варианта к стоимости варианта с ЦДТ. Иными словами, коэффициент сокращения стоимости показывает во сколько раз вариант с ЦДТ дешевле базового на 1 СШ или на 1 присоединение (рис. 4).

Стоимость варианта 1 ниже стоимости базового варианта в 1,3 раза при небольшом количестве присоединений (4 и более) и в 1,5 раза - при 20 присоединениях и более. Этот вариант целесообразно применять на ПС с большим количеством присоединений (20 и более).

Финансовые показатели по варианту 2 приведены в табл. 9, применительно к ПС с количеством присоединений 6-20 кВ от 3 до 25.

Стоимость варианта 2 примерно в 1,5 раза меньше стоимости базового варианта при любом реальном ко-

Таблица 8. Финансовые показатели по варианту 1

Наименование оборудования	Цена единицы, тыс. руб.	Количество присоединений				
		5	10	15	20	25
ТТ	25	375	750	1125	1500	1875
ТО	22,8	114	228	342	456	570
Терминал присоединения	237,6	1188	2376	3564	4752	5940
РПЦ выключателя	82	410	820	1230	1640	2050
Терминал централизованный	720	720	720	720	720	720
Коммутатор	275	275	275	275	275	275
Вариант 1 - ЦДТ		3082	5169	7256	9343	11430
ЦДТ	182	910	1820	2730	3640	4550
РПЦ выключателя	82	410	820	1230	1640	2050
Терминал централизованный	720	720	720	720	720	720
Коммутатор	275	275	275	275	275	275
Вариант 1		2315	3635	4955	6275	7595
Коэффициент сокращения стоимости		1,33	1,42	1,46	1,50	1,50

Таблица 9. Финансовые показатели по варианту 2

Наименование оборудования	Цена единицы, тыс. руб.	Количество присоединений					
		3	5	10	15	20	25
ТТ	25	225	375	750	1125	1500	1875
ТО	22,8	68,4	114	228	342	456	570
Терминал присоединения	237,6	712,8	1188	2376	3564	4752	5940
РПЦ выключателя	82	246	410	820	1230	1640	2050
Терминал централизованный	720	720	720	720	720	720	720
Коммутатор	275	275	275	275	275	275	275
Базовый вариант		2247,2	3082	5169	7256	9343	11430
II вариант - ЦДТ							
ЦДТ	182	546	910	1820	2730	3640	4550
РПЦ выключателя	82	246	410	820	1230	1640	2050
Терминал централизованный	720	720	720	720	720	720	720
Вариант 2		1512	2040	3360	4680	6000	7320
Коэффициент сокращения стоимости, о.е.		1,49	1,51	1,54	1,55	1,56	1,56

личестве присоединений к СШ. Применение этого варианта целесообразно на ПС с любым реальным количеством присоединений больше 3.



Рис. 4. График зависимости коэффициента сокращения стоимости варианта 1 в зависимости от количества присоединений 6-20 кВ



Рис. 5. График зависимости коэффициента сокращения стоимости варианта 2 в зависимости от количества присоединений 6-20 кВ

Маркетинговый прогноз в масштабах одной ПС

Наиболее значимые инженерно-экономические аспекты новой разработки можно выделить на примере системы РЗ, предназначенной для установки на ПС на стороне 6-20 кВ, организованной по новым принципам.

Пусть основной задачей НИОКР является создание новой высокоэффективной и надежной цифровой системы релейной защиты и автоматики (ЦСРЗА) на основе ЦДТ для ПС класса 110/10 кВ.

В сложившихся условиях новые плодотворные решения в РЗ электроэнергетических систем (ЭЭС) могут возникать лишь на хорошей экономической (финансовой) основе. По сути, это инвестиции, или долгосрочное вложение экономических ресурсов, которые будут приносить выгоду в будущем.

Наиболее наглядный анализ эффективности инвестиционного проекта применения ЦДТ можно сделать на основе исследования денежных потоков (доходов и расходов). Но цель функционирования РЗ на основе ЦДТ заключается не в создании прямых доходов, а в предотвращении развития аварийных ситуаций при повреждении отдельных элементов ЭЭС. В связи с этим, в основу анализа инвестиций в РЗ на основе ЦДТ целесообразно включить не только капитальные вложения и эксплуатационные затраты, но и предотвращение возможного ущерба от возможных аварий в ЭЭС.

Основные финансовые параметры инвестиционного проекта

Маркетинговый прогноз можно построить на известных материалах, опубликованных в официальных изданиях, путем сравнения систем РЗА 1 СШ наиболее распространенной ПС 110/10 кВ, построенных по базовой схеме и по новой схеме на основе ЦДТ [6].

Используя технические показатели вновь создаваемой ЦСРЗА на основе ЦДТ в сравнении с базовым, мож-

но оценить ожидаемый годовой экономический эффект следующим образом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_n,$$

где \mathcal{E}_c – составляющая экономического эффекта, связанная с изменением стоимости ЦСРЗА, тыс. руб.;

\mathcal{E}_n – экономический эффект, связанный с упрощением и удешевлением процесса монтажа и наладки, тыс. руб.

Трудоемкость обслуживания ПС по варианту с ЦДТ не выше, чем при базовом варианте, т.к. в ЦДТ предусмотрена самодиагностика и можно реализовать обслуживание «по состоянию». В связи с этим, при оценке эффективности можно не учитывать эффект от обслуживания оборудования.

В базовой системе защиты (см. п. 4.1) на каждом присоединении в каждой фазе установлены электромагнитные ТТ и ТТНП. Каждое присоединение оснащено терминалом РЗ присоединения. С целью организации управления выключателями по шине процесса (по протоколу МЭК 61850) на каждом присоединении предусмотрено РПЦ, обеспечивающее сопряжение цифровой шины и блока управления выключателем.

Новая ЦСРЗА, выполненная по схеме с кольцевой структурой организации передачи цифровых данных, в отличие от базовой, может быть построена без коммутатора путем соединения последовательными связями в кольцо всех цифровых устройств. Это решение обеспечивает как технические, так и экономические преимущества.

Составляющая \mathcal{E}_c будет определяться следующим образом:

$$\mathcal{E}_c = E_n(C_б - C_n),$$

где $E_n = (C_б - C_n)/C_n$ – коэффициент эффективности капитальных вложений;

$C_б, C_n$ – цены базовой и новой системы защиты на основе ЦДТ соответственно, тыс. руб.

Ввод базового устройства в работу предполагает монтаж и наладку сложного коммуникационного устройства – коммутатора и более протяженных радиальных линий связи от коммутатора до каждого устройства защиты, установленного на каждом силовом присоединении. Стоимость монтажа и наладки обычно составляет 1/2 стоимости оборудования. Монтаж и наладка новой системы ЦСРЗА менее трудоемка, т.к. линии связи прокладываются по кольцевой схеме «от устройства до устройства». При этом упрощается и процесс наладки, т.к. настраиваются соединения только между устройствами и не требуется настройка каналов связи между каждым устройством и центральным коммутатором. Стоимость монтажа и наладки нового варианта можно принять равной $\frac{1}{2,6}$ стоимости оборудования. Таким образом, эффект \mathcal{E}_n вычисляется следующим образом:

$$\mathcal{E}_n = H_б - H_n = \frac{1}{2} C_б - \frac{1}{2,6} C_n,$$

где $H_б, H_n$ – затраты на наладку базового и нового устройств ОМП соответственно, тыс. руб.

Стартовые показатели: стоимость проекта на 1 СШ ПС (инвестиции) 3,36 млн руб.; период реализации – примерно, 8 лет; поток экономии в первый год не предполагается (0), во второй год 50% (1,14 млн руб.) расчетного экономического эффекта (2,27 млн руб.); в третий – 65% (1,48 млн руб.); в последующие годы – 75% (1,7 млн руб.); стоимость базовой системы защиты базовый вариант для сравнения) 5,169 млн руб.

Общая стоимость предлагаемой новой системы релейной защиты и управления ниже ($C_n = 3,36$ млн руб., $C_б = 5,169$ млн руб.), чем централизованной (базовой). Тогда $\mathcal{E}_c = 0,97$ млн руб.

$$\mathcal{E}_c = ((5,169 - 3,36)/3,36) \times (5,169 - 3,36) = 0,97 \text{ млн руб.}$$

Эффект при монтаже и наладке

$$\mathcal{E}_n = 5,169/2 - 3,36/2,6 = 1,3 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, ожидаемый экономический эффект от использования новой ЦСРЗА на 1 СШ ПС составляет:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_n = 0,97 + 1,3 = 2,27 \text{ млн руб. в год.}$$

Внутренняя норма доходности (internal rate of return - IRR). Показатель внутренней нормы доходности характеризует максимально допустимый относительный уровень расходов, которые могут быть произведены при реализации данного проекта. Иными словами, инвестор получает возможность сравнить полученное для инвестиционного проекта значение IRR с ценой привлеченных финансовых ресурсов (cost of capital - CC). Значение IRR показывает верхнюю границу допустимого уровня банковской процентной ставки, превышение которой делает проект убыточным. Если IRR больше CC (в процентах), то проект прибыльный и его можно принять.

Значение IRR для проекта, рассчитанного на 8 лет, требующего инвестиций в размере IC = 3,36 млн руб. Предполагаемый финансовый эффект в виде экономии в первый год реализации проекта отсутствует, т.к. средства инвестируются и эффект $P_1=0$. В последующие годы (в качестве прогноза) можно принять:

$$P_2 = 1,14; P_3 = 1,48;$$

$$P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = 1,7 \text{ млн руб.}$$

Ориентируясь на заведомо высокие процентные ставки на ссудный капитал, выбираются два значения коэффициента дисконтирования V_1 меньше V_2 так, чтобы на интервале от V_1 до V_2 функция NPV(V) меняла знак. Значение IRR определяется по формуле:

$$IRR = i_1 + [NPV(i_1)/((NPV(i_1) - NPV(i_2))) \times (i_2 - i_1),$$

где i_1 и i_2 , соответственно, значения процентной ставки в интервале между которыми функция NPV(V) меняет знак.

Для определения IRR можно принять произвольно значения нижней и верхней процентной ставки, соответственно, 14% и 20%. Расчеты удобно выполнить в табличном виде. Первая итерация – в табл. 10.

Таблица 10. Таблица расчетов основных финансовых параметров инвестиционного проекта

Год, t	Поток, P, млн руб.	Значения при i=12,12%		Значения при i=14%		Значения при i=20%	
		$V(t) = 1/(1+0,1212)t$	$NPV(t) = (1/(1+0,1212)t)P-IC$	$V(t) = 1/(1+0,14)t$	$NPV(t) = (1/(1+0,14)t)P-IC$	$V(t) = 1/(1+0,20)t$	$NPV(t) = (1/(1+0,20)t)P-IC$
0	-3,36	1	-3,36	1	-3,36	1	-3,36
1	0,0	0,8919	0,0000	0,8696	0,0000	0,8333	0,0000
2	1,14	0,7955	0,9029	0,7561	0,6947	0,6944	0,6270
3	1,48	0,7095	1,0469	0,6575	0,7066	0,5787	0,6058
4	1,7	0,6328	1,0773	0,5718	0,6379	0,4823	0,5196
5	1,7	0,5644	0,9609	0,4972	0,4991	0,4019	0,3862
6	1,7	0,5034	0,8570	0,4323	0,3904	0,3349	0,2870
7	1,7	0,4490	0,7644	0,3759	0,3055	0,2791	0,2133
8	1,7	0,4004	0,6817	0,3269	0,2390	0,2326	0,1586
			2,9311		0,1132		-0,56
IRR (%)							15,0
NPV проекта, млн руб.							2,93
DPP (Дисконтированный срок окупаемости), лет							4,35

Значение IRR в результате первой итерации:

$$IRR_1 = 14 + (0,1132/(0,1132 - (-0,56))) \times (20 - 14) = 15,0\%$$

Значение IRR, полученное в результате первой итерации 15,0%, больше ставки дисконтирования 12,12%, поэтому не требуется уточнение значения и другие итерации. Таким образом, верхнее предельное значение процентной ставки, при которой обеспечивается окупаемость кредита для финансирования проекта, составляет 15,0%. Процентная ставка по кредитам ведущих банков (например, 11,7% в Сбербанке) меньше значения IRR, поэтому предлагаемый проект можно признать окупаемым.

Чистый дисконтированный доход (net present value - NPV):

$$NPV = 2,93 \text{ млн руб.}$$

Дисконтированный срок окупаемости (discount payback period method - DPP). Это продолжительность периода, в течение которого сумма чистых доходов, дисконтированных на момент завершения инвестиций, равна сумме инвестиций.

Сумма чистых доходов за первые четыре года составляет 3 млн руб. Следовательно, на пятом году реализации проекта наступит баланс:

$$DPP = 4 + 0,33/0,96 = 4,35 \text{ года.}$$

Здесь 0,33 млн руб. – это невозмещенный после первых четырех лет реализации проекта остаток инвестиций; 0,96 млн руб. – доходы (экономия), поступающие в пятом году реализации проекта.

Показатели проекта в масштабах группы ПС

Применение ЦДТ может дать существенный технико-экономический эффект при плановом строительстве новых ПС. Пусть есть следующие исходные ключевые показатели инвестиционного проекта применения ЦДТ при строительстве группы ПС, соответствующие табл. 9 применительно к СШ с 10 присоединениями:

- Продолжительность проекта - 10 лет.
- Количество строящихся ПС – 2 в год.
- Количество СШ 10 кВ – 10 шт. в год.
- Стоимость базового варианта построения РЗА при реализации 2 ПС – 51,69 млн руб.
- Стоимость нового варианта построения РЗА на основе ЦДТ при реализации 2 ПС – 33,6 млн руб.

- Стоимость разработки ЦДТ (НИОКР) – 41,2 млн руб.
- Инфляционный коэффициент – 4,0% в год.

Затраты на создание комплекса РЗ на ПС содержат постоянную и переменную составляющие. Постоянная – это инвестиции в разработку ЦДТ в рамках НИОКР (можно принять 41,2 млн руб.). Переменная – это затраты, которые изменяются (увеличиваются) в зависимости от количества сооружаемых объектов.

Различие между этими затратами достаточно условно, но является базой для оценки безубыточности проектов. Концепция безубыточности в данном случае предполагает следующее. Сколько ПС на основе новой разработки надо ввести в работу, чтобы возместить произведенные при этом затраты.

Учитывая, что для обеспечения потребителей электрической энергией неизбежно необходимо соорудить определенное количество ПС, можно сравнить альтернативные варианты: базовый и новый вариант на основе ЦДТ. Пусть продолжительность проекта составляет 10 лет. Каждый год строится 2 ПС или 10 условных СШ с 10 присоединениями. Затраты на РЗ по базовому варианту составляют 51,69 млн руб. в год, по новому на основе ЦДТ – 33,6 млн руб. в год без учета инфляции. Затраты на разработку можно принять равными стоимости НИОКР 41,2 млн руб. Расчетный инфляционный коэффициент 1,04.

На рис. 6 показаны кривые изменения затрат на РЗ по базовому и новому варианту.

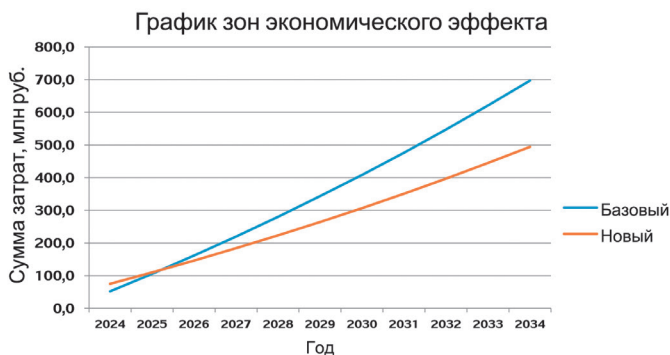


Рис. 6. График зон экономического эффекта

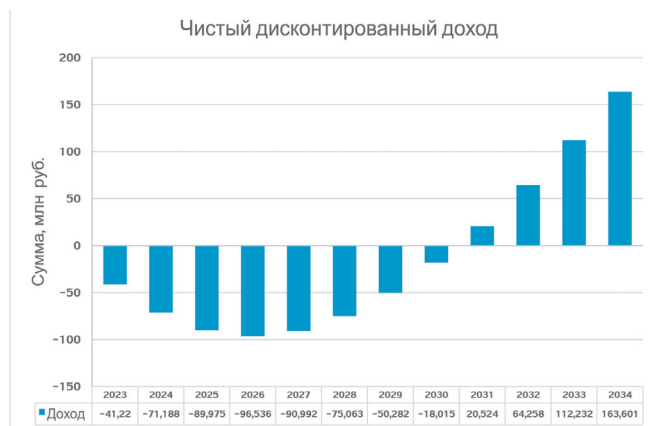


Рис. 7. Диаграмма изменения чистого дисконтированного дохода

Точка фиксированных затрат (41,2 млн руб.) на разработку ЦДТ соответствует 2024 году. Линия графика переменных затрат по новому варианту начинается из этой точки (41,2 млн руб.). Исходная точка линия затрат по базовому варианту находится в нуле графика. Поскольку стоимость построения РЗ каждого объекта по базовому варианту больше (51,69 млн руб. в год), чем по новому (33,6 млн руб. в год), то есть точка пересечения этих линий затрат. Эта точка является границей зоны безубыточности проекта. После 2025 года построение ПС по новому варианту будет сопровождаться приращением прибыли в виде экономии затрат. Экономия средств по сравнению с базовым вариантом к концу десятого года проекта составит более 163,6 млн руб. За счет этой экономии можно построить дополнительно 10 комплексов РЗ ПС.

На рис. 7 показана диаграмма изменения чистого дисконтированного дохода (экономии средств) в течение срока действия проекта.

Чистый дисконтированный доход в конце срока проекта составляет $NPV = 163,6$ млн руб.

Дисконтированный срок окупаемости 8 лет.

Полученные расчетным путем показатели проекта позволяют сделать вывод о том, что проект построения РЗ на основе ЦДТ для группы ПС позволяет получить существенную экономию средств или построить больше объектов в сравнении с базовым вариантом при ограничении объема финансирования.

Выводы

1. Анализ эффективности инвестиционных проектов в области РЗ целесообразно выполнять на основе исследования денежных потоков (доходов и расходов) при условии сохранения или улучшения основных технических функций. Наиболее общим показателем эффективности может служить дисконтированный срок окупаемости, который представляет собой продолжительность периода, в течение которого сумма чистых доходов, дисконтированных на момент завершения

инвестиций, становится равной сумме инвестиций. Учитывая специфику ЭЭС и РЗ проект можно считать эффективным, если срок его окупаемости не превышает 5-8 лет.

2. Проект построения РЗ на высокоавтоматизированной подстанции (ВАПС) на основе ЦДТ по предложенной схеме является окупаемым и может быть реализован, как за счет собственных средств, так и за счет привлечения авансируемого капитала. Это подтверждается достаточно высоким значением показателя $IRR = 15,0\%$, которое превышает процентные ставки кредитования в ведущих отечественных банках. Расчетный срок окупаемости составляет 4,35 года, и, начиная с пятого года, проект будет давать финансовый эффект в виде экономии.

3. Установлено, что на основе разрабатываемого ЦДТ можно более выгодно построить цифровое управление ПС на стороне 6-20 кВ по сравнению с базовым решением, которое применяется в настоящее время (с использованием ТТ и отдельного терминала на каждом присоединении).

4. Вариант 2 с двойной кольцевой структурой цифровой сети наиболее выгоден. Его стоимость примерно в 1,5 раза меньше стоимости базового варианта при любом реальном количестве присоединений к СШ. Вариант 1 с радиальной структурой цифровой сети менее выгоден, но может быть в некоторых условиях успешно использован, т.к. его стоимость ниже стоимости базового варианта в 1,3 раза при небольшом количестве присоединений (4 и более), и в 1,5 раза - при 20 присоединениях и более.

5. Проект построения РЗ группы ВАПС на основе ЦДТ по предложенной схеме является окупаемым и дает экономию средств по сравнению с базовым вариантом более 163,6 млн руб. Расчетный срок окупаемости 8 лет. В условиях ограничения финансирования за счет этой экономии можно построить на 10 объектов больше.

Литература:

1. Кужиков С.Л., Дегтярев А.А., Сербиновский Б.Б. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3 (28). – С. 43-51.
2. Техническая информация Таврида-электрик. SMART-35 [Электронный ресурс] – <https://www.tavrida.ru/ter/>.
3. Техническая информация и справочный прайс Свердловского завода ТТ [Электронный ресурс] – <https://www.czt.ru/>.
4. Техническая информация и справочные данные о стоимости [Электронный ресурс] – www.bresler.ru.
5. Техническая информация и справочный прайс [Электронный ресурс] – <https://nnz-ipc.ru/>.
6. Мелкумов Я.С. Финансовые вычисления. Теория и практика. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 408 с.