



инженерный центр
энергосервис

Обоснование применения технологии СВИ в распределительных сетях среднего напряжения, в том числе с распределенной генерацией



Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н.

Архангельск, 2022

Содержание

- Раздел 1. Мировой опыт применения СВИ
- Раздел 2. Общая концепция применения СВИ в РЭС
- Раздел 3. Мониторинг состояния силового трансформатора
- Раздел 4. Автоматизация кабельных и воздушных сетей
- Раздел 5. Распределенная генерация
- Заключение
- Список литературы

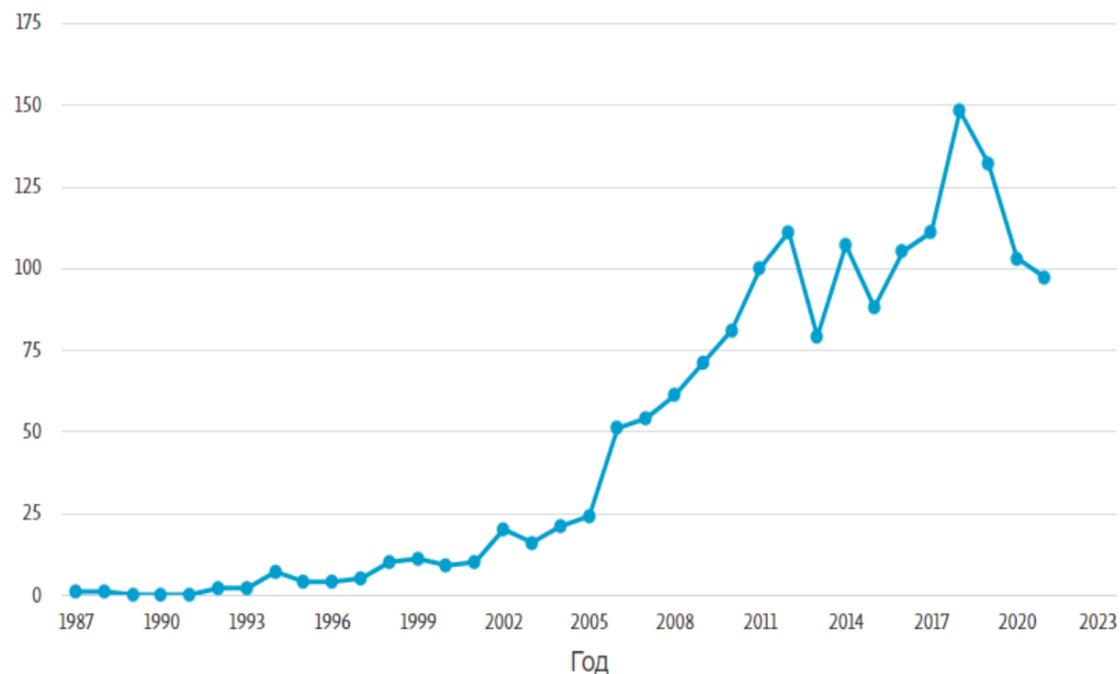


Раздел I. Мировой опыт применения СВИ

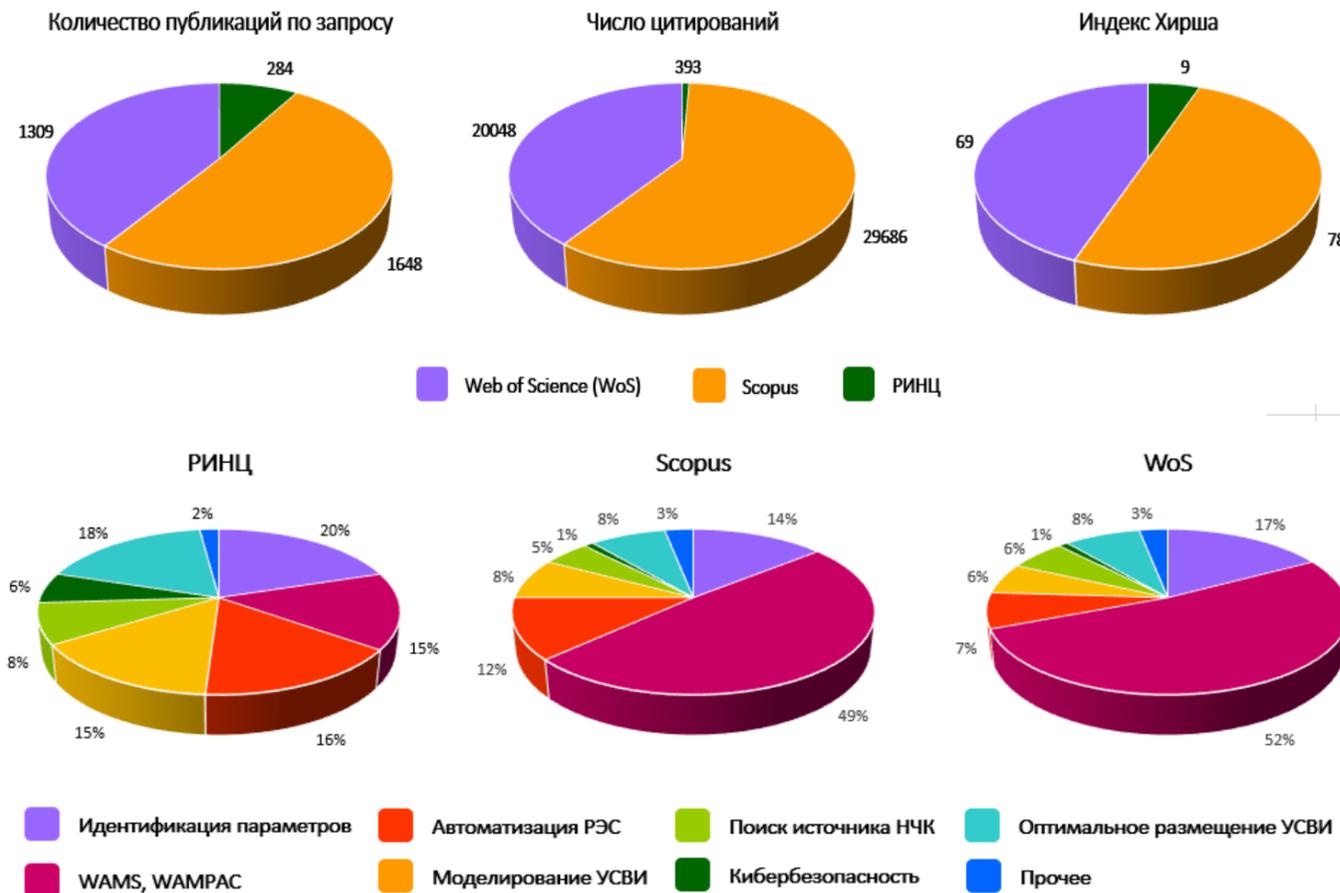
Анализ научной литературы

- ❑ Форма запроса: «синхронизированные векторные измерения»
- ❑ База данных: РИНЦ, Scopus, Web of Science (WoS)
- ❑ Параметры запроса: заголовки статей, ключевые слова, аннотации
- ❑ Выборка в размере 100 наиболее цитируемых публикаций
- ❑ Отбор и сортировка по тематике публикаций

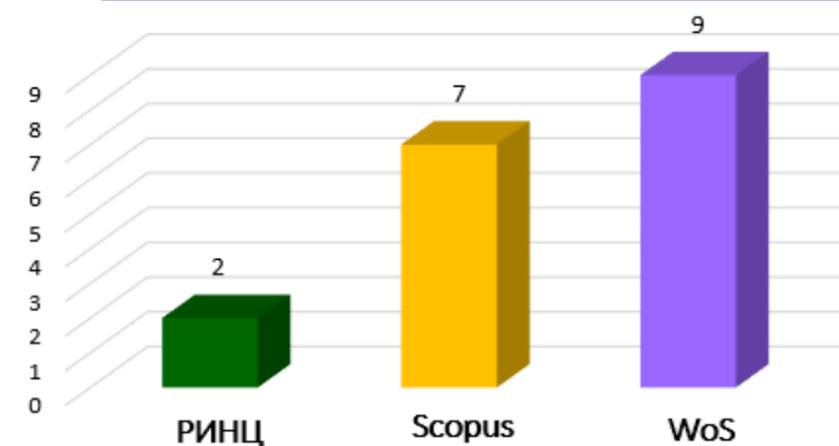
Общее число публикаций по годам в Scopus



Результаты анализа выборки



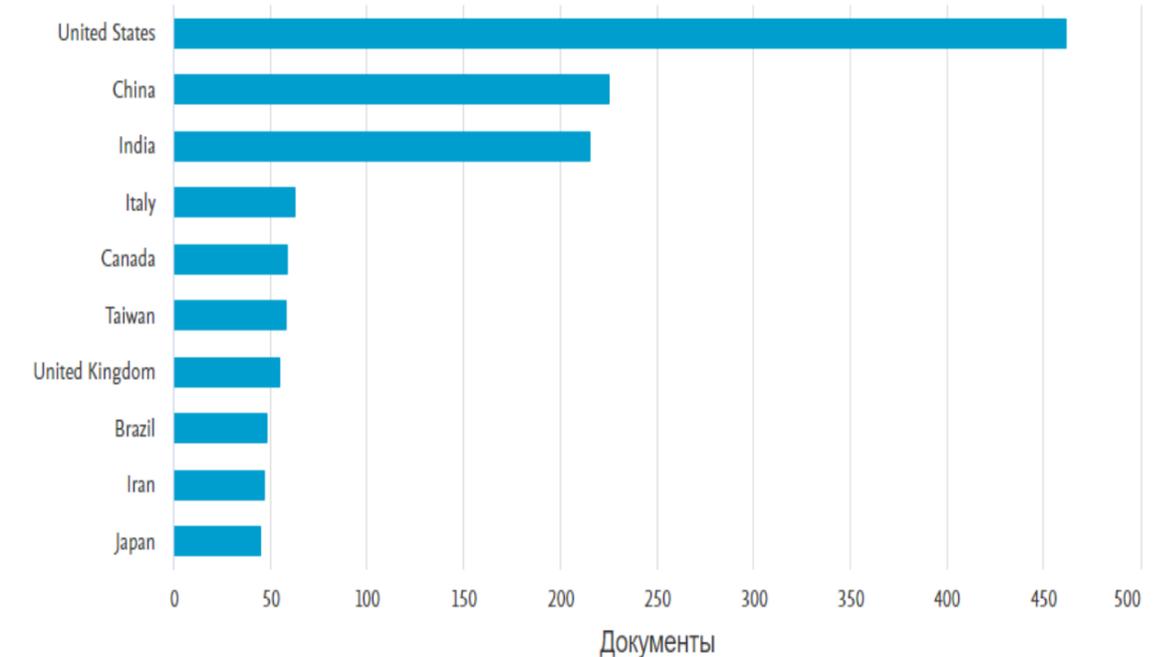
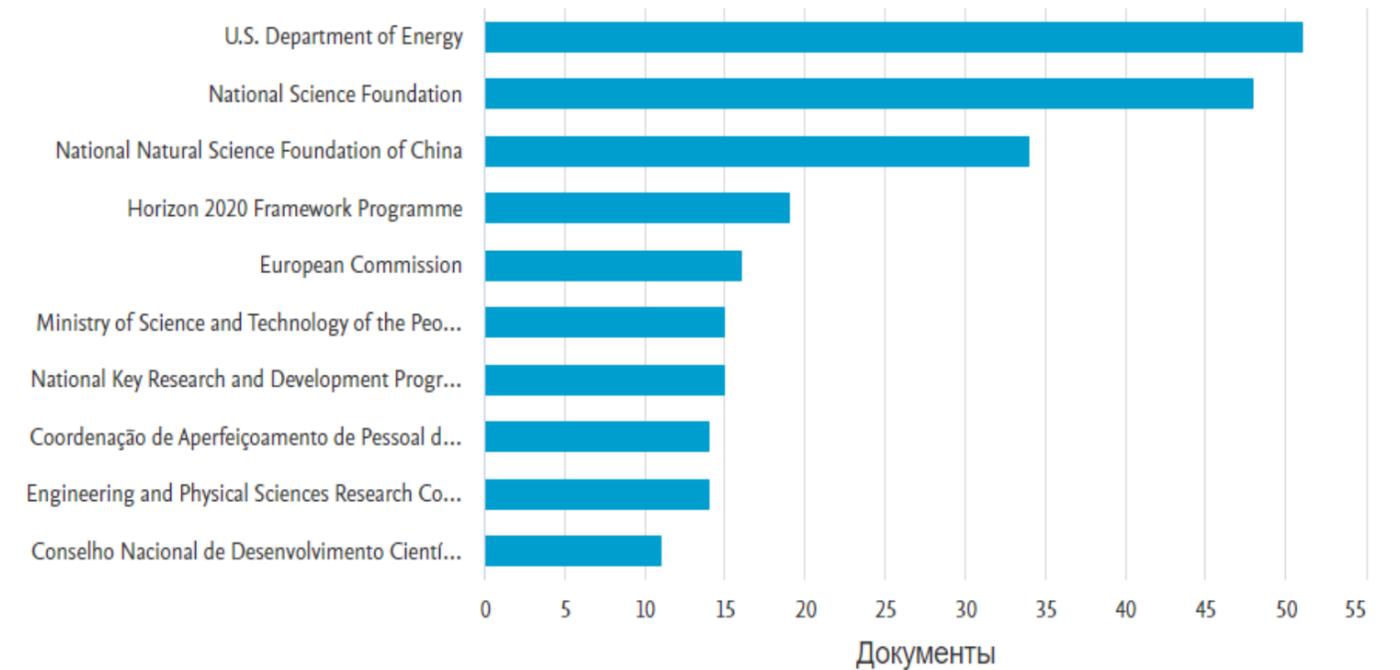
Количество статей в выборке, посвященных распределенной генерации



Анализ научной литературы

- ❑ Значительная доля публикаций представлена зарубежными источниками
- ❑ Публикации в основном посвящены тематике СМГР (WAMS), WAMPAC
- ❑ Тематика применения СВИ для автоматизации распределительных сетей среднего напряжения в наибольшем процентном соотношении представлена в российской базе данных (16 % публикаций в выборке)
- ❑ В зарубежных источниках чаще упоминается тема распределенной генерации
- ❑ Число публикаций по обсуждаемой теме с каждым годом увеличивается
- ❑ Наибольшее число публикаций принадлежит США, Китаю и Индии

Публикации по странам и финансирующим организациям

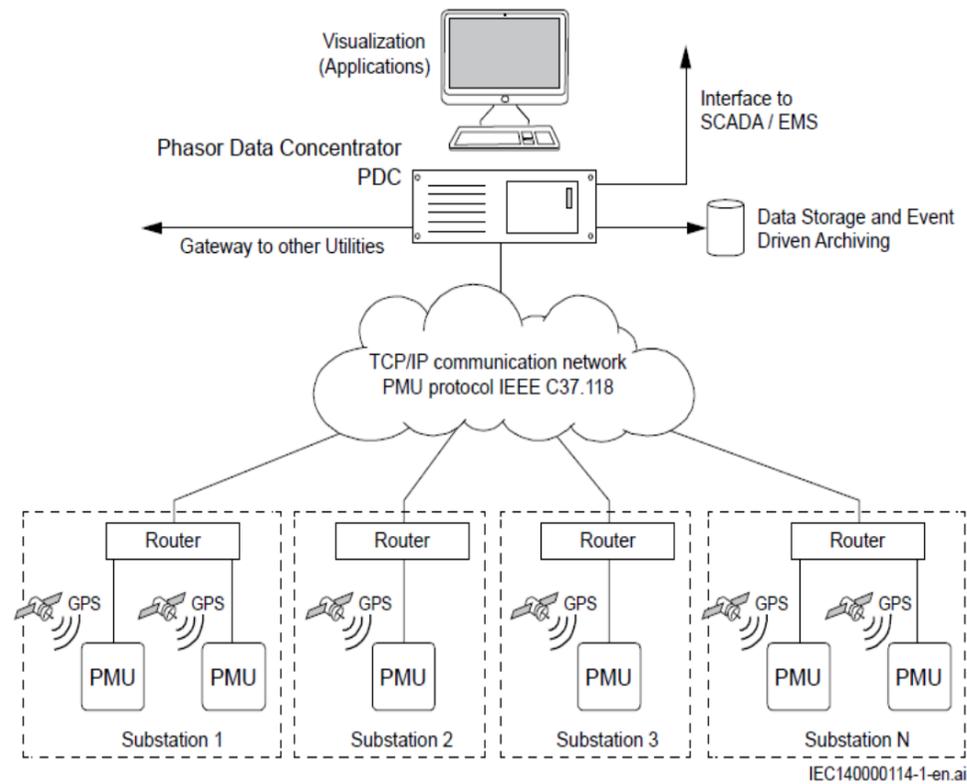


Производители УСВИ

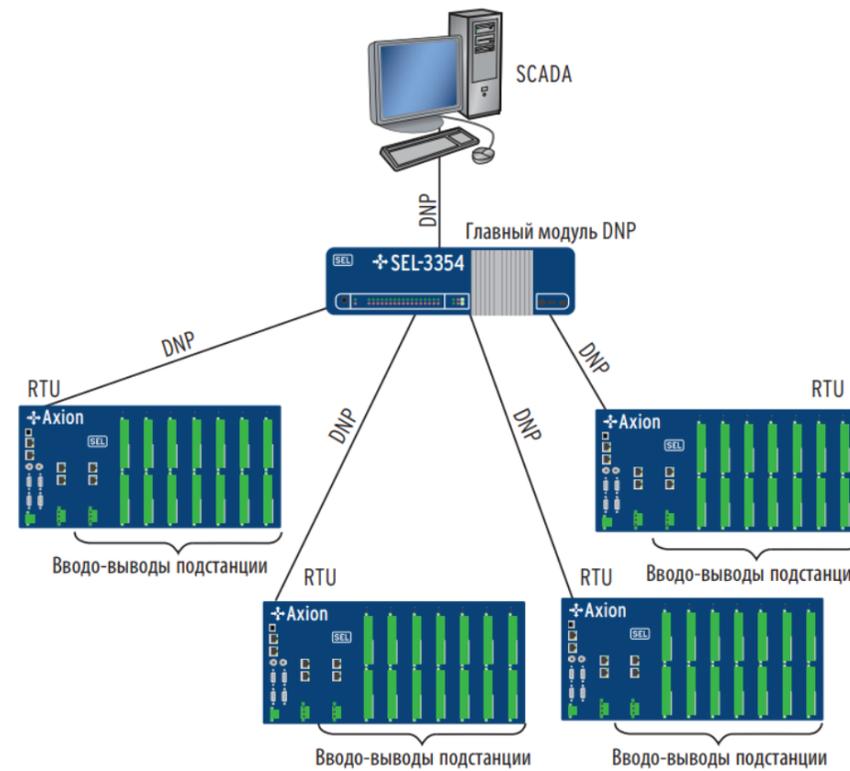
Зарубежные производители*		
Компания	Устройство	Применение
ABB	RES670 2/0 (relion 670 & 650 series)	системы управления и защиты
	PSGuard	SCADA/EMS, мониторинг энергосистемы, включая контроль колебаний мощности, напряжения, мониторинг температуры линии, архивирование данных
General Electric	MiCOM P40 Agile	контроллер присоединения
Arbiter Systems	Model 1133A Power Sentinel	измерение ЭЭ, ПКЭ, мониторинг состояния сети, СМПР
Vizimax	Vizimax PMU	системы защиты, мониторинга и управления
Macrodyne	1690, 1692, 1698, 1698E	СМПР, запись и архивирование данных
Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)	SEL-2411, SEL-T400L, SEL-411L, SEL-2240 Axion	релейная защита на базе СВИ, мониторинг состояния сети, локализация повреждений
SATEC Powerful Solutions	PM180 PMU	СМПР, запись и архивирование данных
Power Standards Lab (PSL)	PQube (μ PMU)	кибербезопасность, анализ энергопотребления, удаленное управление сетью, применение в РЭС с распределенной генерацией, ВЭС
Siemens	SIGUARD PDP (phasor data processor)	мониторинг состояния сети, анализ ПКЭ, локализация повреждений

Производители УСВИ

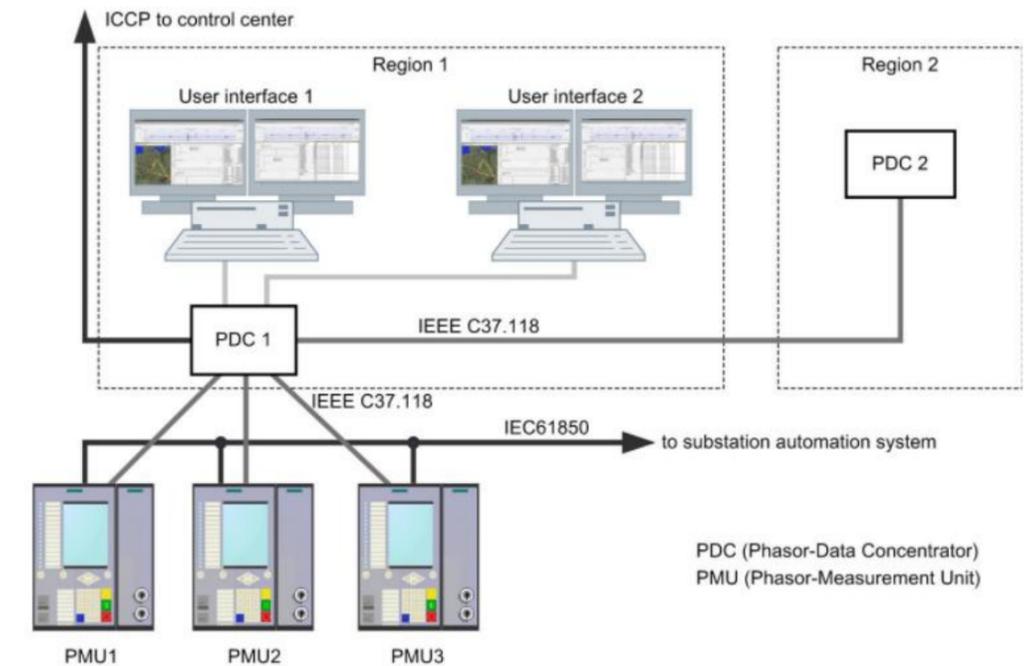
RES670 (ABB)



SEL-2240 Axion (SEL)



SIGUARD PDP (Siemens)



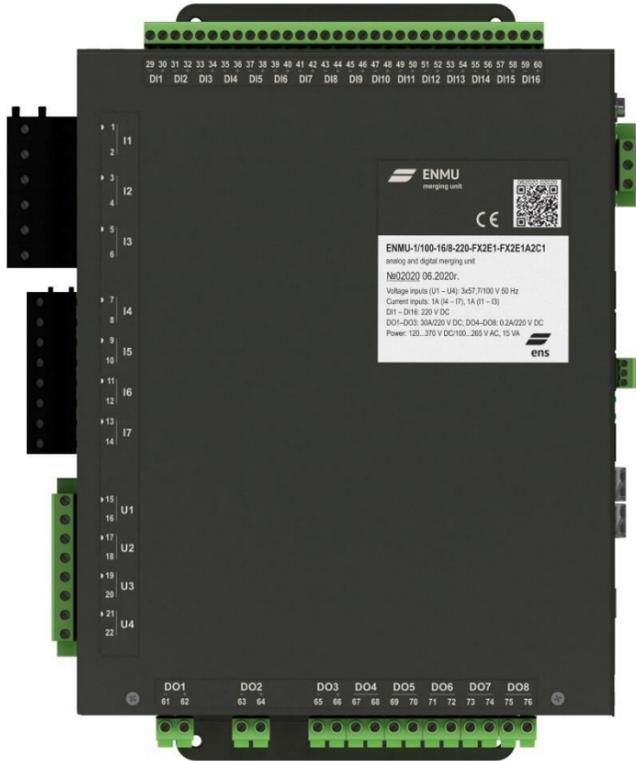
Производители УСВИ

Отечественные производители

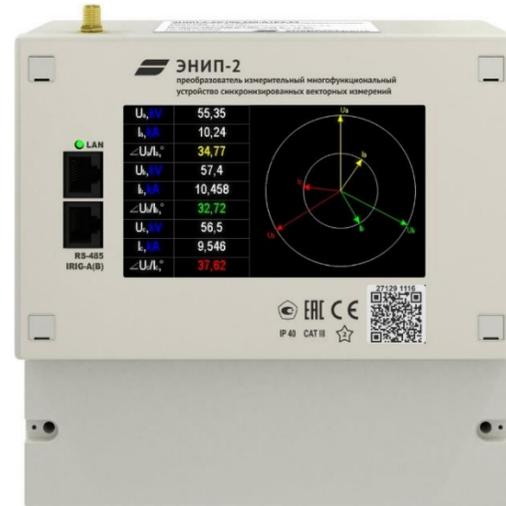
Компания	Устройство	Применение
ООО «Инженерный центр Энергосервис»	ЭНИП-2 УСВИ (PMU)	СМПР, АСУ ТП и АИИС подстанций, режимная и противоаварийная автоматика энергосистем
	ESM	учет ЭЭ, расчет ПКЭ, измерение параметров сети
	ENMU	ПАС (SAMU)
	ЭНЛЗ	локализация повреждений в РЭС
ООО «Прософт-Системы»	ТПА-02	СМПР, измерение, регистрация и архивирование параметров штатных и аварийных электрических процессов в оборудовании энергообъектов
ГК «РТ-Софт»	МИП-02	измерение параметров трехфазной электрической сети, АСУ ТП, СОТИ, СМПР
ООО «Парма»	ЦРАП РП4.11, РП4.12	многоканальный регистратор аварийных событий, устройство ОМП, СМПР, измерение параметров сети

Производители УСВИ

ENMU (ES)



ЭНИП-2 (ES)



ТПА-02 (Прософт)



РП4.11 (ПАРМА)



ESM (ES)



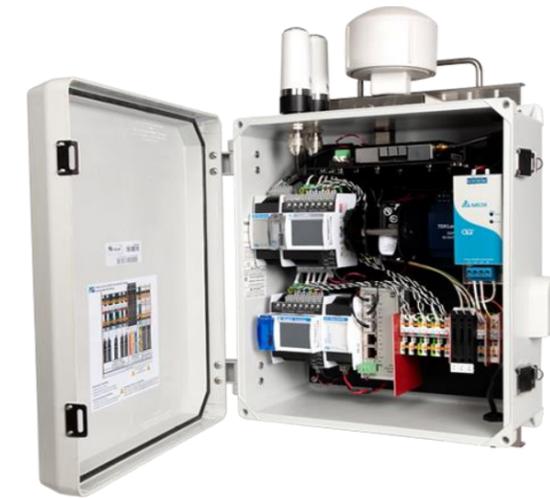
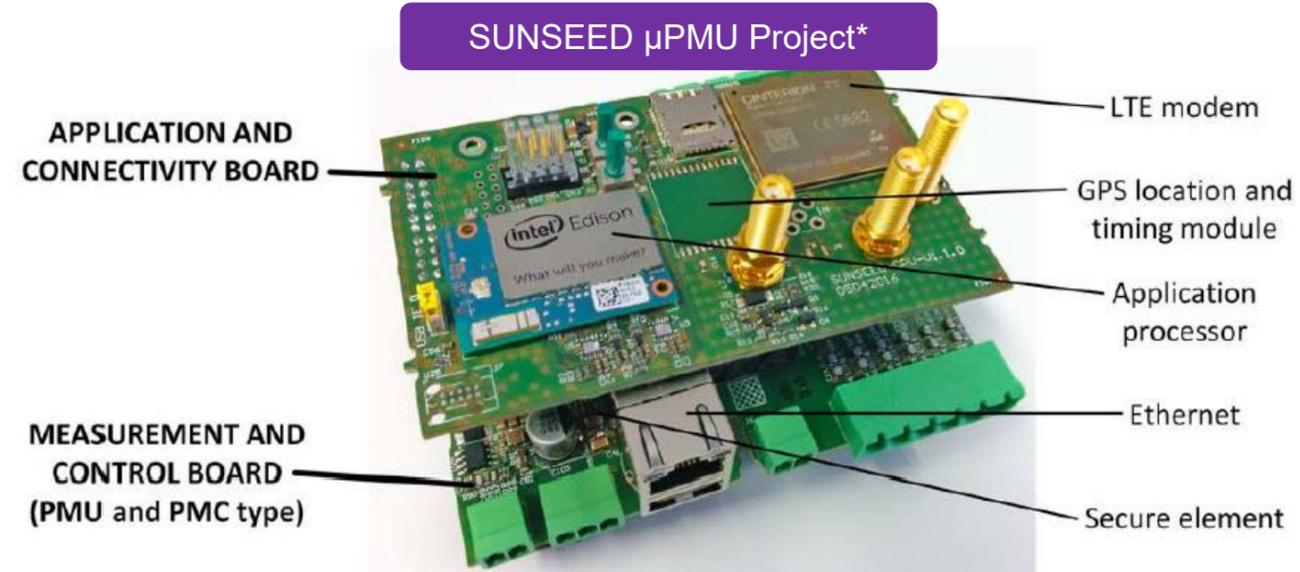
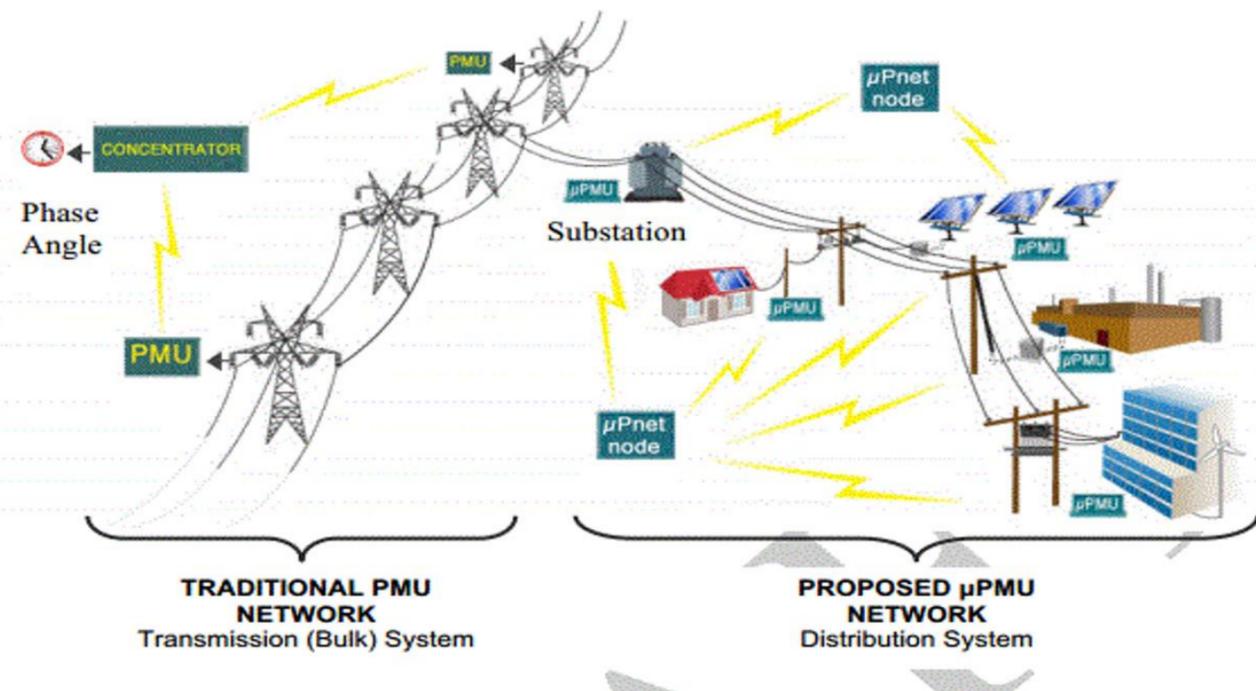
ЭНЛЗ (ES)



МИП-2 (РТ-Софт)

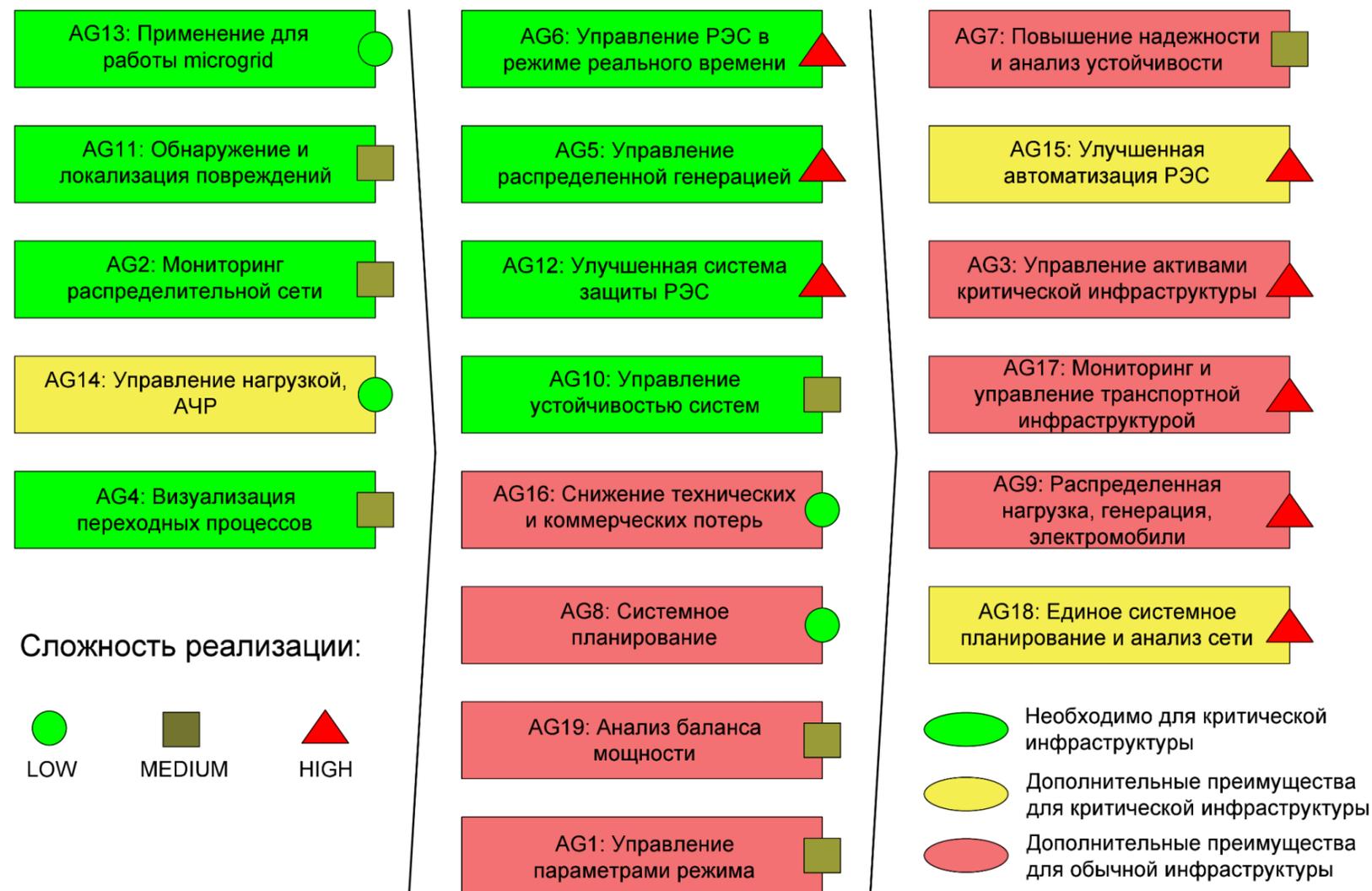


microPMU и μ PMU



Оценка инвестиционной привлекательности УСВИ

Предполагаемый путь промышленного внедрения УСВИ



Инвестиционная привлекательность направлений применения СВИ

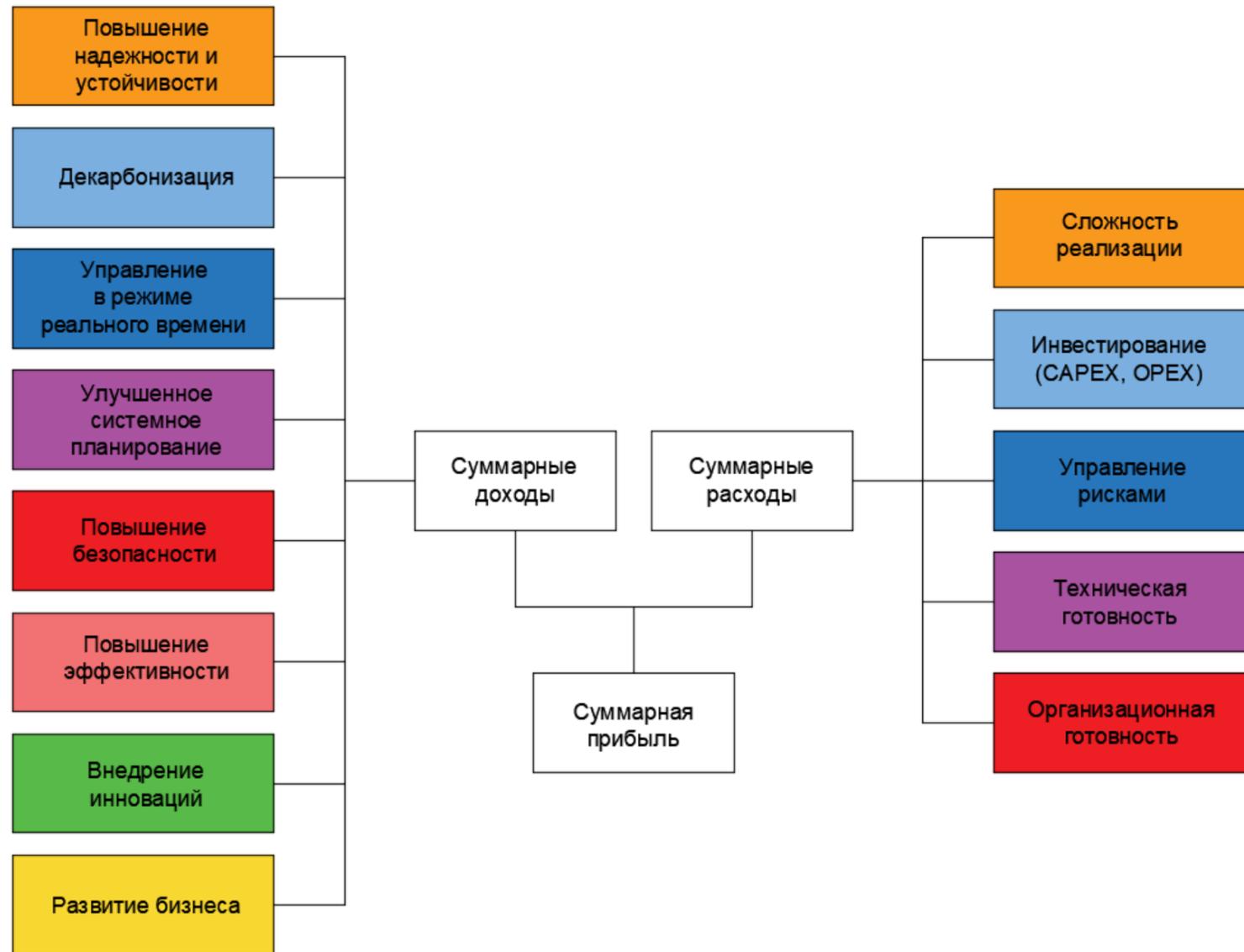
Обозначение (NASPI)	Описание	Уровень	Оценка
AG13	Применение СВИ для работы microgrid	высокий	1.36
AG11	Обнаружение и локализация повреждений	высокий	1.32
AG2	Мониторинг распределительной сети	высокий	1.24
AG14	Управление нагрузкой сети, АЧР	высокий	1.23
AG4	Визуализация переходных процессов	высокий	1.23
AG6	Управление РЭС в режиме реального времени	средний	1.12
AG5	Управление распределенной генерацией	средний	1.09
AG12	Улучшенная система защиты РЭС	средний	1.07
AG10	Управление устойчивостью систем	средний	1.06
AG16	Снижение технических и коммерческих потерь	средний	1.03
AG8	Системное планирование	средний	1.02
AG19	Анализ баланса мощности	средний	1.01
AG1	Управление параметрами режима	средний	0.98
AG7	Повышение надежности и анализ устойчивости	средний	0.93
AG15	Улучшенная автоматизация РЭС	средний	0.90
AG3	Управление активами	средний	0.89
AG17	Управление транспортной инфраструктурой	средний	0.87
AG9	Электромобили	средний	0.80
AG18	Единое системное планирование и анализ сети	низкий	0.70

Критическая инфраструктура – информационные и автоматизированные системы, телекоммуникационные сети, управление технологическими процессами в сфере здравоохранения, экономики, ТЭК, атомной и военной промышленности

AG1 – AG19 – направления (группы) применения УСВИ согласно техническому отчету **NASPI***

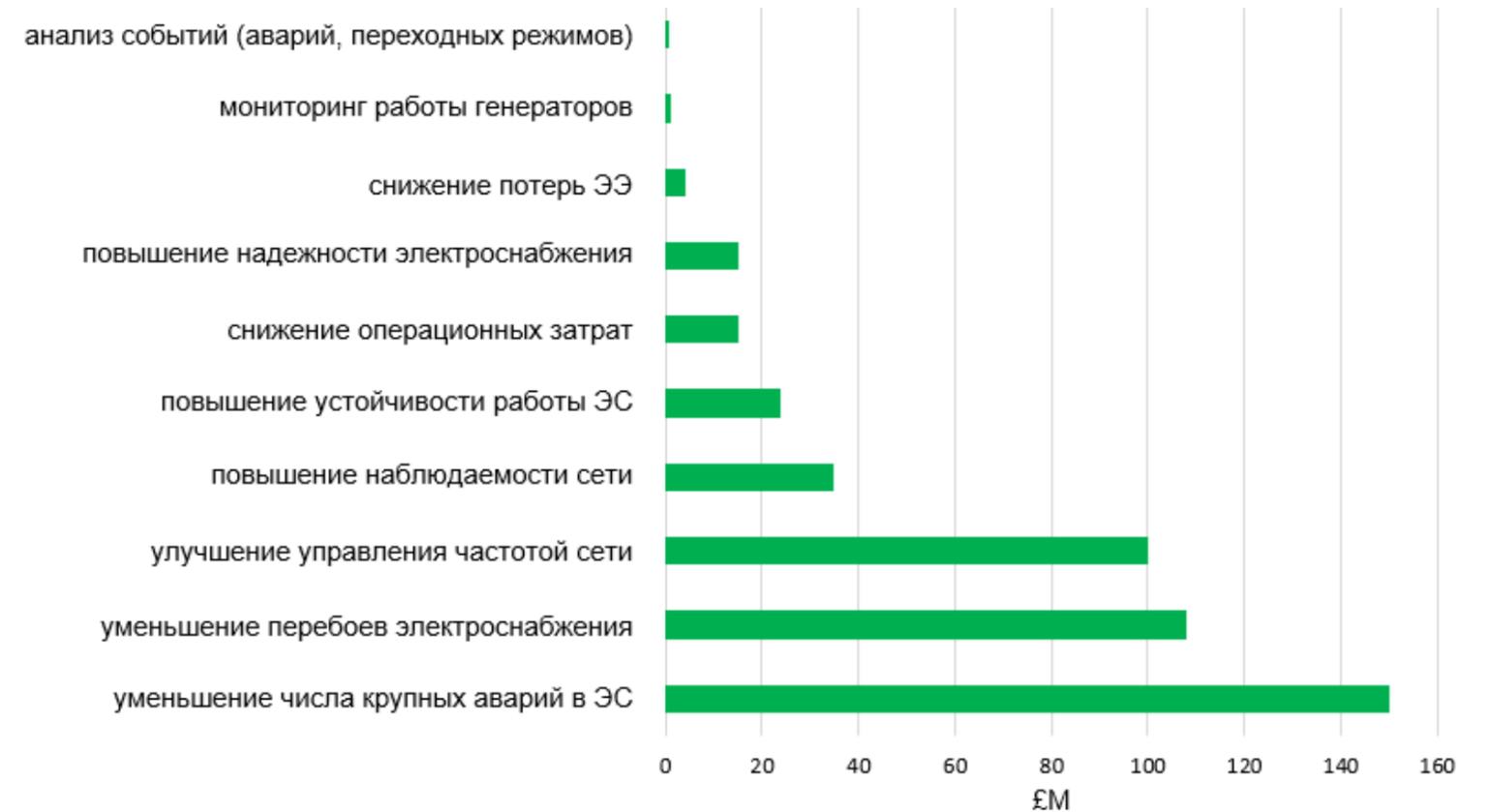
Оценка инвестиционной привлекательности УСВИ

Основные статьи доходов и расходов при внедрении УСВИ



- при оценке расходов следует учитывать, помимо инвестиционных затрат на внедрение УСВИ, затраты на технические и организационные условия (необходимые затраты на изменение инфраструктуры сети: новое оборудование, каналы связи и др.)

Предполагаемый экономический эффект применения PMU (PMU COST & BENEFITS STUDY, CAPER Meeting, August 7 & 8, 2017)



- наибольший экономический эффект достигается за счет снижения числа крупных аварий в энергосистеме и уменьшения числа перебоев электроснабжения крупных потребителей
- некоторые направления для применения УСВИ требуют регулирования на верхнем уровне управления системой электроснабжения, так как эффект от их реализации виден только в долгосрочной перспективе

Существующие ограничения для применения УСВИ

Применение УСВИ

Сети высокого напряжения

наибольшая доля установленных УСВИ

средний срок окупаемости

меньшая сложность реализации

приемлемый уровень капитальных затрат

государственное регулирование
Приказ Минэнерго РФ № 101 от 13.02.2019
ГОСТ Р 59365-2021

Сети среднего напряжения

небольшая доля установленных УСВИ

большой срок окупаемости

сложность реализации зависит от текущей инфраструктуры сети

высокий уровень капитальных затрат

государственное регулирование в настоящее время практически отсутствует, для внедрения УСВИ у сетевых организаций нет соответствующей мотивации из-за больших капитальных затрат, неочевидного экономического эффекта в краткосрочной и среднесрочной перспективе

Сети низкого напряжения

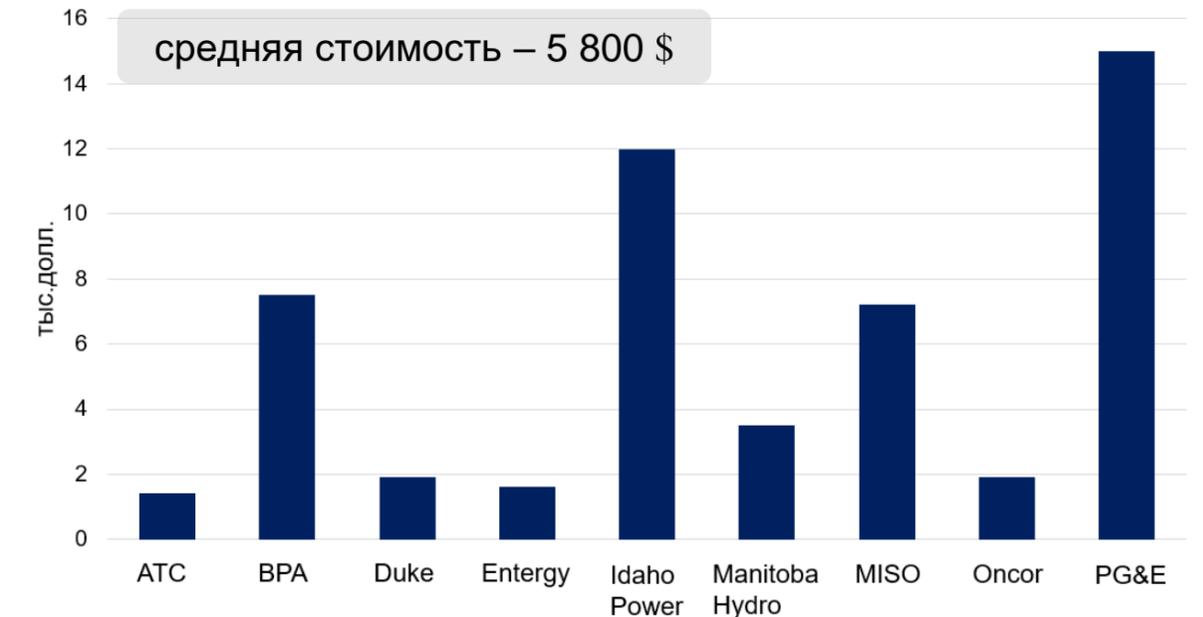
УСВИ практически отсутствуют

очень большой срок окупаемости

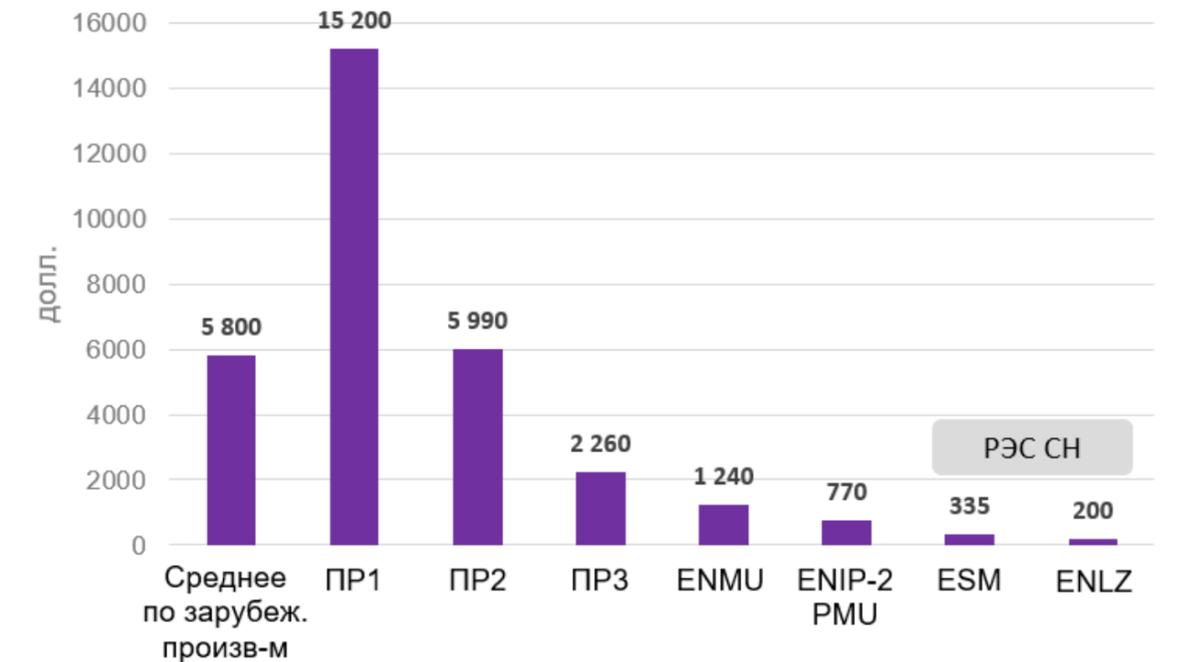
инфраструктура большинства сетей не приспособлена к внедрению УСВИ

капитальные затраты превышают стоимость оборудования сети

Стоимость PMU по электроснабжающим организациям США (PMU COST & BENEFITS STUDY, CAPER Meeting, August 7 & 8, 2017)



Стоимость УСВИ отечественных производителей (по данным на IV квартал 2020 г.)



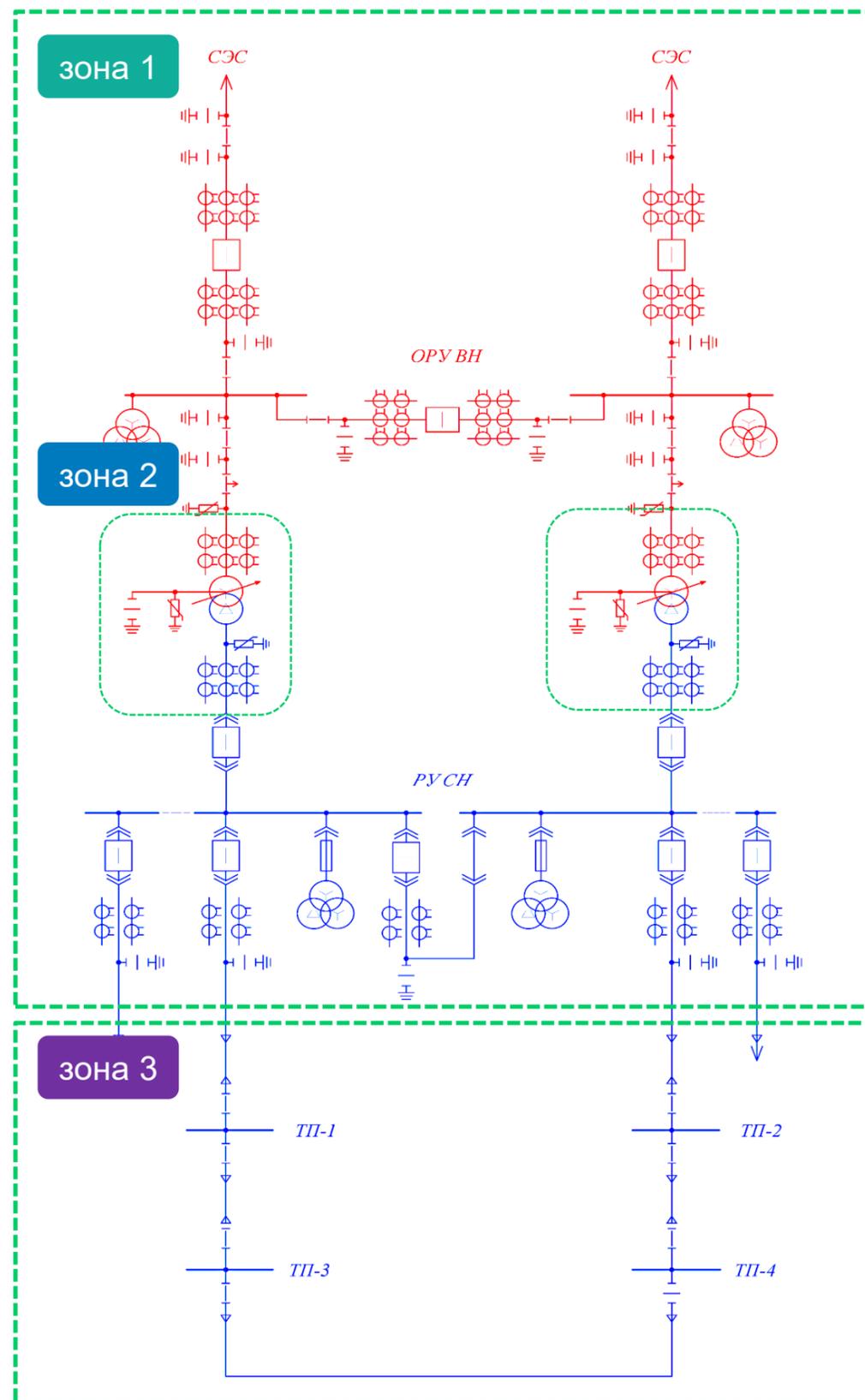
Выводы

1. Число публикаций по теме применения технологии СВИ в распределительных сетях среднего напряжения с каждым годом увеличивается.
2. В мире существует большое количество производителей УСВИ различного назначения и конфигурации, при этом доступные решения для распределительных сетей практически отсутствуют.
3. Оценка инвестиционной привлекательности УСВИ (NASPI) показывает перспективность внедрения технологии СВИ в РЭС.
4. Необходима разработка специализированных УСВИ для РЭС среднего напряжения.



Раздел II. Общая концепция применения СВВ в РЭС

Направления применения УСВИ в РЭС

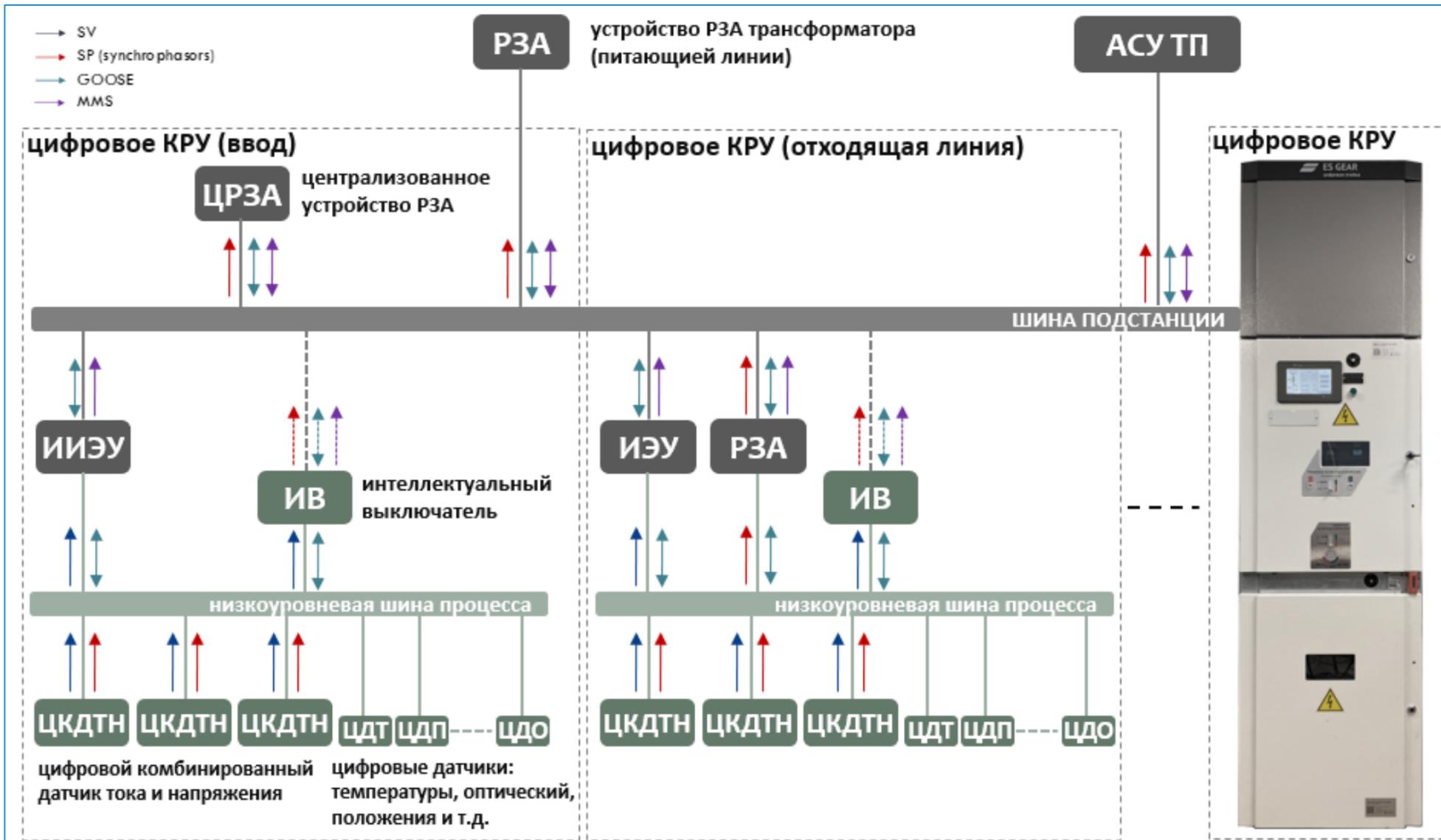


PACS (Protection, automation, and control system) – система защиты, автоматизации и управления

FLISR (Fault location, isolation, and service restoration) – система автоматического восстановления электроснабжения потребителей (CABC)

Автоматизация центров питания РЭС

Архитектура РЗА ПС/РП с применением УСВИ



Трехуровневая распределенная система РЗА: ИВ, РЗА, ЦРЗА.

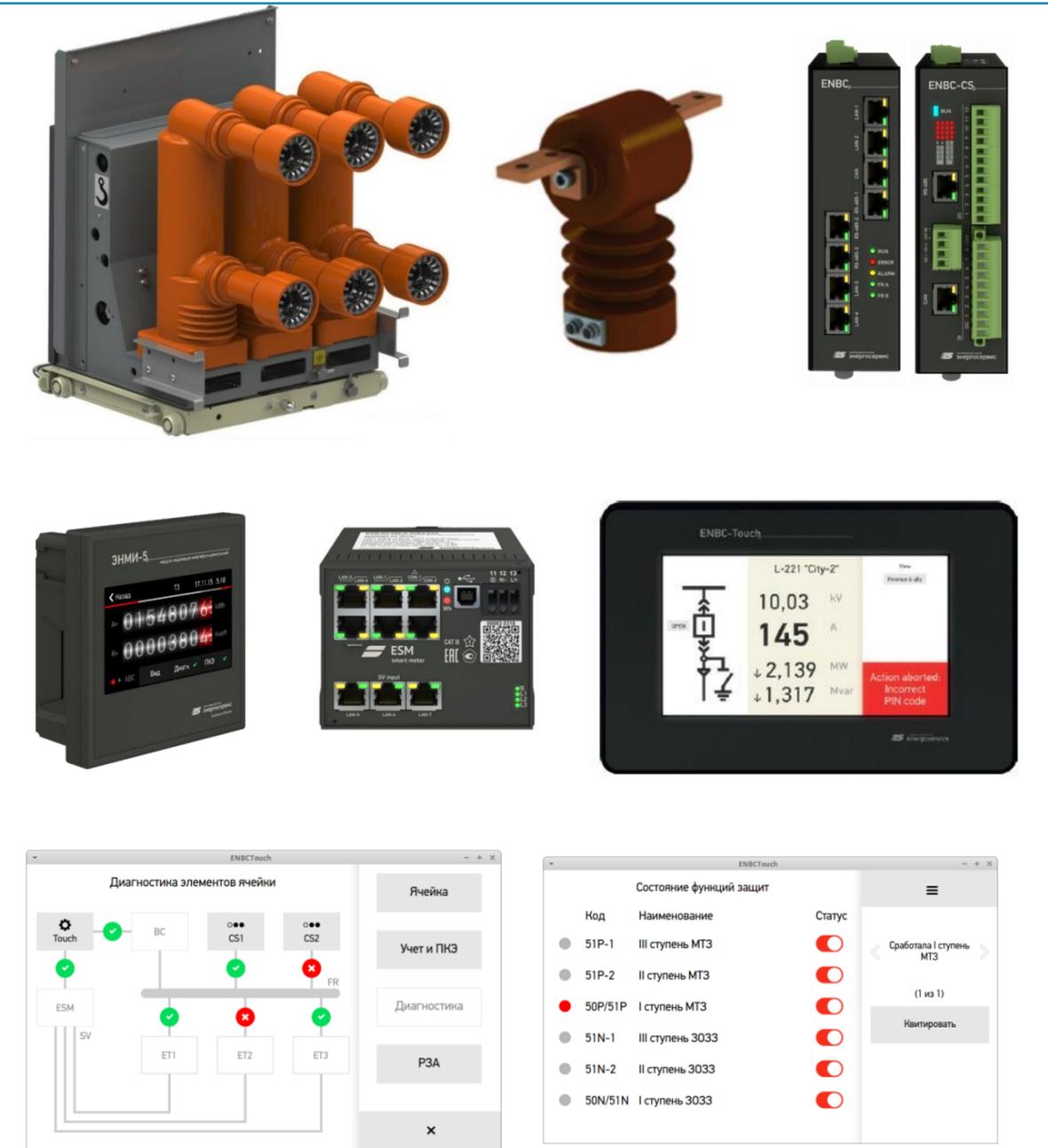
Преимущественное применение синхровекторов (SP) вместо выборочных значений (SV) токов и напряжений, а также замещение значительной части MMS-сообщений

ЦКДТН цифровые комбинированные датчики тока и напряжения (измерения синхровекторов тока и напряжения),

ИВ интеллектуальный выключатель со встроенной резервной защитой,

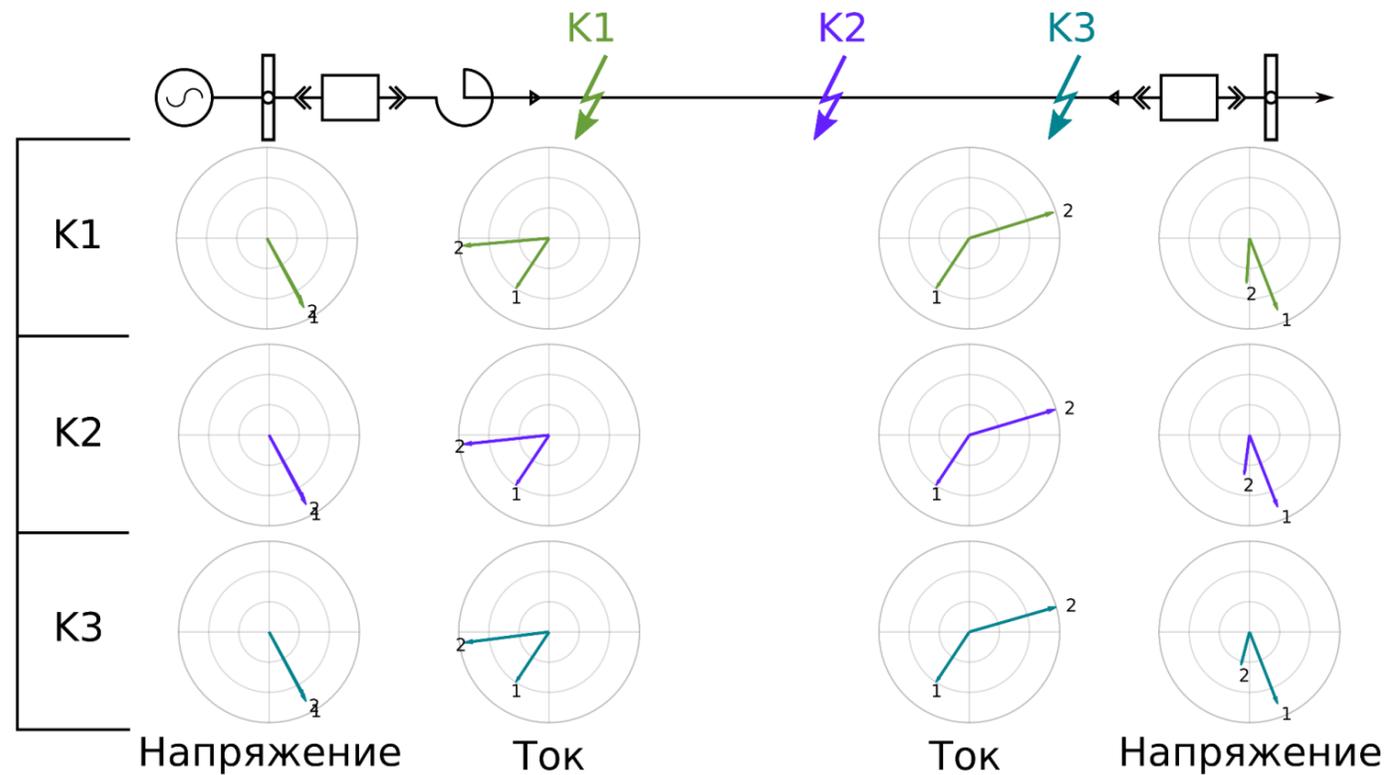
Цифровые датчики: положения ЦДП, температуры ЦДТ, дуговой защиты ЦДО

Основные компоненты цифрового КРУ



Защита линии

Защита линии на базе СВВ

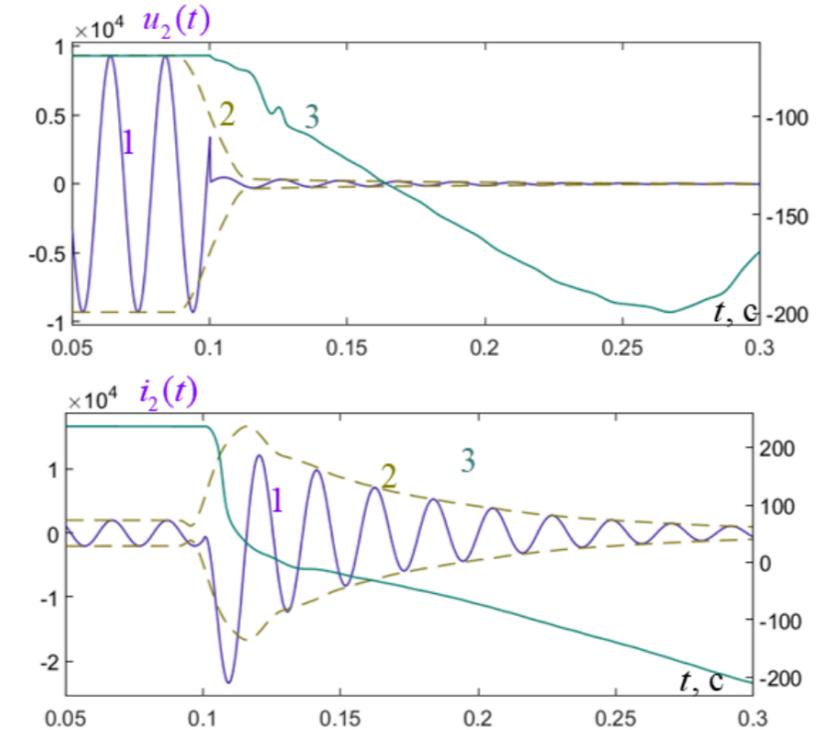
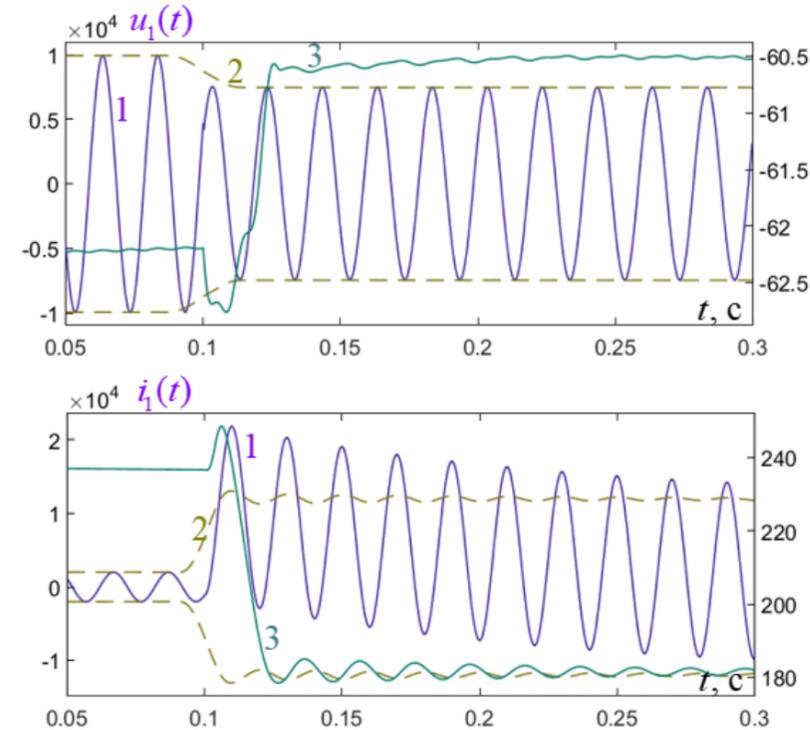


1 – нормальный режим;
2 - по истечении 10 мс после КЗ

защита с абсолютной селективностью

повышение чувствительности
за счет синхровекторов напряжения

Графики напряжения и тока при КЗ в середине КЛ



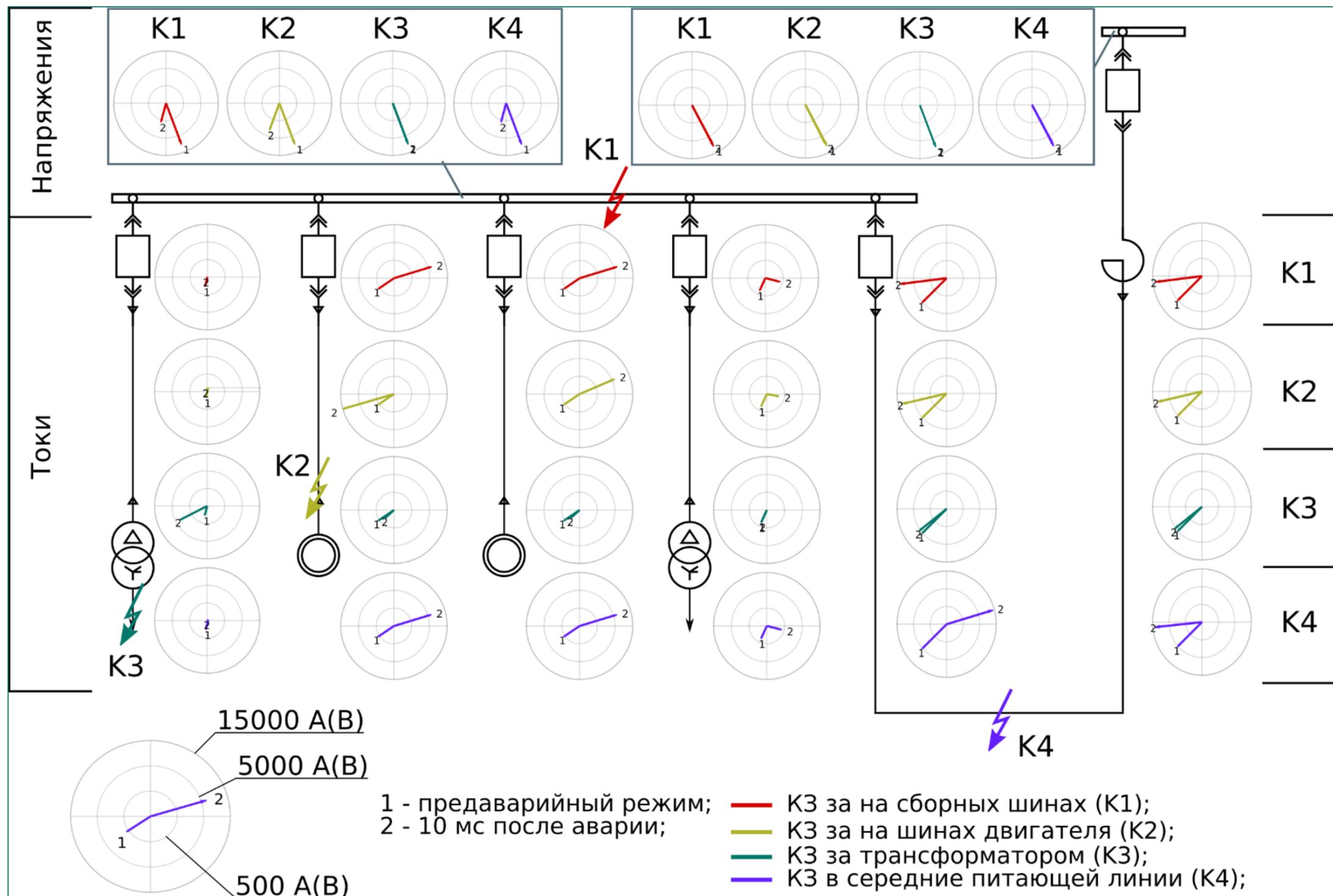
кривая 1 – мгновенные значения напряжения и тока
вначале (индекс 1) и конце (индекс 2) линии

кривые 2 – графики модулей синхровекторов

кривые 3 – графики аргументов синхровекторов

обеспечение работы защиты при двустороннем питании,
распределенной генерации

Защита шин



защита шин с абсолютной селективностью

дифференциальный принцип с контролем аргументов и модулей синхровекторов присоединений

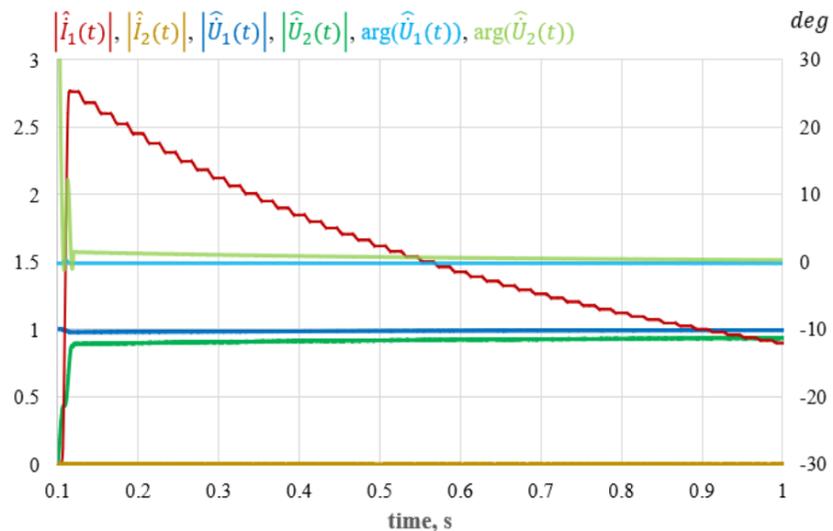
наличие горизонтальных связей между устройствами РЗА, быстрый обмен дискретными и аналоговыми сообщениями

возможность идентификации параметров схемы замещения и параметров эквивалентной энергосистемы

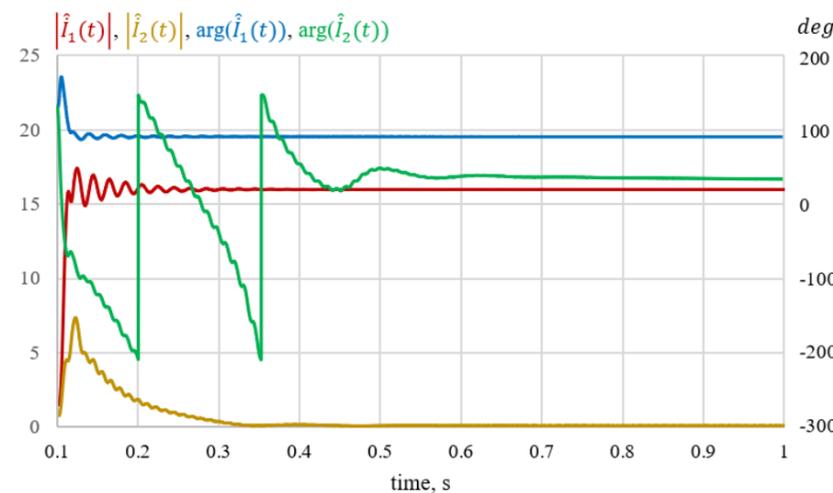
распределенные системы РЗА с эффективным резервированием

Защита силового трансформатора

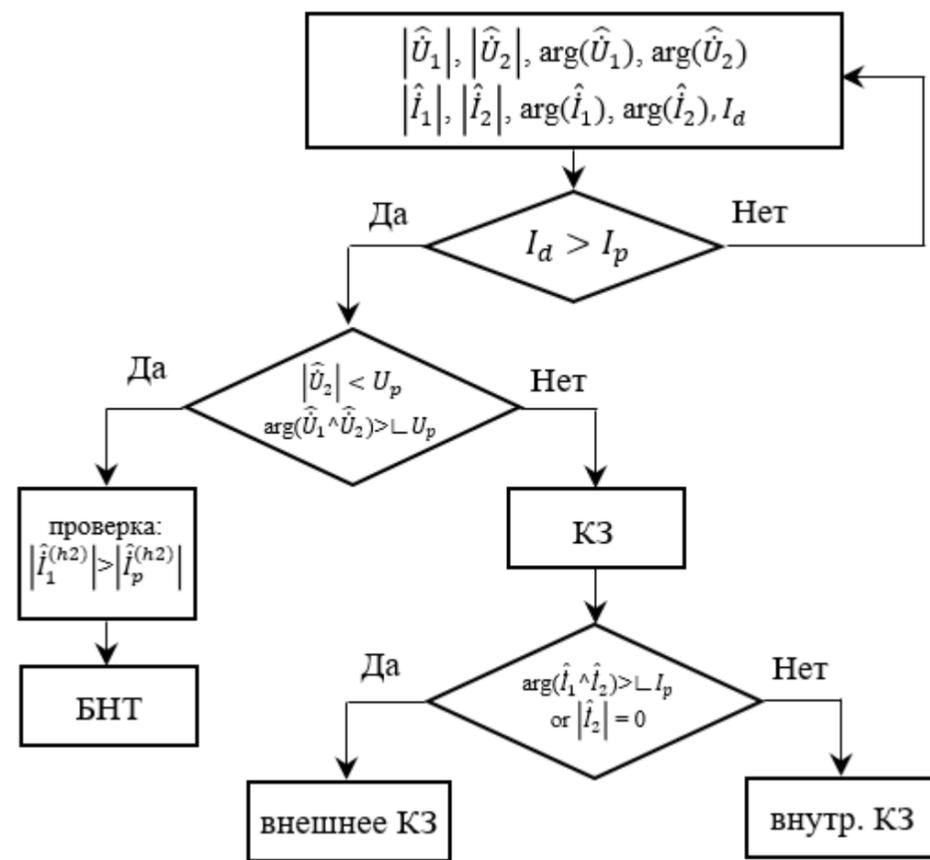
Включение СТ на холостой ход



Режим внутреннего КЗ

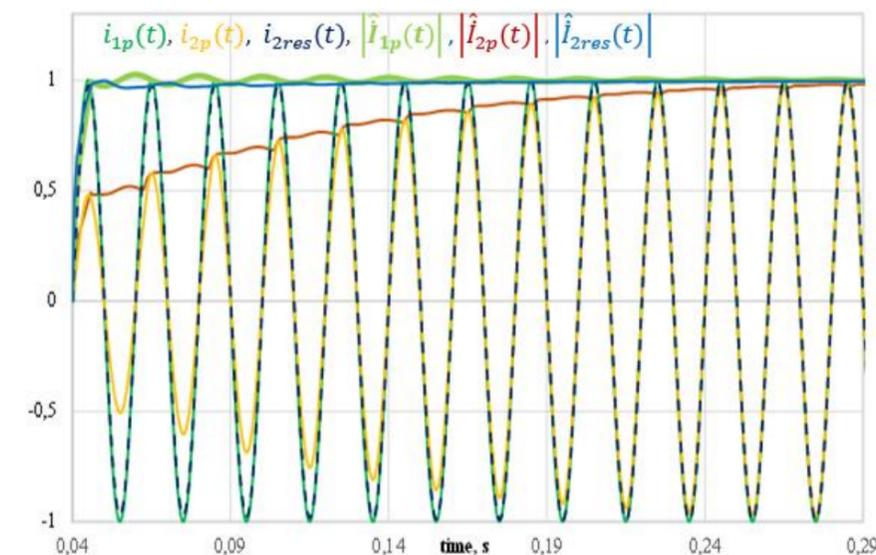


Алгоритм на базе СВИ



$|\hat{U}_1|, |\hat{U}_2|$ - модули синхровекторов напряжения ВН и НН
 $\arg(\hat{U}_1), \arg(\hat{U}_2)$ - аргументы синхровекторов напряжения ВН и НН
 $|\hat{I}_1|, |\hat{I}_2|$ - модули синхровекторов тока ВН и НН
 $\arg(\hat{I}_1), \arg(\hat{I}_2)$ - аргументы синхровекторов тока ВН и НН
 I_d - дифференциальный ток
 $I_p, U_p, \perp U_p, \hat{I}_p^{(h2)}$ - расчетные уставки
 $\hat{I}_1^{(h2)}$ - синхровектор тока 2-ой гармоники

Восстановление вторичного тока ТТ при насыщении его сердечника



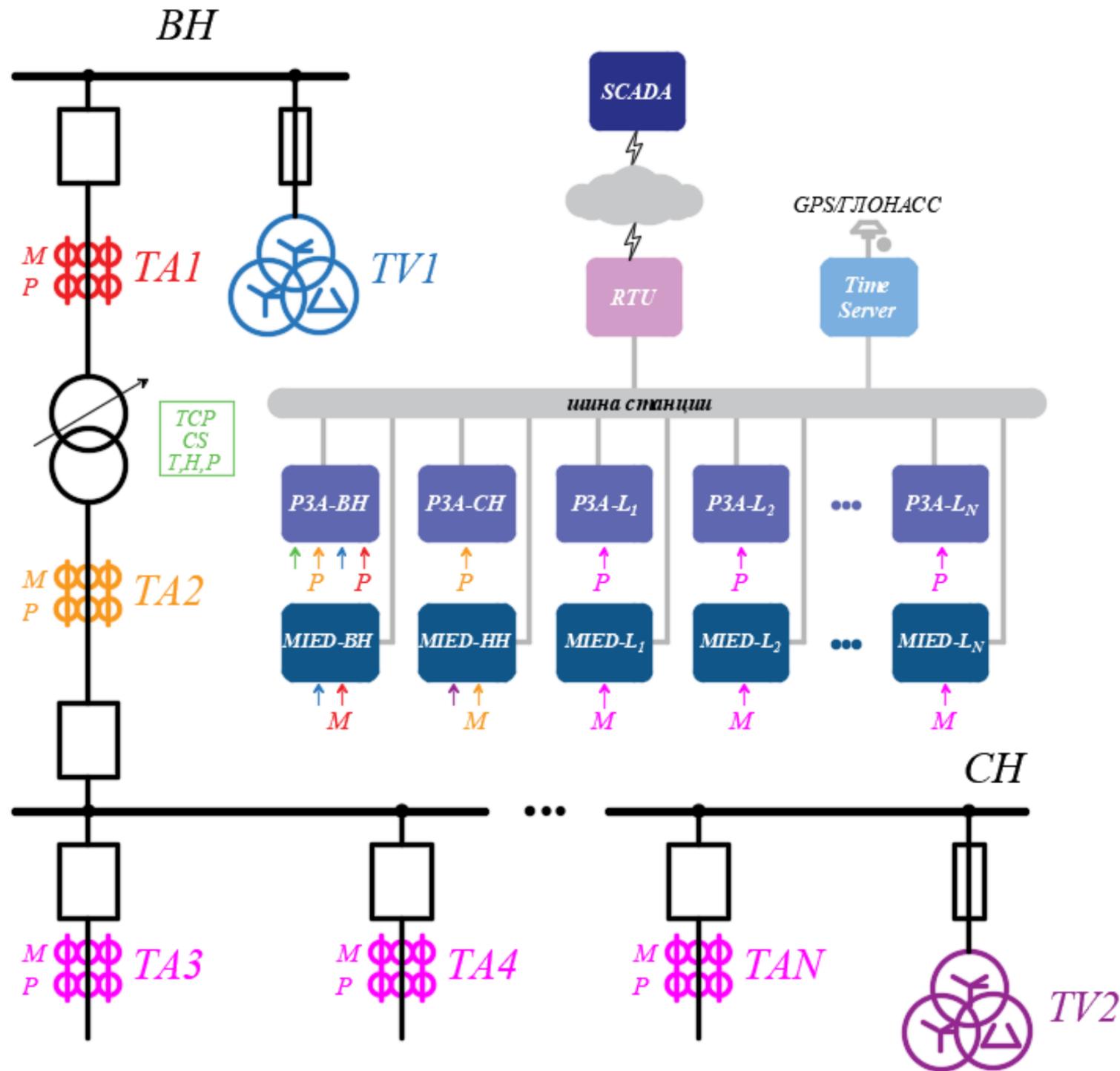
дифференциальная защита трансформатора

дополнительные критерии распознавания режимов БНТ, внешнего и внутреннего КЗ

алгоритм восстановления вторичного тока ТТ при насыщении его сердечника

мониторинг состояния трансформатора

Структурная схема автоматизации ПС



- реализация единой структуры подсистем автоматизации ПС (РЗА, телемеханика, мониторинг состояния оборудования, мониторинг перегрузочной способности, учет ЭЭ, мониторинг ПКЭ и т.д.)
- использование многофункциональных устройств с поддержкой СВИ и технологии цифровой ПС
- принцип двух ИЭУ на одно присоединение (РЗА + многофункциональный IED)
- реализация системы мониторинга трансформатора на базе СВИ (объединение функций защиты и мониторинга трансформатора в одном устройстве)
- реализация защит с абсолютной селективностью (защита шин, защита трансформатора, защита отходящих присоединений) → преимущество для РЭС с распределенной генерацией и при наличии нескольких источников питания

М – обмотка ТТ измерительных цепей; **Р** – обмотка ТТ цепей защиты

Выводы

1. Можно выделить три основных зоны применения СВИ в РЭС: центры питания РЭС, силовые трансформаторы, кабельные и воздушные сети.
2. Применение СВИ позволяет значительно повысить чувствительность и селективность РЗА сборных шин подстанции, отходящих присоединений, силового трансформатора, реализовать принципы защиты с абсолютной селективностью.
3. Применение синхронизированных измерений является основной для построения систем защиты и автоматики РЭС с распределенной генерацией.
4. СВИ может быть использовано для мониторинга силового оборудования подстанций, в том числе мониторинга состояния силового трансформатора, для восстановления вторичного тока электромагнитных трансформаторов тока.
5. Предлагается комплексный подход для внедрения УСВИ в РЭС (применение многофункциональных устройств).



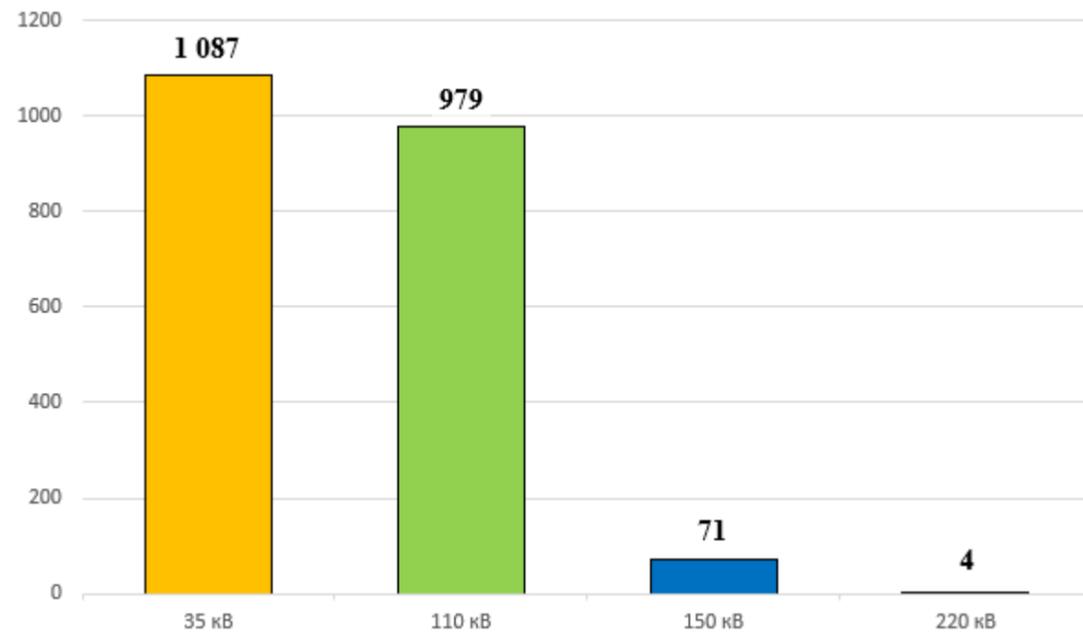
Раздел III. Мониторинг состояния трансформатора

Основные механизмы повреждений силовых трансформаторов

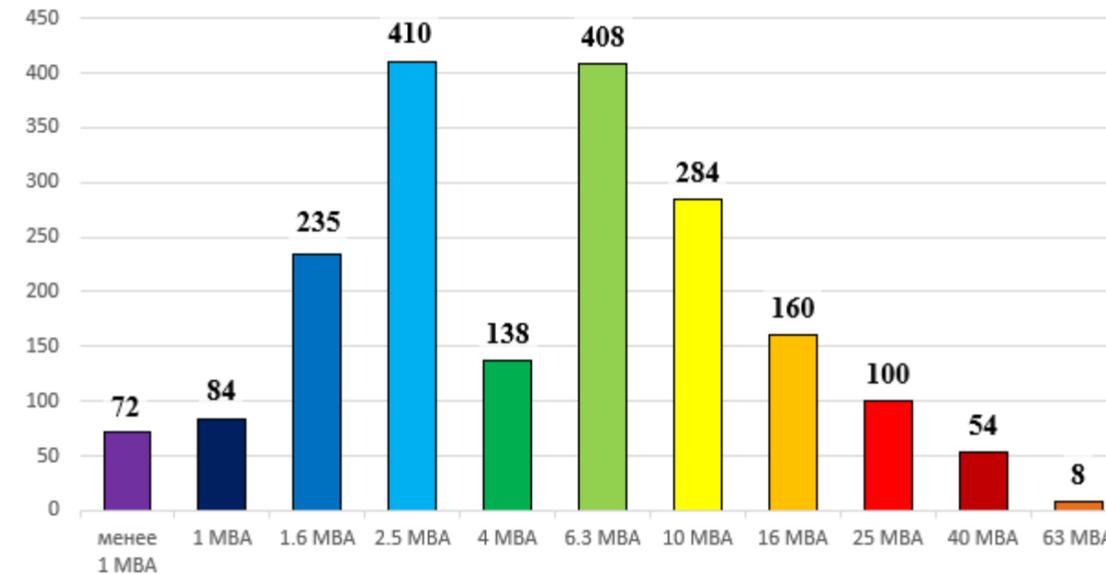
Механизм повреждения	Виды дефектов	Диагностический параметр
<p>Электромагнитные силы, вызванные током КЗ, изменяют геометрию обмотки и соответственно величину индуктивного сопротивления продольной ветви</p>	<p>Деформация обмотки</p>	<p>Изменение индуктивного сопротивления продольной ветви</p>
<p>Повреждение изоляции образует контур, сцепленный с основным магнитным потоком. Результирующий циркулирующий ток вызывает увеличение активного и индуктивного компонентов тока намагничивания и рост потерь холостого хода</p>	<p>Межвитковое замыкание: а) полное замыкание двух или нескольких витков; б) замыкание двух или нескольких параллельных проводников, принадлежащих разным виткам</p>	<p>Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода</p>
<p>Повреждение изоляции образует контур, сцепленный с потоком рассеяния. Результирующий циркулирующий ток вызывает увеличение дополнительных потерь короткого замыкания</p>	<p>Замыкание параллельных проводников; витковые замыкания в обмотках трансформатора, встроенных в трансформатор реакторов и регулировочных трансформаторов; повреждение изоляции прессующих винтов</p>	<p>Изменение потерь короткого замыкания</p>
<p>Ухудшенный контакт и перегрев контактов отводов РПН или ПБВ вызывают образование пленки, эрозию поверхностей, увеличение переходного сопротивления</p>	<p>Перегрев и эрозия контактов</p>	<p>Изменение активного сопротивления продольной ветви</p>
<p>Механическое смещение или перегрев проводника вызывает его обрыв или перегорание и соответствующее изменение сопротивления токоведущей цепи</p>	<p>Обрыв цепи</p>	<p>Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода; изменение активного сопротивления продольной ветви</p>
<p>Механические воздействия или перевозбуждение могут вызывать повреждение изоляции элементов магнитопровода и образование контура, сцепленного с основным магнитным потоком. Результирующий циркулирующий ток вызывает увеличение активного и индуктивного компонентов тока намагничивания и рост потерь холостого хода.</p>	<p>Закорачивание листов электротехнической стали, нарушение изоляции стяжных шпилек, ярмовых балок и др., когда в результате этого образуются контуры короткозамкнутых витков, сцепленных с основным потоком; неправильное заземление магнитопровода; межвитковые замыкания и замыкания параллельных проводников, принадлежащих разным виткам; нарушение изоляции прессующих винтов, смещение обмоток, а также дефекты РПН, вызывающие изменение магнитного сопротивления на участке магнитной цепи</p>	<p>Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода</p>

Техническое состояние силовых трансформаторов РЭС

Число СТ по уровню ВН*



Распределение СТ по установленной мощности



длительный срок эксплуатации

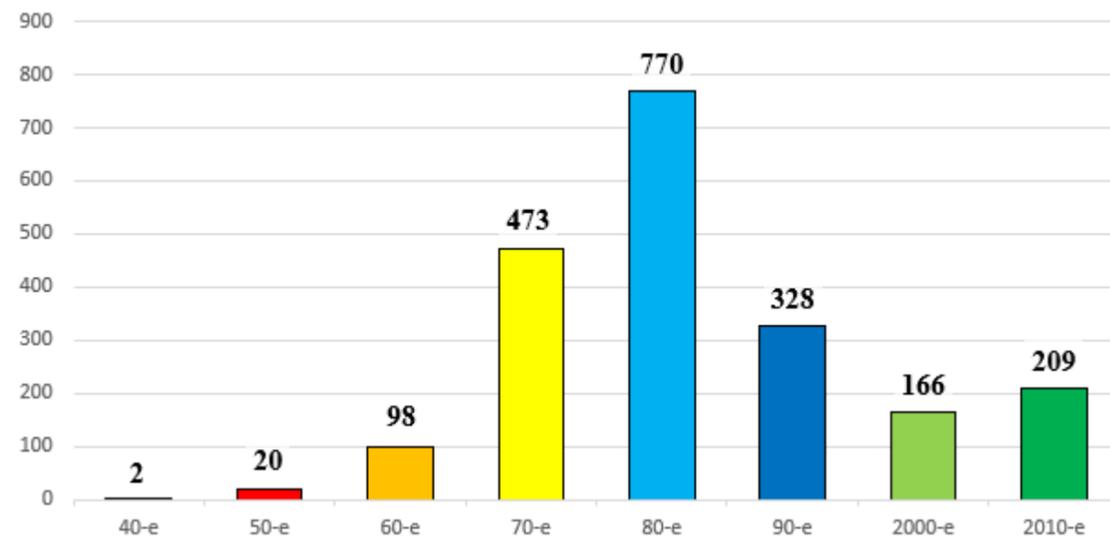
малая остаточная стоимость

отсутствие прямых требований для установки СМСТ

стоимость СТ сопоставима со стоимостью обычного УСВИ

требуется поиск рационального решения для РЭС

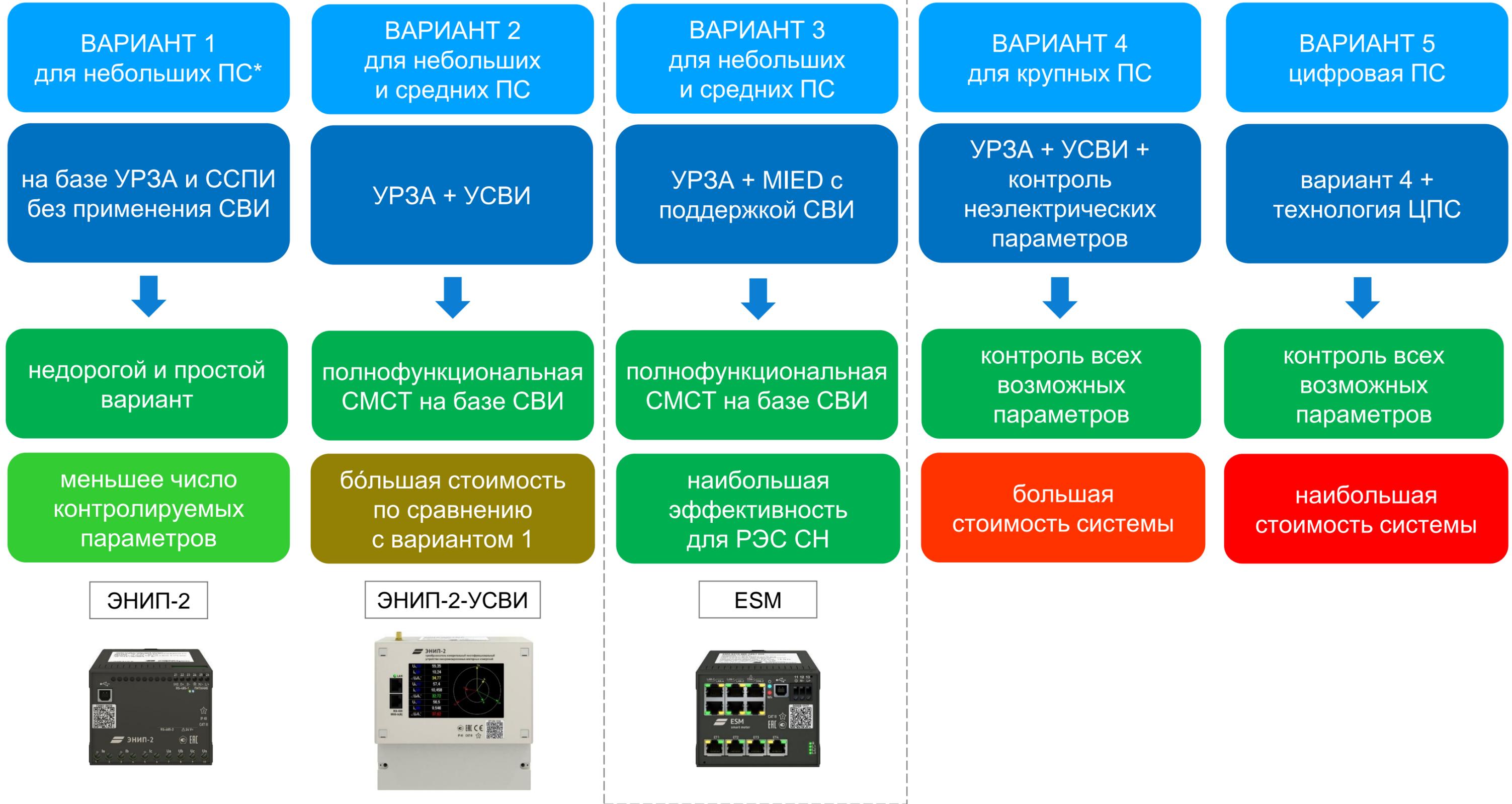
Распределение СТ по времени ввода в эксплуатацию



Укрупненные стоимостные показатели СТ, тыс.руб.

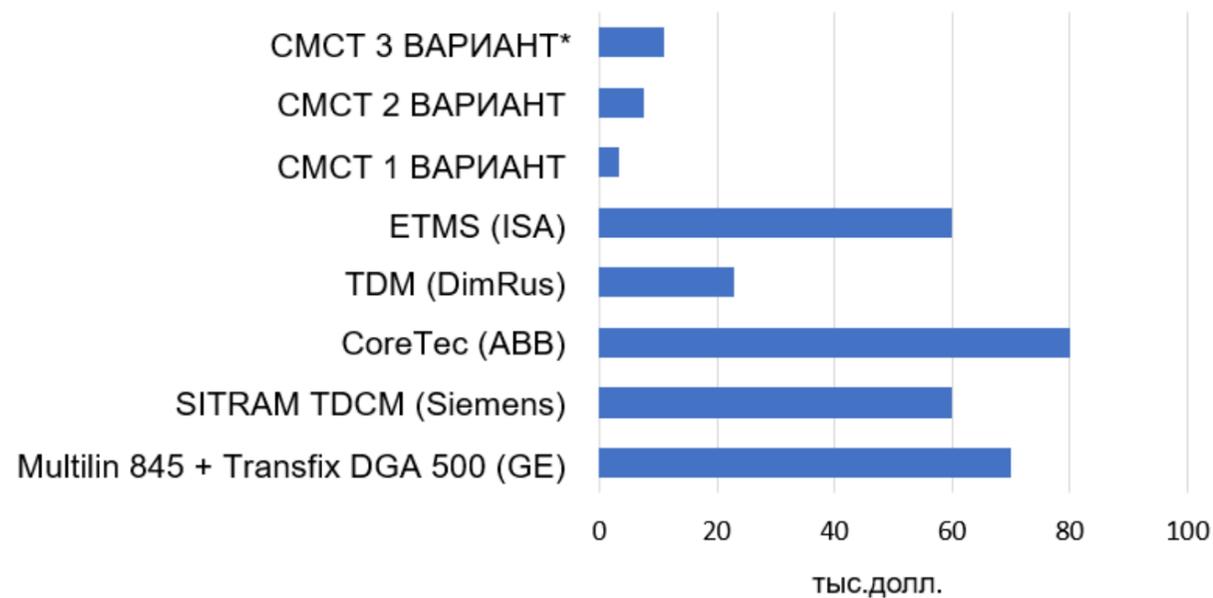
S, MVA	Тип СТ				
	35/НН	110/НН	110/35/НН	220/НН	220/110/НН
2,5	1530,50	4570,30	-	-	-
6,3	3630,37	5280,53	6270,63	-	-
10	4620,47	6565,68	8745,88	-	-
16	6105,62	9735,98	12211,23	-	-
25	8250,83	11716,18	13531,37	-	17656,79
40	12541,27	14910,43	15676,58	17986,82	19802,00
63	-	19141,94	21122,14	24257,45	-
80	-	22112,24	24257,45	30858,12	-

Варианты СМСТ

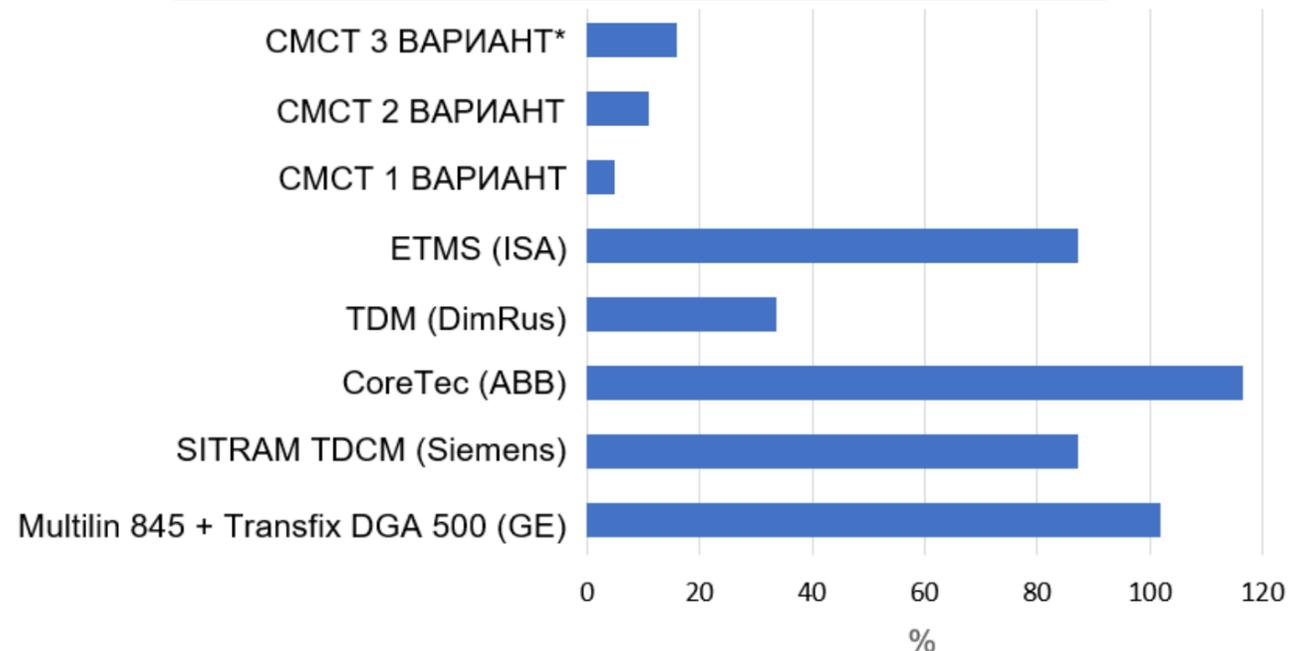


Технико-экономические показатели

Стоимость СМСТ различных производителей**



Стоимость СМСТ в процентах от стоимости трансформатора 110/НН 6,3 МВА***



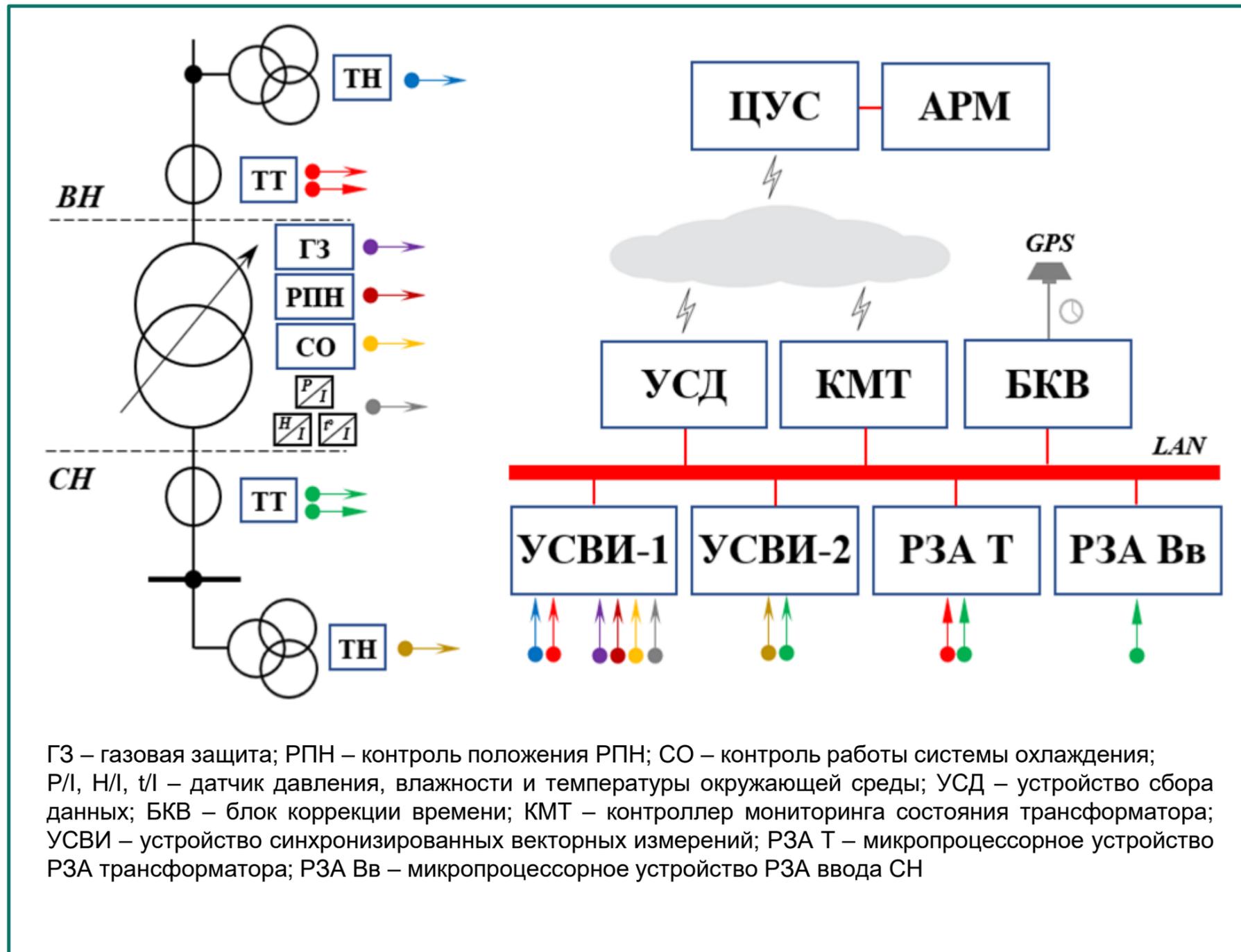
- ❑ стоимость существующих на рынке СМСТ сопоставима или даже превышает стоимость большинства силовых трансформаторов распределительных сетей среднего напряжения
- ❑ применение большинства СМСТ ориентировано на крупные подстанции с трансформаторами большой мощности
- ❑ в номенклатуре СМСТ практически отсутствуют решения для РЭС
- ❑ перспективным можно считать применение СВИ для создания СМСТ на базе контроля электрических параметров трансформатора (фазные токи и напряжения, мощности, потери мощности, параметры схемы замещения и др.)
- ❑ применение СВИ для СМСТ в составе УРЗА и МІЕД является наиболее эффективным решением для РЭС (комплексный подход)
- ❑ стоимость вариантов СМСТ на базе СВИ в несколько раз меньше стоимости традиционных СМСТ и составляет не более 15-20 % от стоимости СТ

*стоимость вариантов СМСТ рассчитана для оборудования ИЦ «Энергосервис»

**по данным производителей на IV квартал 2020 г.

***по укрупненным показателям

Структура СМСТ на базе СВИ



Функции СМСТ на базе СВИ

оценка параметров схемы замещения

контроль перегрузочной способности

контроль сквозных токов КЗ, БТН

оценка степени износа витковой изоляции

контроль работы РПН, системы охлаждения

контроль параметров окружающей среды

функции счетчика ЭЭ, расчет ПКЭ

функции устройства телемеханики

Опытно-промышленная эксплуатация

Тестирование СМСТ на базе СВИ

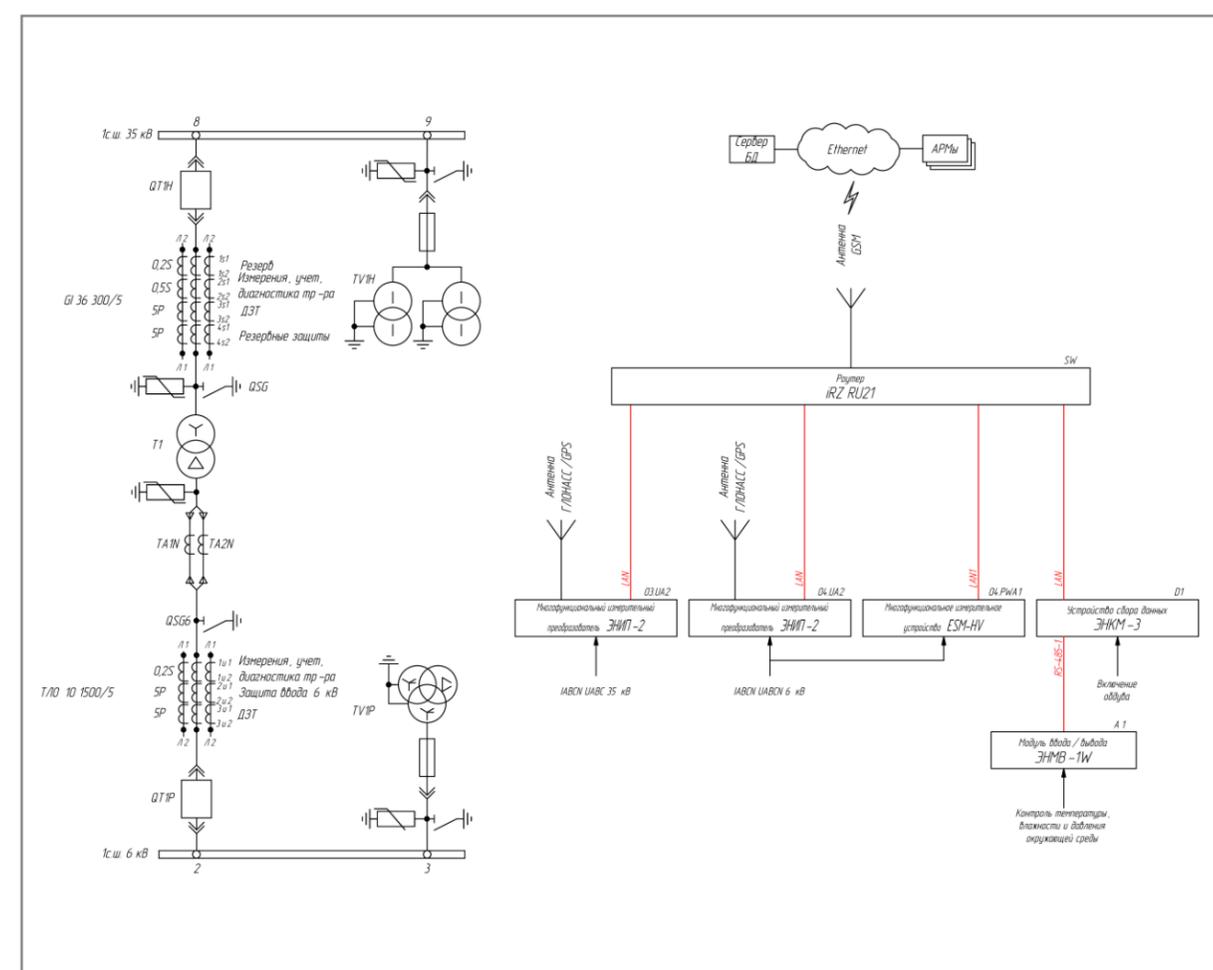
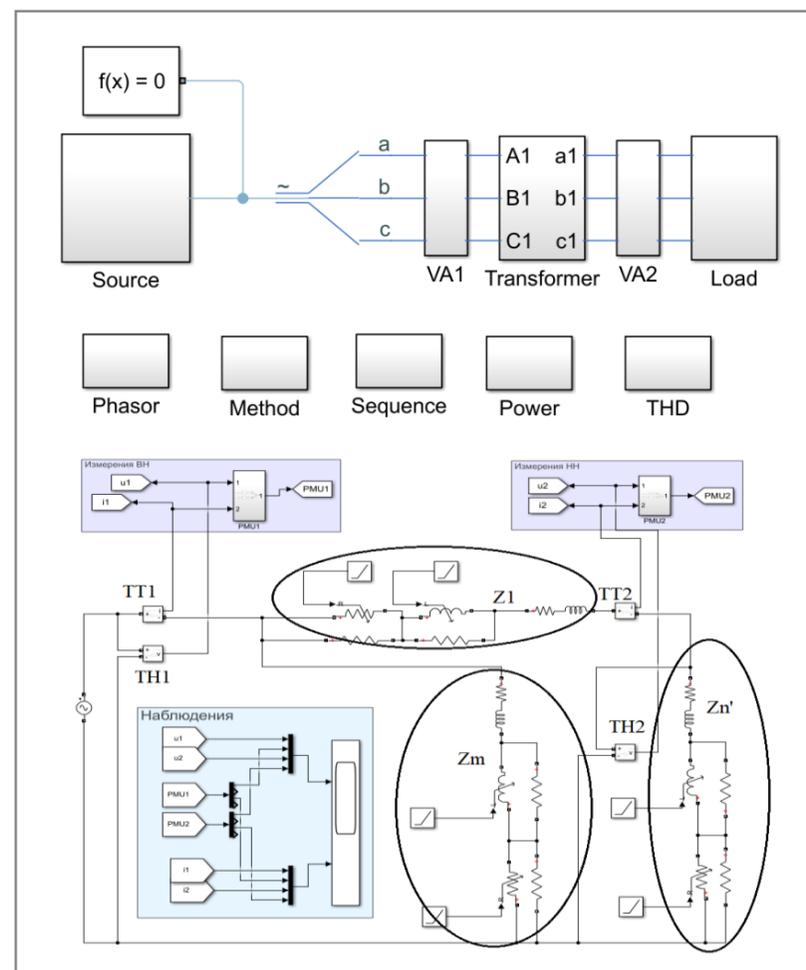
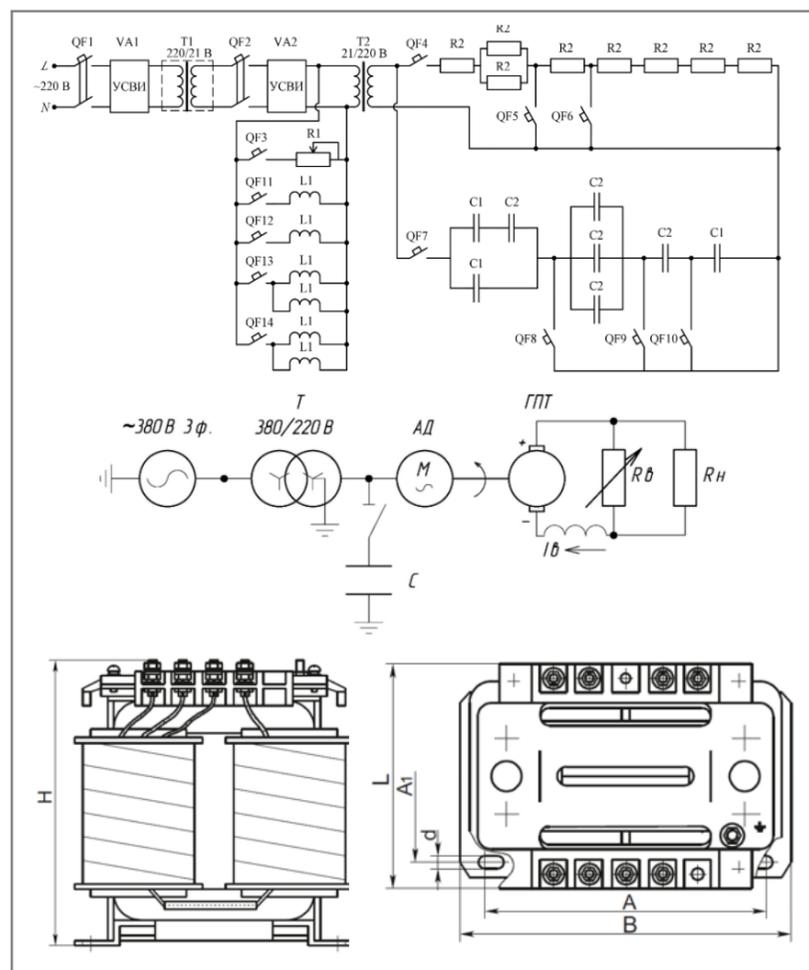
моделирование

промышленная эксплуатация

физическое
на лабораторном стенде

математическое
в среде MATLAB/Simulink

СМСТ на базе СВИ установлена на двух
подстанциях ПАО «МРСК Северо-Запада»

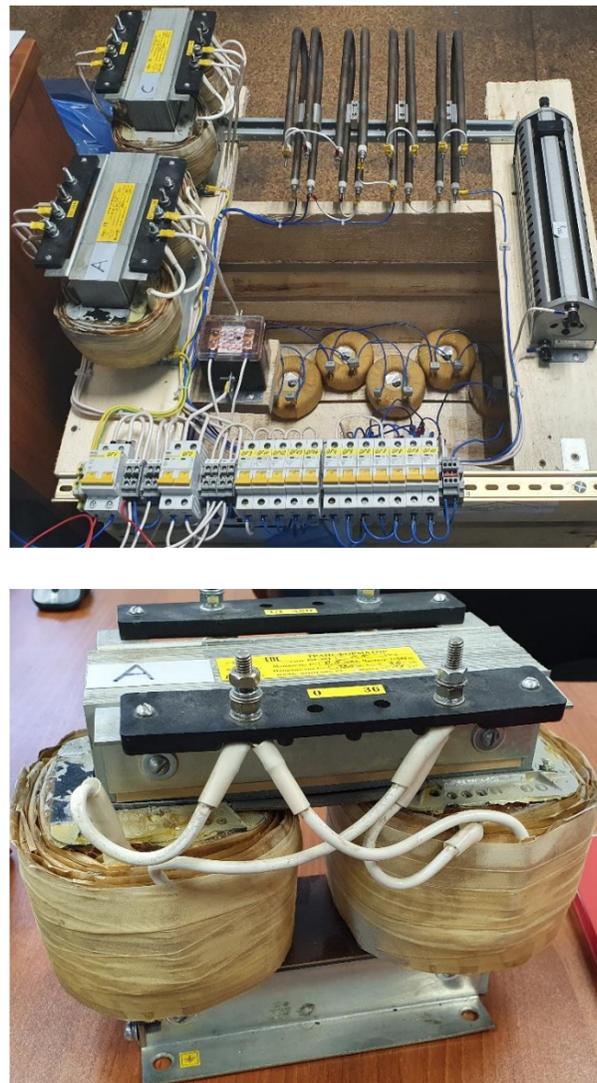


Физическое и математическое моделирование

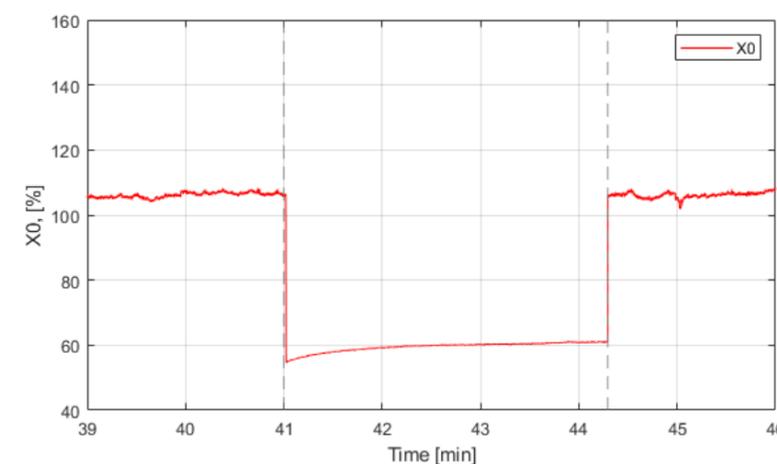
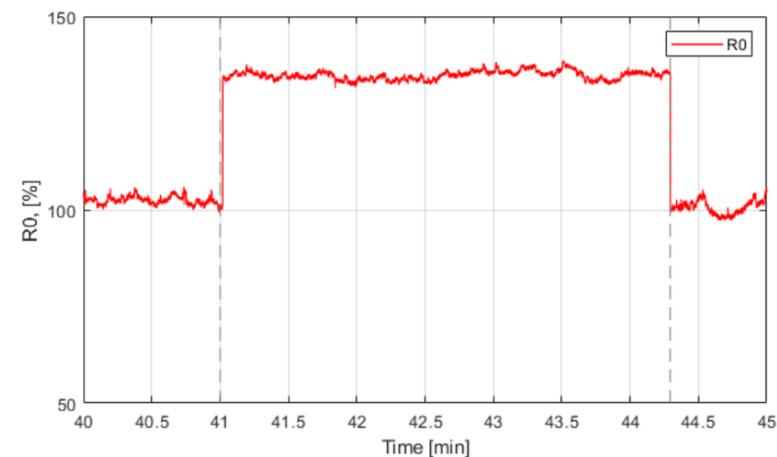
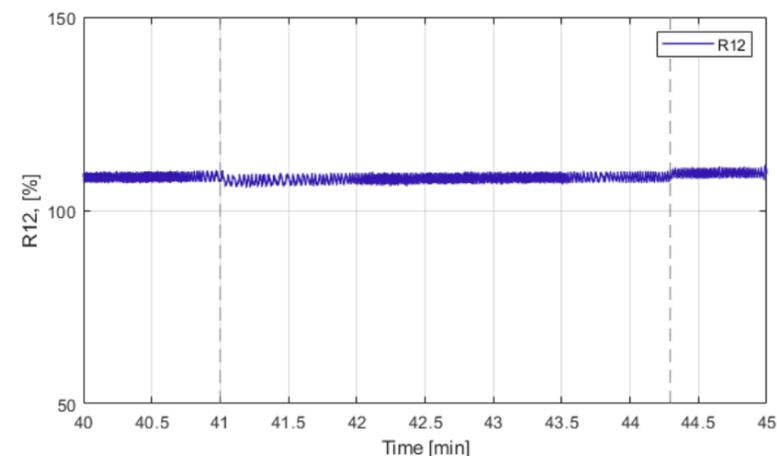
стенд с трехфазным трансформатором



стенд с однофазным трансформатором



изменение параметров схемы замещения при витковом замыкании



два лабораторных стенда: с однофазным и трехфазным трансформатором

измерение фазных токов и напряжений с помощью ЭНИП-2-УСВИ

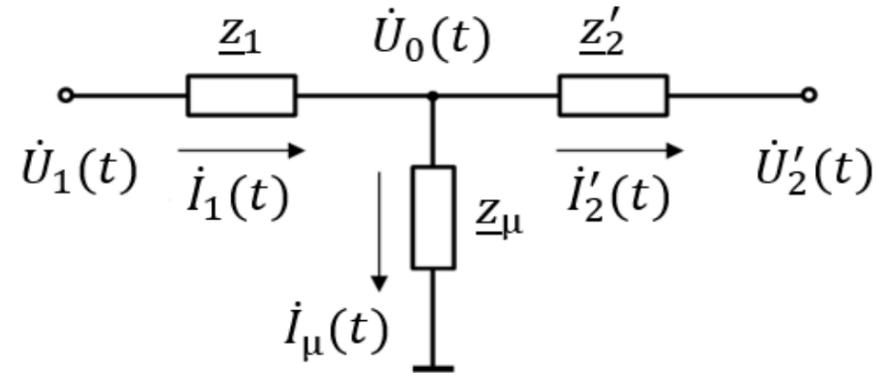
опыты проведены в рамках научно-исследовательской работы совместно с АО «Федеральный испытательный центр»

проведены опыты КЗ, ХХ, работа трансформаторов при различной нагрузке

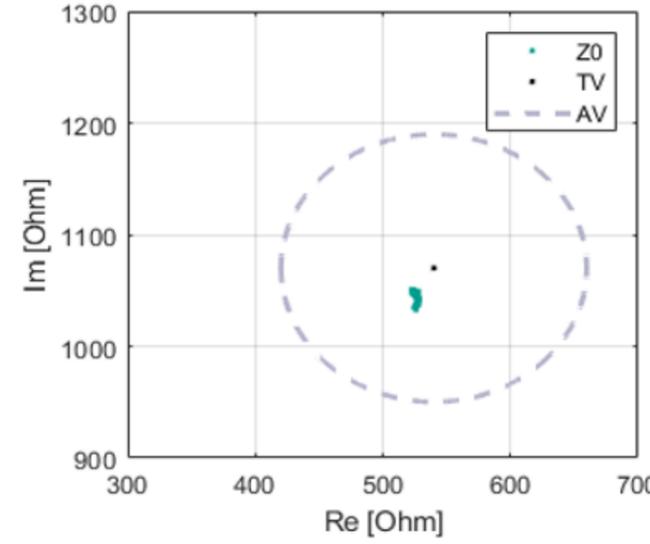
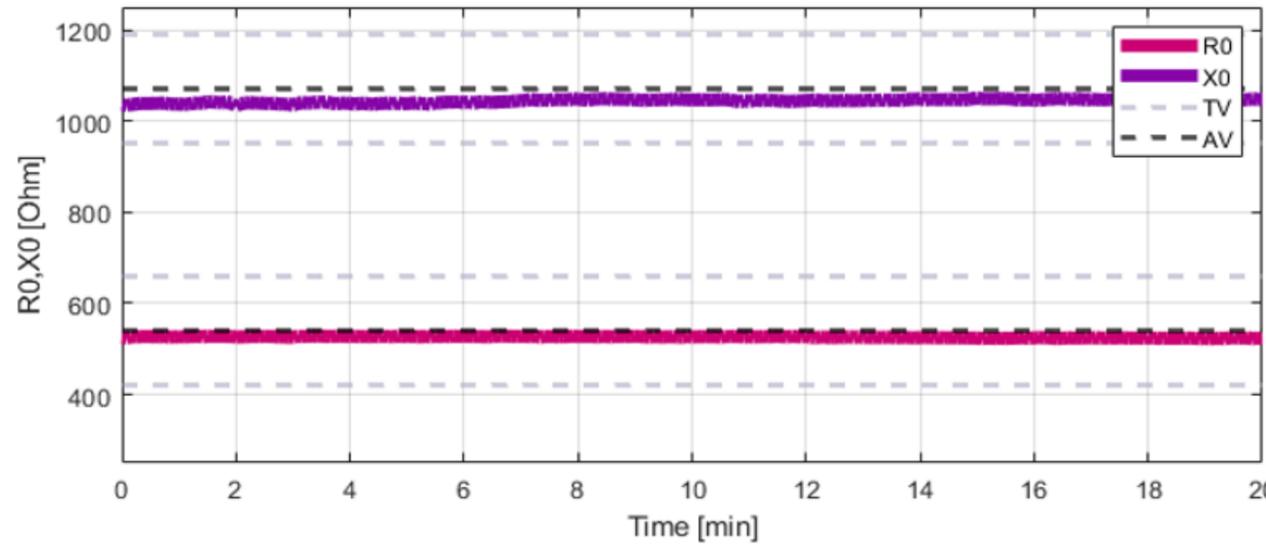
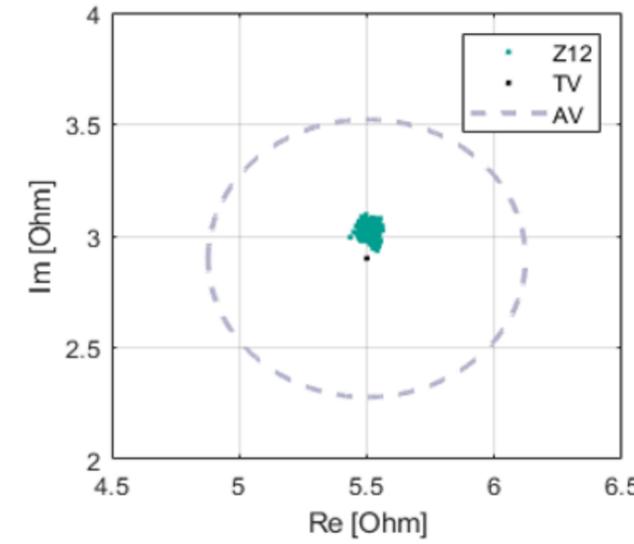
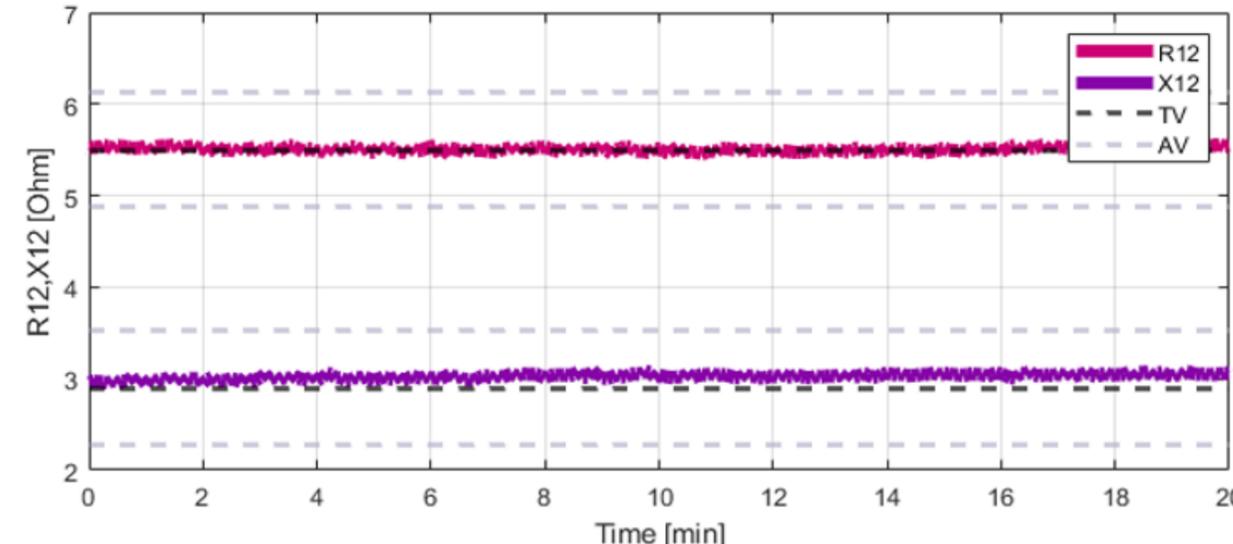
проведено имитационное моделирование повреждений в обмотке и магнитопроводе лабораторного трансформатора

проведен анализ полученных данных, результаты подтверждают эффективность СМСТ на базе СВИ для обнаружения ряда повреждений в трансформаторе

Физическое и математическое моделирование



№ п/п	Параметр	Уравнение
1	$i_{\mu}(k)$	$i_1(k) - i_2'(k)$
2	z_2'	$\frac{\dot{U}_1(k-n)i_1(k) - \dot{U}_1(k)i_1(k-n)}{i_1(k)i_2'(k-n) - i_1(k-n)i_2'(k)} + \frac{\dot{U}_2'(k)i_1(k-n) - \dot{U}_2'(k-n)i_1(k)}{i_1(k)i_2'(k-n) - i_1(k-n)i_2'(k)}$
3	z_1	$\frac{\dot{U}_1(k) - \dot{U}_2'(k) - i_2'(k)z_2'}{i_1(k)}$
4	z_0	$\frac{\dot{U}_1(k) - i_1(k)z_1}{i_{\mu}(k)}$

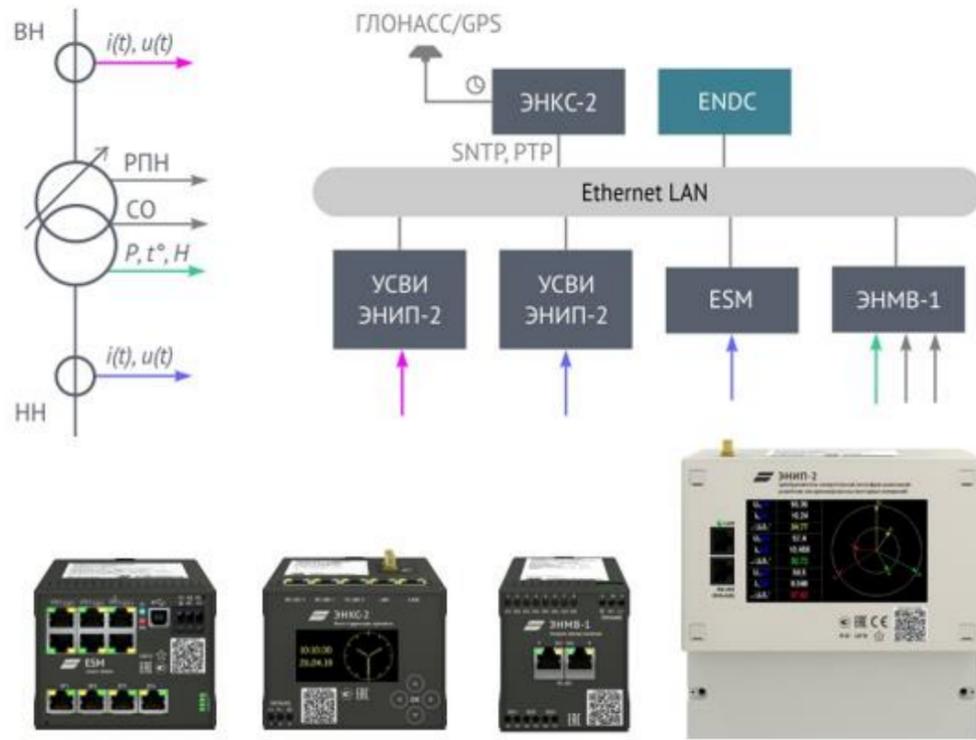


Примечания:

1. Контроль параметров схемы замещения трансформатора позволяет производить оценку его состояния по величине сопротивлений z_1 , z_2 , z_{μ} .
2. В таблице приняты следующие обозначения: k - целое число, определяющее текущий отчет измерений синхровекторов; n - предшествующий k отсчет, для которого соблюдаются заданные требования к значениям синхровекторов тока и напряжения; $i_{\mu}(k)$ - ток ветви намагничивания

Эксплуатация на действующих объектах

Структурная схема и оборудование СМСТ



две подстанции: с двухобмоточным и трехобмоточным трансформатором

период ОПЭ и сбора данных более года

результаты ОПЭ позволяют верифицировать алгоритмы оценки состояния трансформатора

Контроль параметров схемы замещения

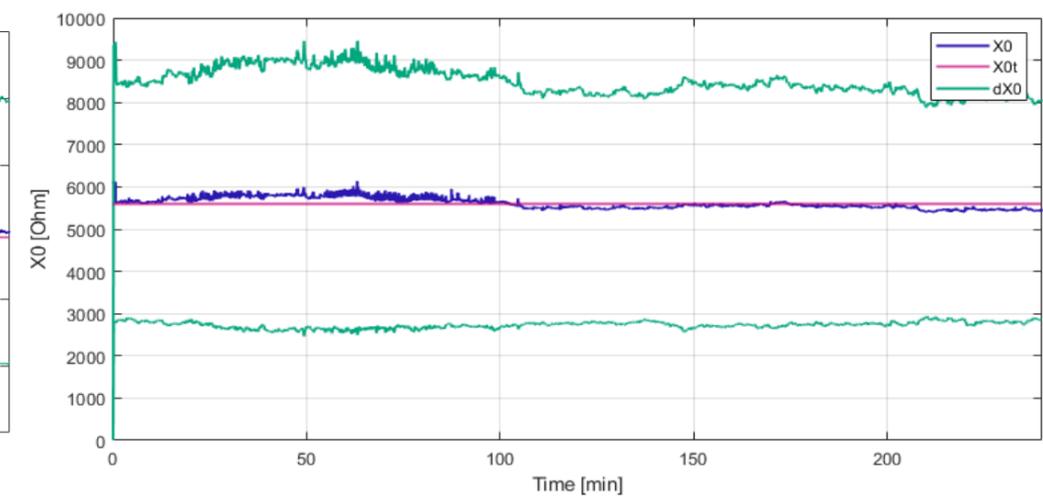
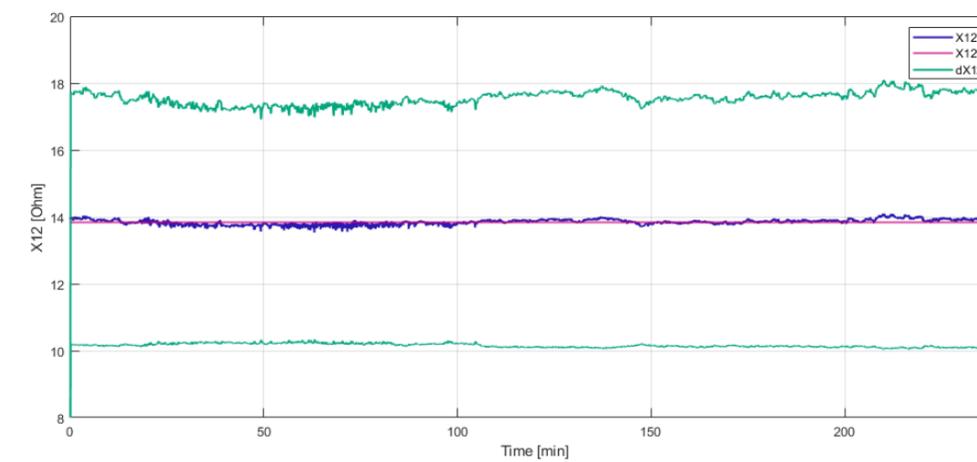
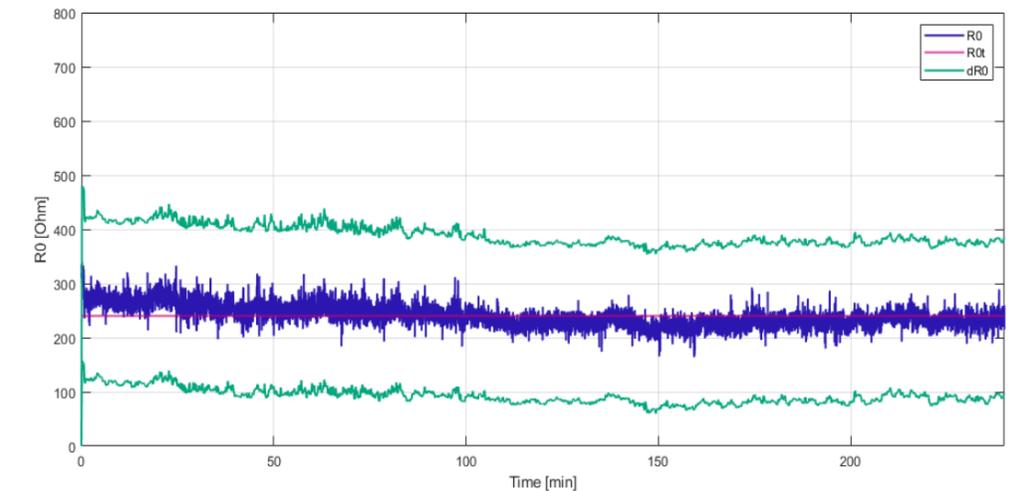
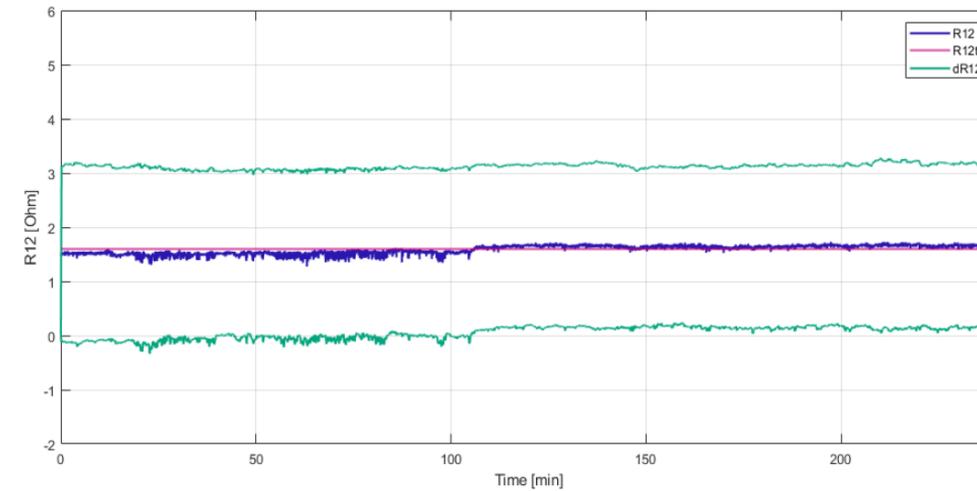


Фото с объектов



Выводы

1. Существующие СМСТ имеют большую стоимость, и область их применения ограничена.
2. Значительная часть повреждений трансформаторов может быть выявлена по их электрическим и магнитным параметрам.
3. Мониторинг состояния трансформатора – перспективное направление применения СВИ в РЭС.
4. Для создания системы мониторинга трансформатора РЭС СН необходим комплексный подход: на базе двух устройств УРЗА и MIED с поддержкой СВИ (пример – ESM) реализуются необходимые подсистемы: релейная защита, автоматика, мониторинг, учет ЭЭ, ПКЭ, телемеханика – это позволяет снизить относительную стоимость СМСТ.
5. В ходе опытно-промышленной эксплуатации протестированы образцы СМСТ на базе УСВИ, результаты подтверждают возможность и эффективность такого подхода для РЭС СН.

The image shows two utility poles in a grassy field. The poles are made of metal and have several power lines attached to them. The sky is blue with white clouds. In the background, there are green trees and a building with a blue corrugated metal roof. A red truck is partially visible on the right side of the image.

Раздел IV. Автоматизация кабельных и воздушных сетей

Направления применения УСВИ

- ❑ локализация однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сети с изолированной и компенсированной нейтралью:
 - ❖ путем измерения синхровекторов тока и напряжения нулевой последовательности (НП)
 - ❖ путем измерения синхровекторов тока и напряжения НП гармонических составляющих
 - ❖ путем измерения синхровекторов тока и напряжения НП в переходном режиме ОЗЗ
- ❑ измерение параметров электрической сети, повышение наблюдаемости сети
- ❑ идентификация параметров линий
- ❑ выявление источника низкочастотных колебаний (НЧК)
- ❑ учет ЭЭ, измерение ПКЭ, анализ баланса мощности
- ❑ для целей распределенной генерации: автоматика управления режимом, реализация защиты, обеспечение работы в островном режиме, синхронизация энергорайонов, мониторинг переходных процессов

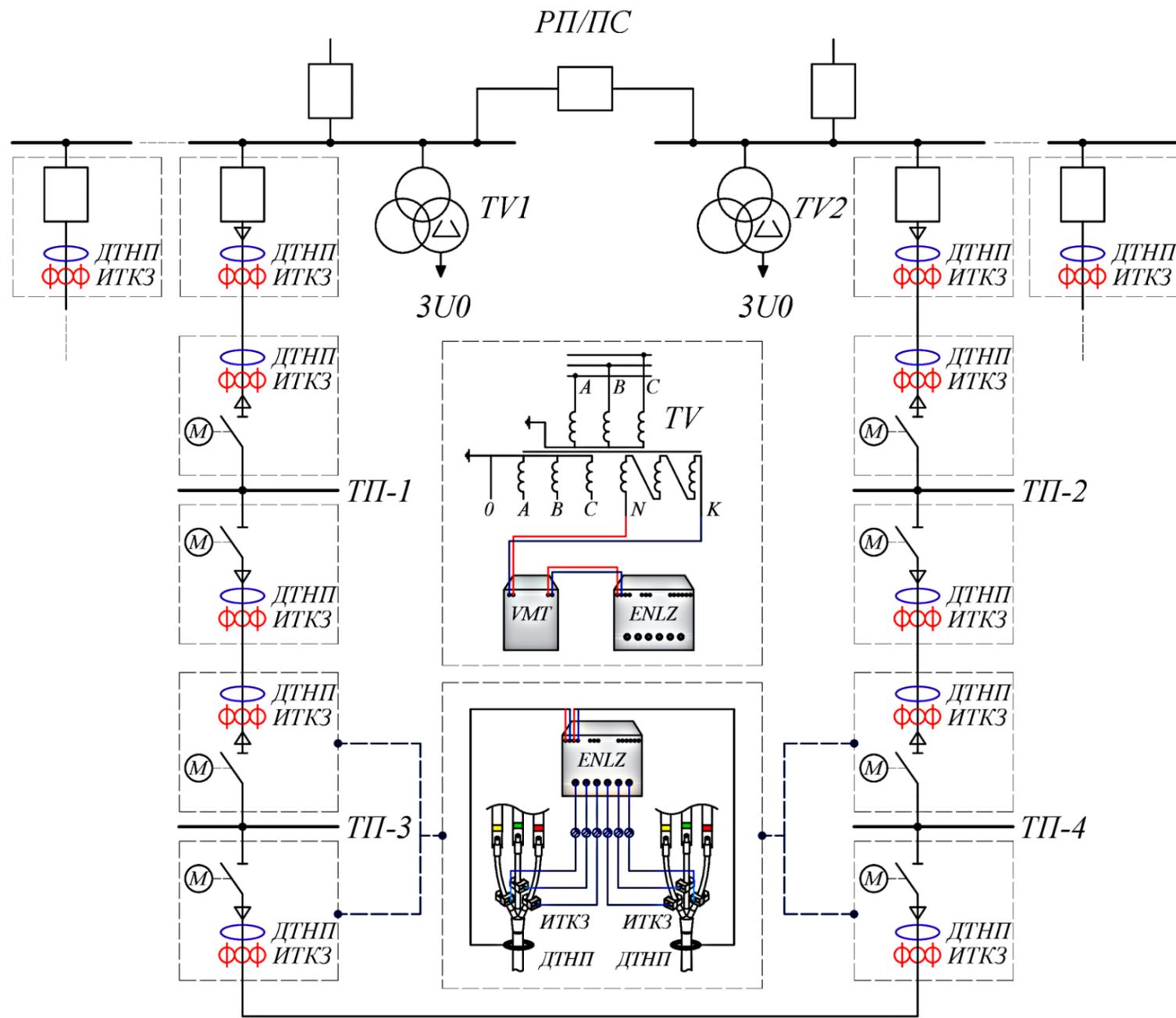
УСВИ в составе САВС

Система автоматического восстановления электроснабжения (САВС, FLISR) – программно-технический комплекс для определения и самовосстановления аварийных участков распределительной сети. САВС предназначена для автоматизации диспетчерского управления РЭС в нормальных и послеаварийных режимах.

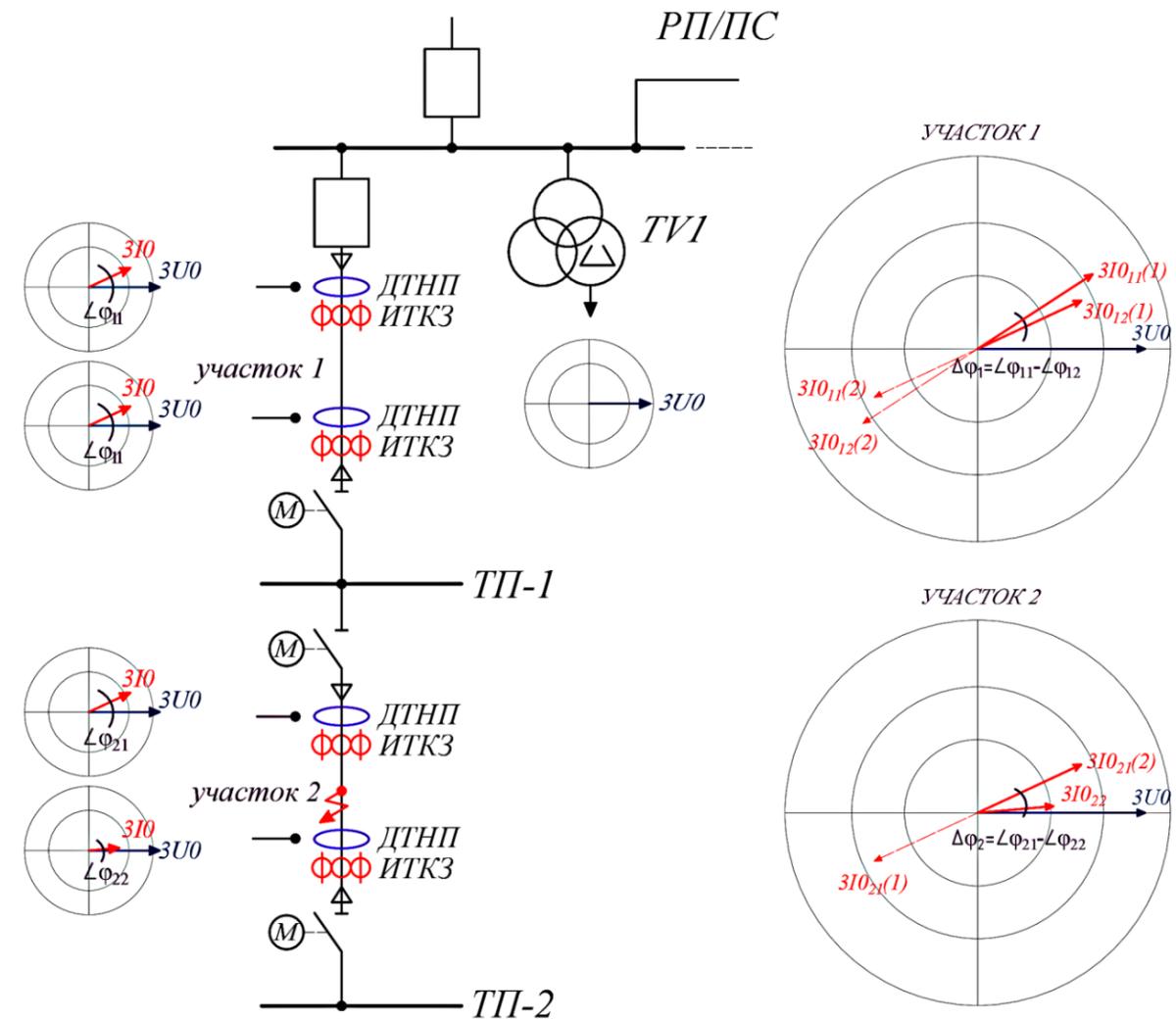
Задачи САВС:

- автоматическое определение поврежденного участка сети при ОЗЗ/КЗ
- восстановление питания потребителей после отключения поврежденного участка сети
- снижение времени восстановления электроснабжения после аварий
- предотвращение ошибочных действий персонала
- контроль за балансом электроэнергии
- уменьшение недоотпуска электроэнергии
- контроль пропускной способности линий
- снижение операционных затрат при ликвидации аварий
- снижение капитальных затрат за счет продления срока службы оборудования
- измерение параметров электрической сети, ПКЭ, автоматизация учета ЭЭ
- контроль за состоянием коммутационных аппаратов
- передача информации на сервер сбора данных

УСВИ в составе САВС



- специализированное устройство для локализации ОЗЗ/КЗ на базе СВИ
- измерение токов НП с помощью размыкаемых датчиков тока НП
- индикация тока КЗ с помощью размыкаемых ИТКЗ
- измерение напряжения НП на шинах РП/ПС
- работа в сети с изолированной и компенсированной нейтралью



Принципы локализации ОЗЗ на базе СВИ

Алгоритм локализации

Измерение синхровекторов тока НП на всех участках сети
Измерение синхровекторов напряжения НП на секциях ЦП

Расчет фазового сдвига между синхровекторами токов НП в начале и конце участков: $\Delta\varphi_n = \varphi_n^H - \varphi_n^K$

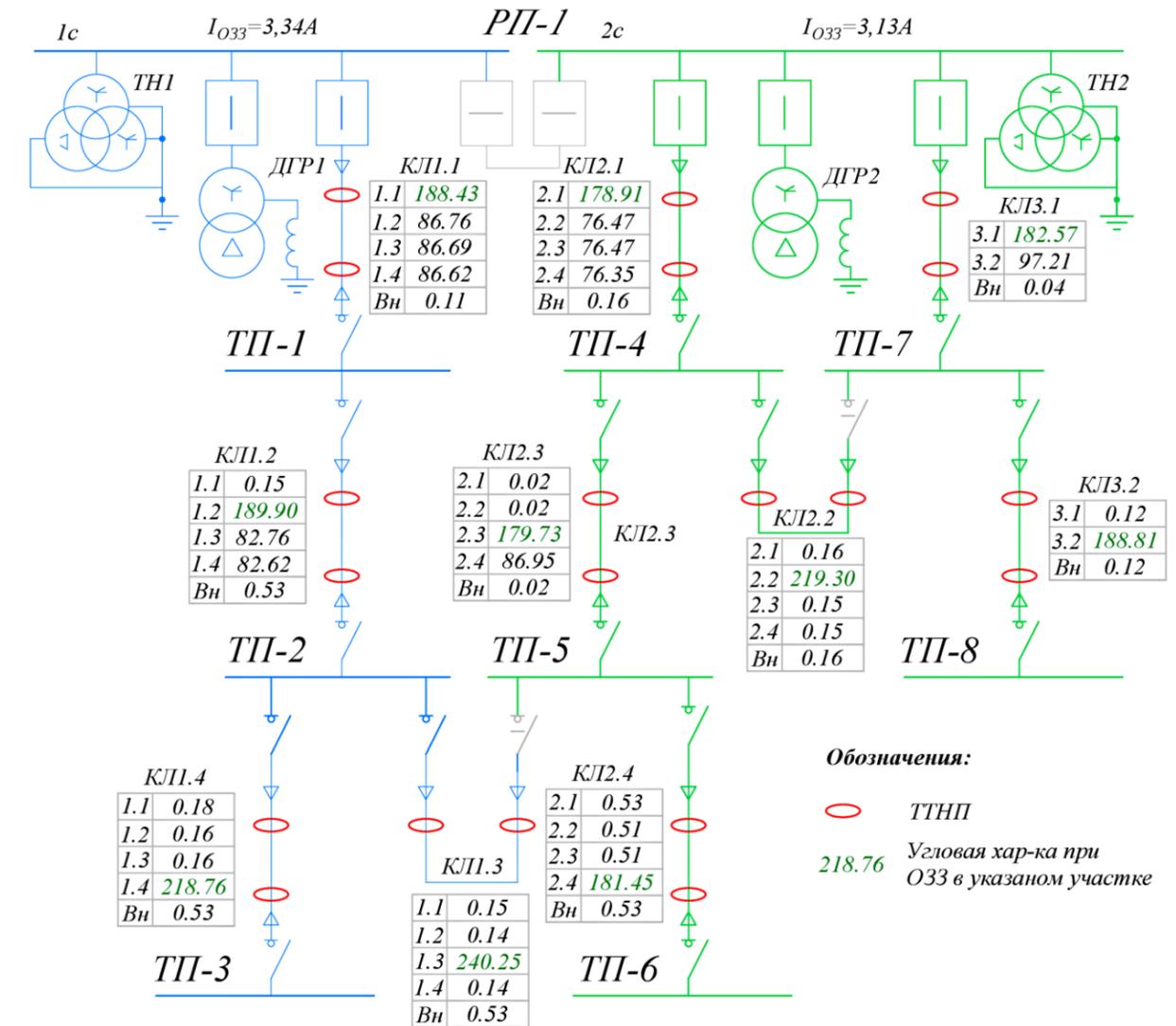
Определение максимального модуля синхровектора тока НП по участкам сети: $I_{0nmax} = \max\{I_n^H, I_n^K\}$

Расчет угловой характеристики участков сети:

$$\psi_{\Delta n} = \Delta\varphi_n \frac{I_{0nmax}}{I_{0b}}$$

Определение поврежденного участка по максимальному значению угловой характеристики $\psi_{\Delta n}$

Варианты реализации алгоритма: по синхровекторам тока и напряжения НП основной частоты в установившемся режиме ОЗЗ, по синхровекторам высших гармоник тока НП, по синхровекторам тока НП основной частоты в переходном процессе ОЗЗ



Обозначения:
 ТНП
 218.76 Угловая хар-ка при ОЗЗ в указанном участке

Точка ОЗЗ	Участок сети									
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2
1.1	188,4	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-
1.2	86,8	189,9	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-
1.3	86,7	82,8	240,3	0,2	-	-	-	-	-	-
1.4	86,6	82,6	0,1	218,7	-	-	-	-	-	-
2.1	-	-	-	-	178,9	0,2	0,0	0,53	0,0	0,1
2.2	-	-	-	-	76,5	219,3	0,0	0,51	0,0	0,1
2.3	-	-	-	-	76,5	0,1	179,7	0,51	0,0	0,1
2.4	-	-	-	-	76,4	0,1	86,9	181,5	0,0	0,1
3.1	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,54	182,6	0,1
3.2	-	-	-	-	0,1	0,0	0,0	0,51	97,2	188,8
Внешнее ОЗЗ	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,0	0,5	0,0	0,1

САВС на базе ПТК «Цифровой РЭС»

Оборудование

от 16000 ₺



от 2400 ₺



от 28500 ₺



от 26500 ₺



от 7000 ₺



от 3300 ₺



от 17900 ₺
(от 3000 ₺)

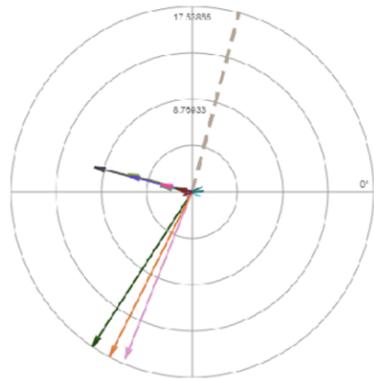


от 7900 ₺



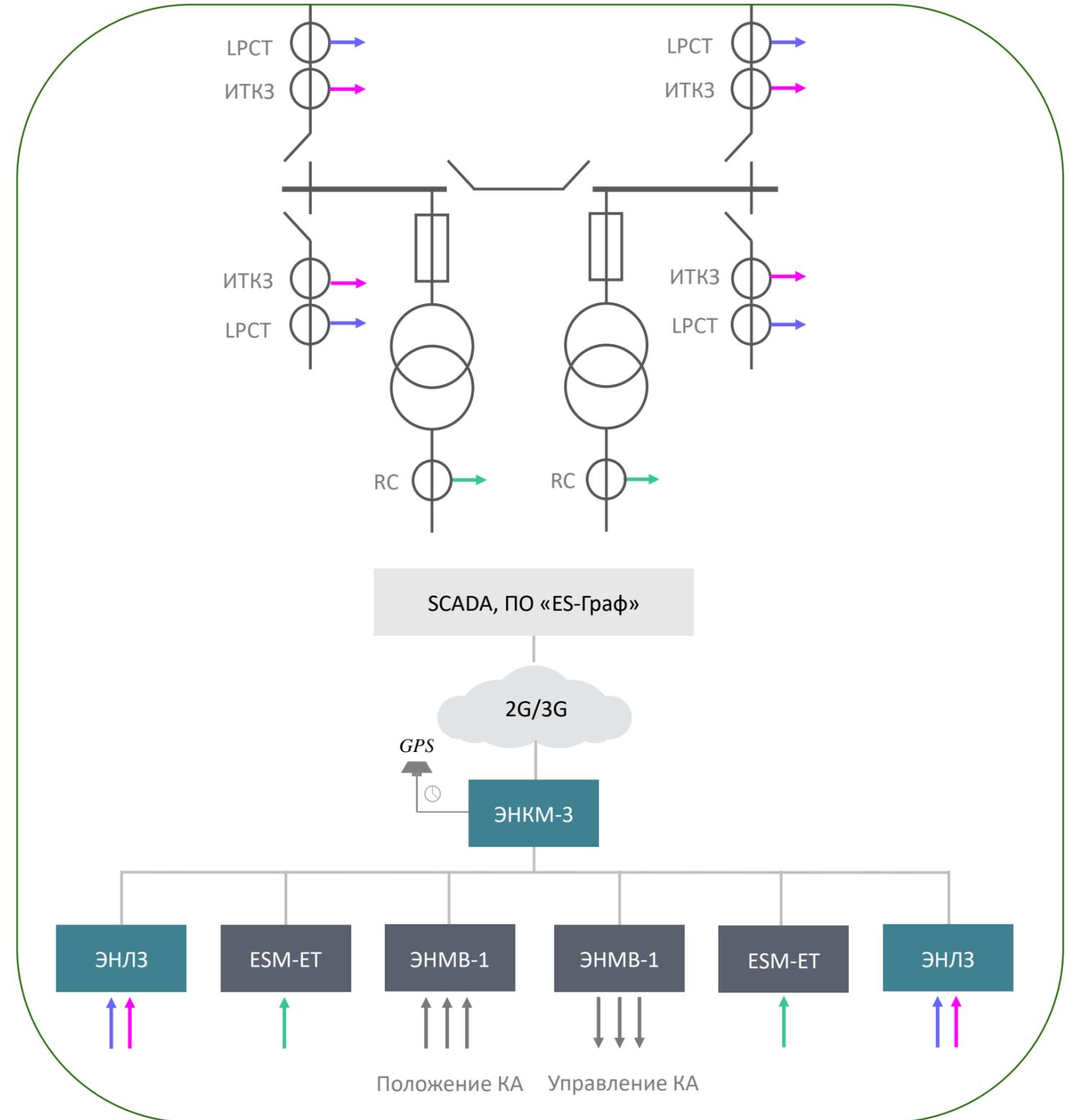
Веб-интерфейс ES-Граф

Онлайн Архив событий Конфигурация



Параметр	Статус	A	φ	Метка времени	
ЗУ0	ЗУ0	✓	96.754	75.042	26.02.20 17:22:16.960+0300
ТА1.1	3I0	✓	9.741	166.113	26.02.20 17:22:17.220+0300
ТА1.2	3I0	✓	6.447	164.905	26.02.20 17:22:18.040+0300
ТА1.3	3I0	✓	6.295	166.190	26.02.20 17:22:17.700+0300
ТА1.4	3I0	✓	3.121	170.206	26.02.20 17:22:17.000+0300
ТА1.5	3I0	✓	3.101	167.009	26.02.20 17:22:17.800+0300
ТА2.1	3I0	✓	17.539	236.585	26.02.20 17:22:18.680+0300
ТА2.2	3I0	✓	17.107	247.659	26.02.20 17:22:15.840+0300
ТА2.3	3I0	✓	17.486	242.820	26.02.20 17:22:17.780+0300
ТА2.4	3I0	✓	1.727	166.168	26.02.20 17:22:18.460+0300
ТА2.5	3I0	✓	1.577	169.321	26.02.20 17:22:17.800+0300
ТА3.1	3I0	✓	0.264	166.388	26.02.20 17:22:17.340+0300
ТА3.2	3I0	✓	0.208	7.224	26.02.20 17:22:18.460+0300
ТА3.3	3I0	✓	0.004	194.941	26.02.20 17:22:18.220+0300

Локация	Время	Событие
КЛ-2.2 (23-24)	26.02.20 17:15:13.920+0300	ОЗЗ 1
КЛ-1.1 (11-12)	26.02.20 17:15:11.880+0300	ОЗЗ 0
КЛ-1.1 (11-12)	26.02.20 17:08:52.020+0300	ОЗЗ 1



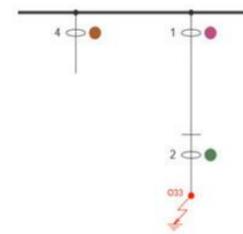
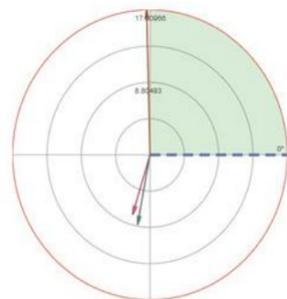
РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ ВАМРАС

Опытно-промышленная эксплуатация

Результаты ОПЭ:

- ☐ успешные испытания
- ☐ 2 года ОПЭ
- ☐ 3 КЗ и 17 ОЗЗ в АРЭС
- ☐ 6 КЗ и 20 ОЗЗ в ЧРЭС

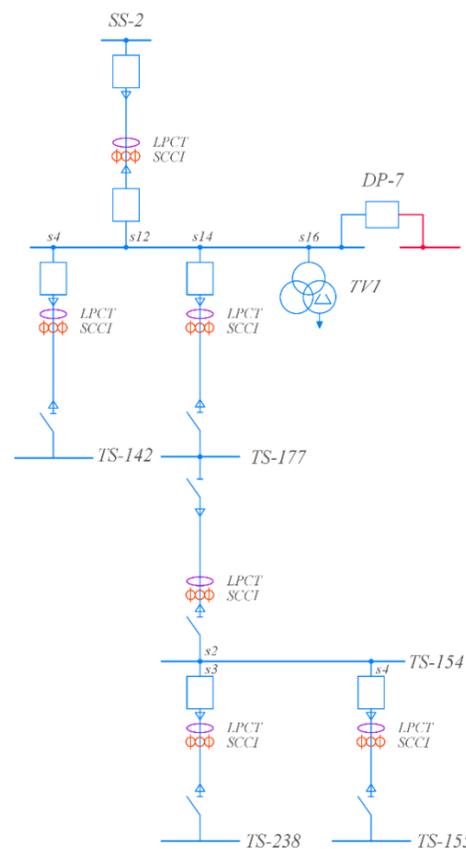
Испытания в Казани



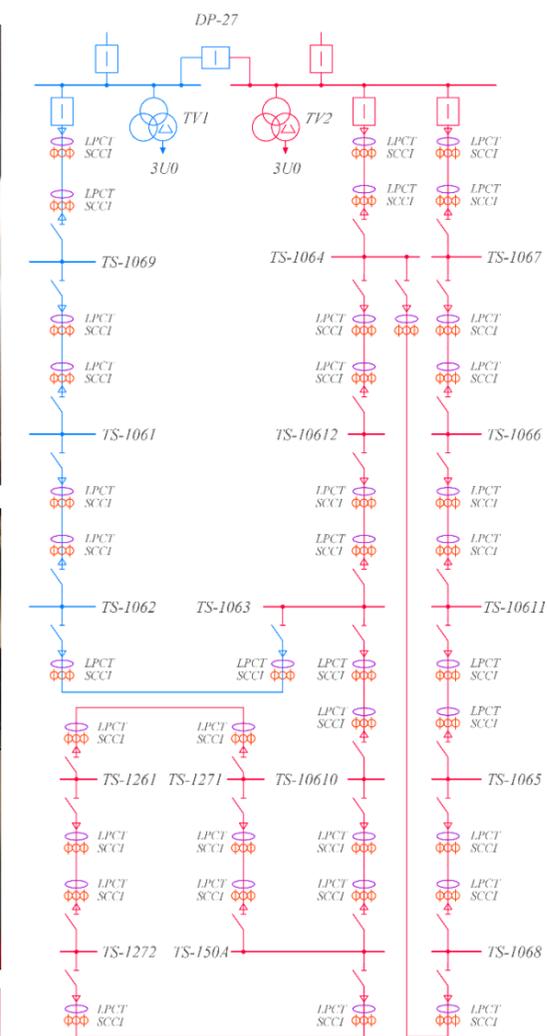
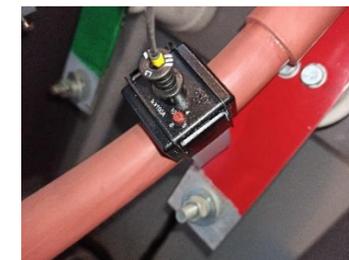
Имп.	Статус	Парам.	A	φ
1	✓	310	7.596	266.039
2	✓	310	8.619	272.466
3 (3U0)	✓	3U0	102.875	13.096
4	✓	310	17.610	104.469

Фидер	Сегмент	Время	ОЗЗ
Луч В	Сегмент 2-...	25.09.2019 17:02:36.100+0300	1

Архангельский РЭС



Череповецкий РЭС

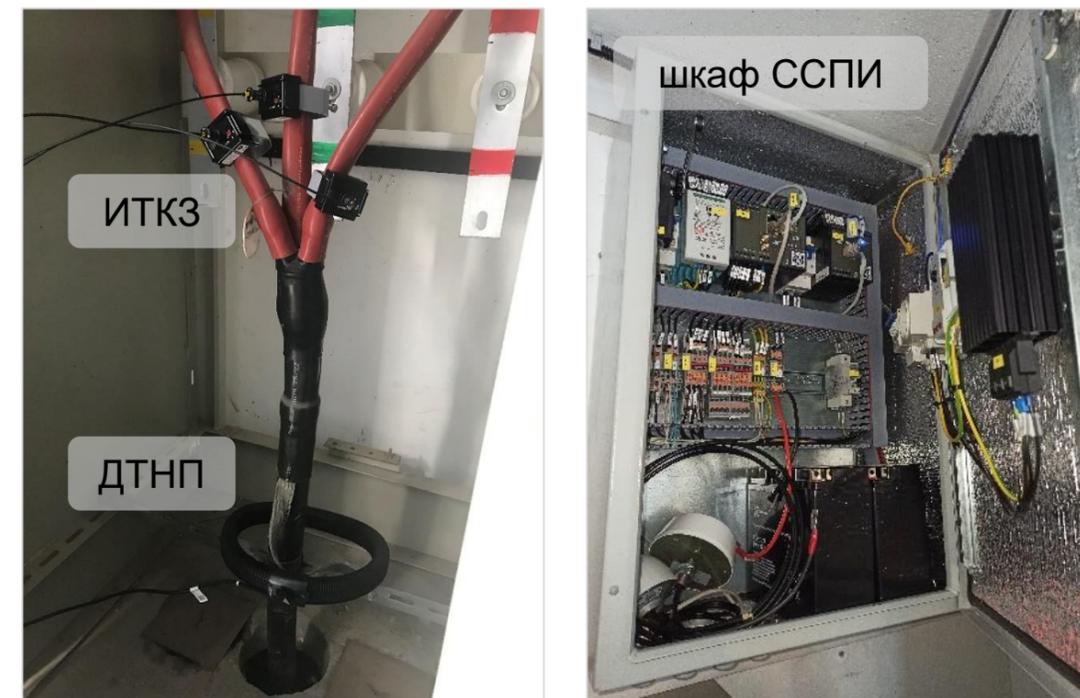


Экономическая эффективность решения

Характеристика	ЭНЛЗ	Традиционное РМУ
Средняя стоимость одного устройства, руб.	16 000	600 000
Средняя стоимость оборудования для системы локализации ОЗЗ, руб. (из расчета 4 устройства на одно ТП)	410 000	2 700 000
Отношение стоимости устройства к средней стоимости БКТП 6(10)/0,4 кВ, %	0,8	30,0
Отношение стоимости оборудования системы локализации ОЗЗ к средней стоимости БКТП 6(10)/0,4 кВ, %	20,5	135,0
Работа в составе САВС (FLISR)	+	опционально

Примечания:

1. Средняя стоимость традиционного РМУ рассчитана по средней стоимости УСВИ отечественных производителей (не включая оборудование ИЦ Энергосервис) по данным на IV квартал 2020 г.
2. Стоимость оборудования системы локализации ОЗЗ на одну ТП рассчитана из условия наличия 4-х присоединений. Оборудование включает в себя устройства локализации ОЗЗ, шкаф ССПИ, датчики тока НП и индикаторы ТКЗ.
3. Стоимость однострансформаторной БКТП 10/0,4 кВ с мощностью силового трансформатора 1000 кВА принята равной 2,000 тыс.руб.

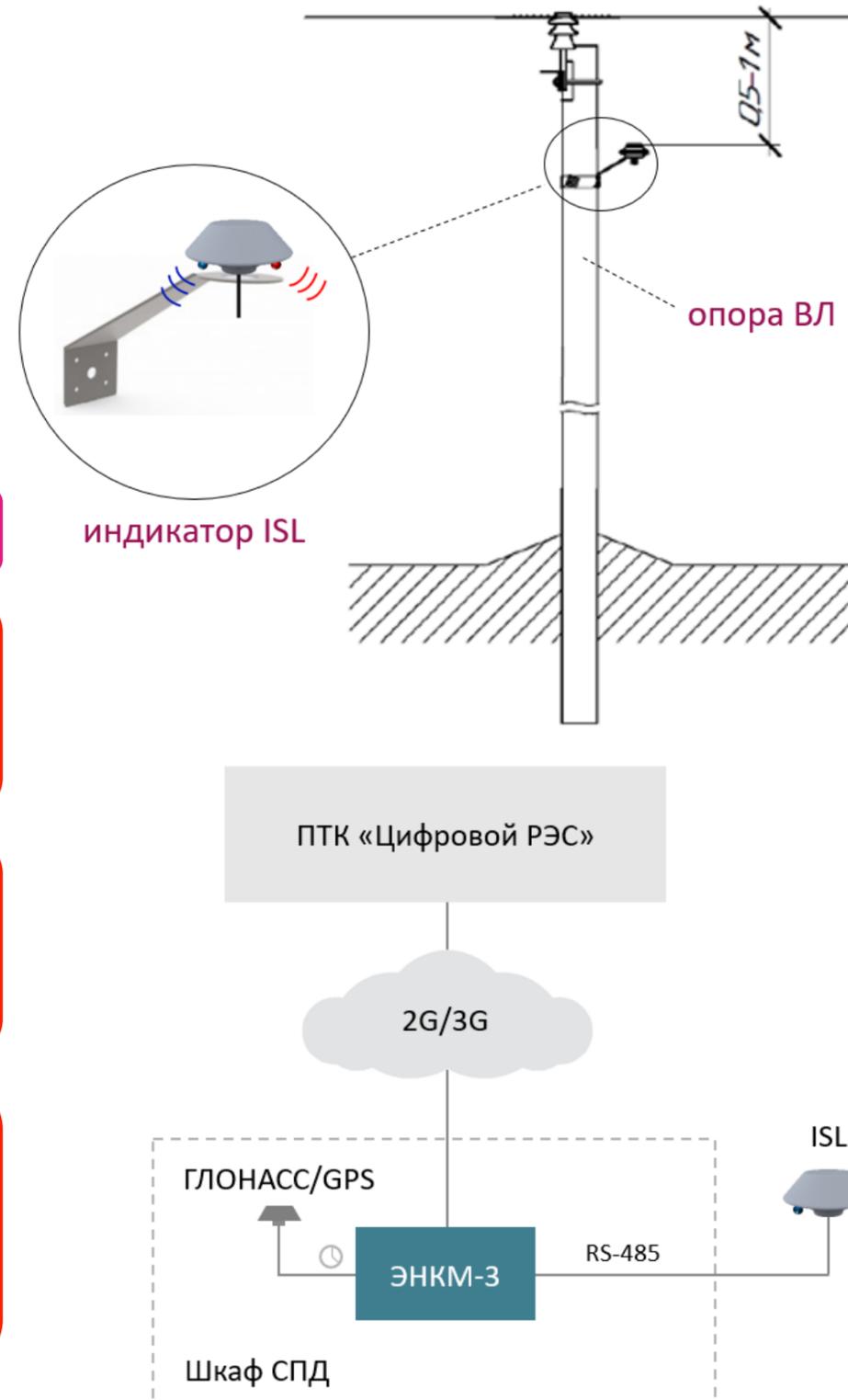


Особенности решения на базе устройства ЭНЛЗ:

1. Одно устройство позволяет контролировать до 2-х присоединений, режим работы непрерывный.
2. ЭНЛЗ оснащены часами реального времени, т.е. представляют собой устройство СВИ
3. Погрешность измерений системы локализации ОЗЗ:

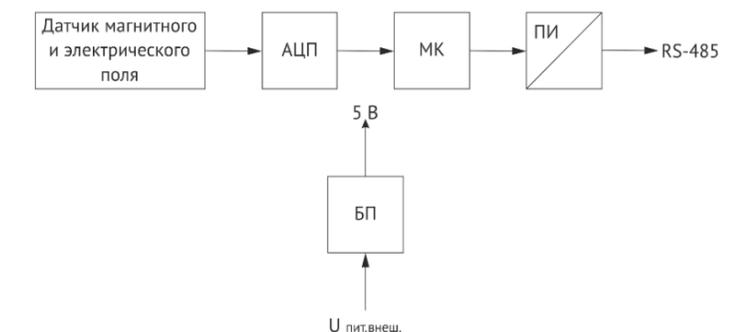
Диапазон измерений, А	Амплитудная погрешность, %	Угловая погрешность, мин	TVE, %
0,5 – 1,2	5	240	7
1,2 – 3,0	3	180	5
3,0 – 70	2	60	2

Решение для воздушных сетей



Особенности ISL:

- мониторинг состояния ВЛ 6-10 кВ
- регистрация КЗ, ОЗЗ
- хранение и передача данных в ЦУС
- светодиодная индикация
- один датчик на опору
- крепление на все виды опор
- не требуется обслуживание встроенных ИП



Выводы

1. Применение обычных УСВИ при их текущей стоимости в РЭС среднего и низкого напряжения в настоящее время оправдано только для ответственных и крупных городских сетей с высокой изначальной капитальной стоимостью (для вновь строящихся, крупных мегаполисов и др.).
2. В то же время, существует перечень задач в РЭС, которые эффективно могут быть решены с помощью технологии СВИ.
3. Может быть выделено два основных подхода для применения СВИ в РЭС: комплексный (системный) подход и функциональный подход (специализация функций УСВИ).
4. Комплексный подход предполагает, что одно устройство СВИ решает несколько задач (измерения параметров сети, учет ЭЭ, функции устройств телемеханики) → высокая стоимость устройства компенсируется экономическим эффектом при решении поставленных задач (пример: ESM – счетчик ЭЭ, ПКЭ, МИП, УСВИ).
5. Функциональный подход предполагает, что УСВИ направлено на выполнение конкретной задачи (например, локализацию повреждений), что позволяет снизить требования к его характеристикам (точности измерений, наличию других функций) → меньшая стоимость (пример – ЭНЛЗ).
6. Перспективным является применение УСВИ в составе САВС.
7. Результаты ОПЭ продемонстрировали эффективность применения УСВИ в РЭС



Раздел V. Распределенная генерация

Концепция применения СВИ для целей РГ



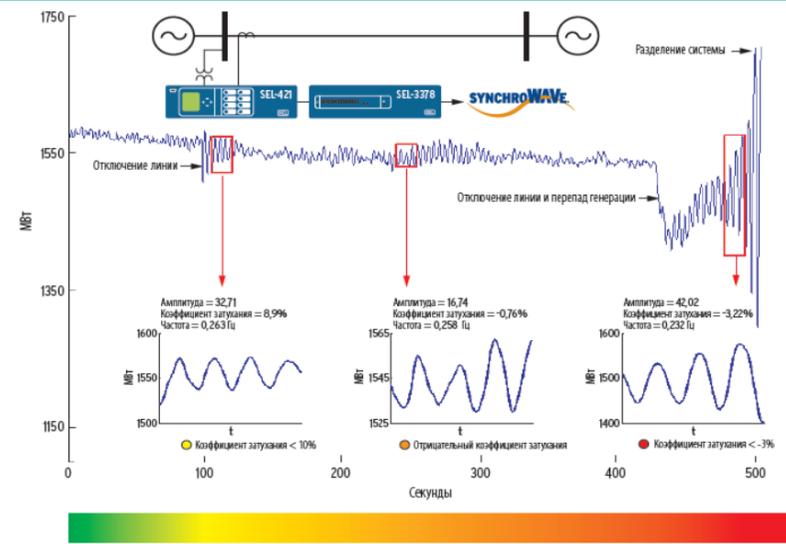
- ❑ принципы реализации защиты с абсолютной селективностью для сборных шин РУ, линий, трансформаторов, обеспечение работы релейной защиты в различных режимах (при двустороннем питании, в режиме БНТ трансформатора, при насыщении трансформаторов тока и т.д.)
- ❑ поддержание заданного баланса активной/реактивной мощности, параметров режима, загрузки генерирующего оборудования, обеспечение синхронизации энергорайонов с объектами РГ, выявление и предотвращение асинхронных режимов генераторов и др.
- ❑ мониторинг работы оборудования объекта РГ, автоматический сбор и архивация осциллограмм аварийных процессов в сети, контроль ПКЭ и др.

применение СВИ является важной составляющей для целей РГ

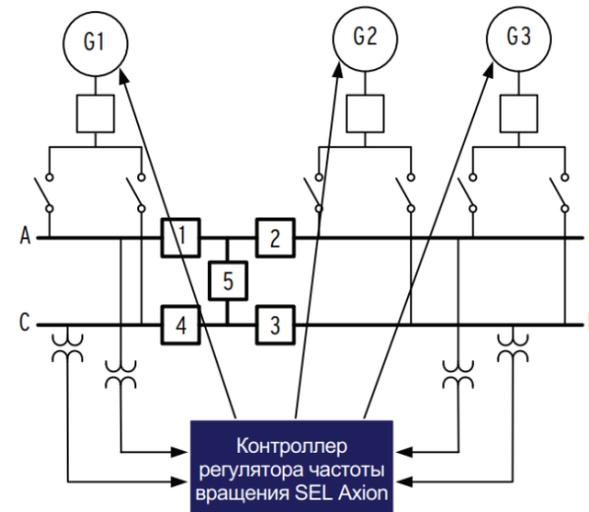
Направления применения УСВИ

Направления применения СВИ

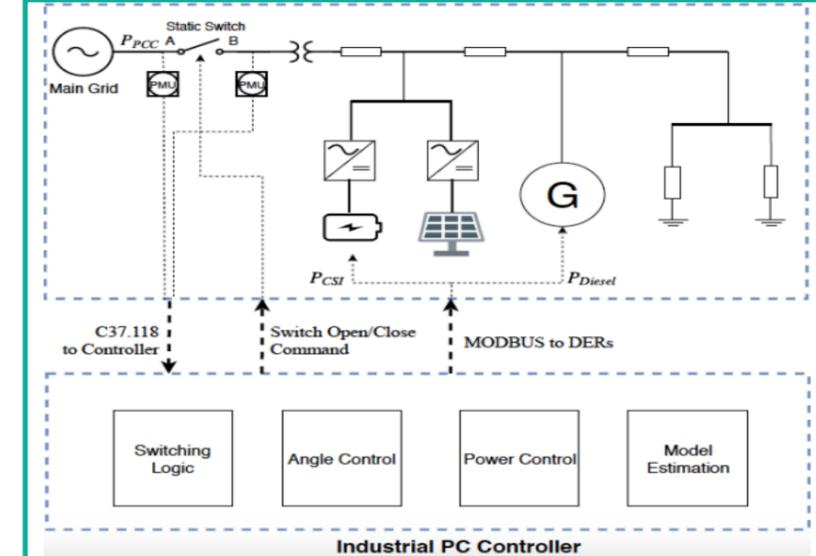
МОНИТОРИНГ переходных режимов



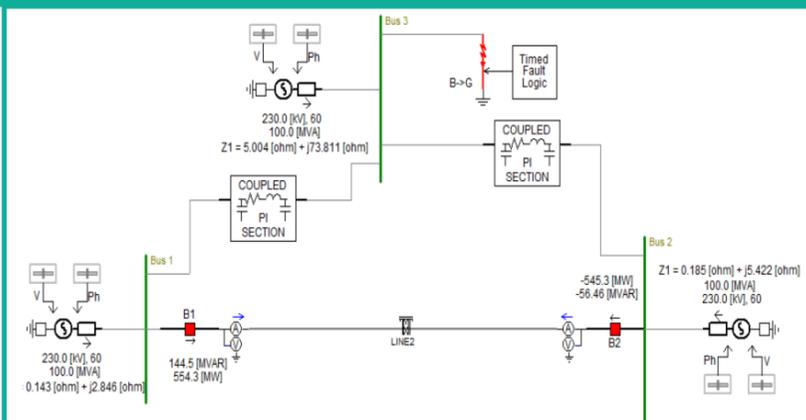
синхронизация энергорайонов



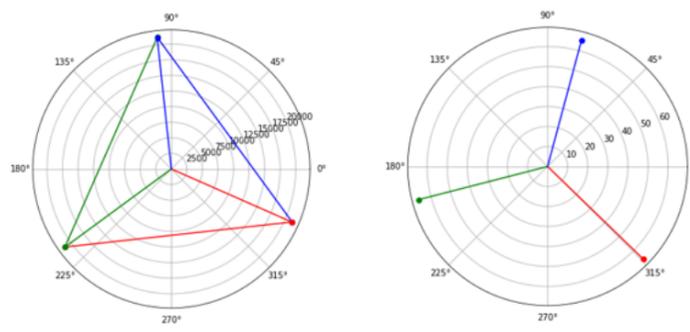
работа режимной автоматики



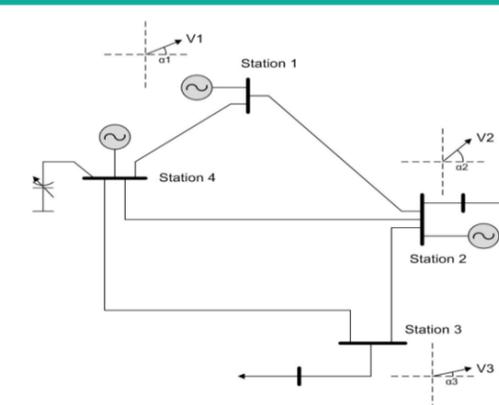
идентификация параметров модели



измерение параметров сети



контроль устойчивости режима



Текущее положение в энергетике

Российская Федерация

в РФ существует значительный интерес к распределенной генерации у бизнес-сообщества

развитие РГ в РФ в последнее десятилетие происходило в основном за счет строительства объектов РГ с использованием ГТУ, ГПУ, ДГУ

существуют определенные сложности в реализации объектов РГ, в первую очередь, связанные с отсутствием доступных устройств релейной защиты и автоматики для таких систем

требуется разработка эффективных решений для объектов РГ на базе современных технологий, в т.ч. на базе СВИ

Мировой опыт

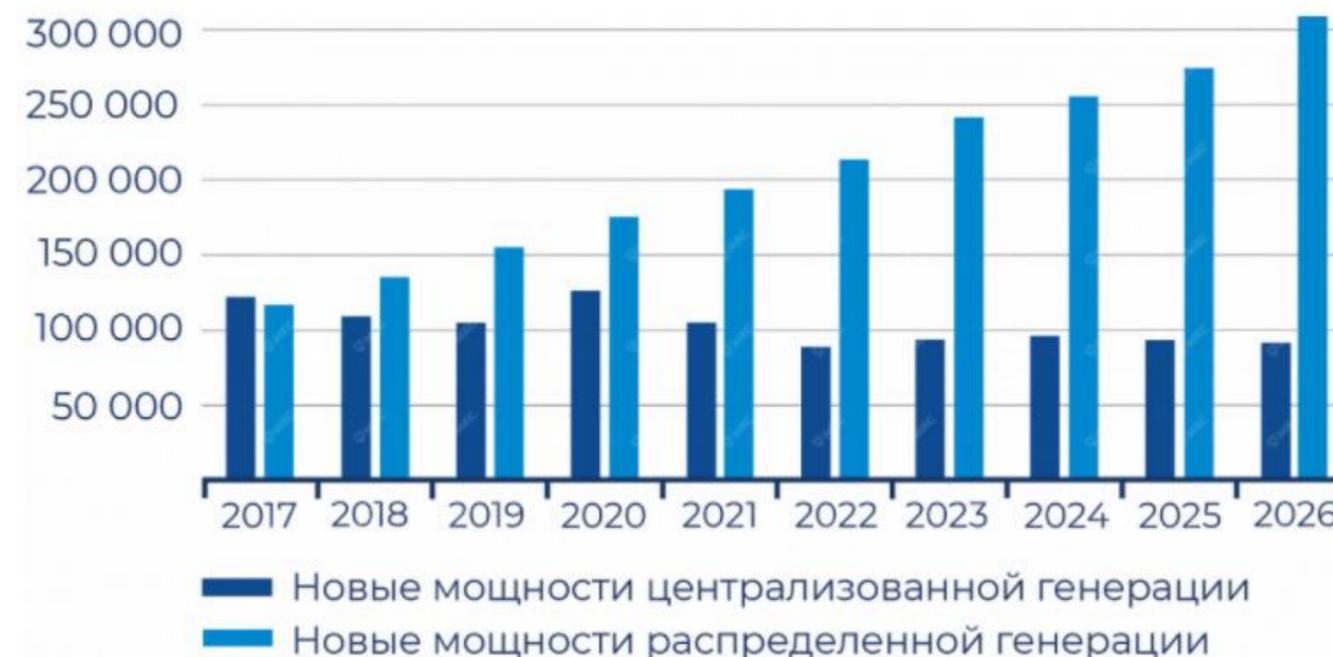
согласно прогнозам, доля распределенной генерации в мире постепенно будет расти, особое внимание уделяется политике декарбонизации и применению ВИЭ

увеличение мощности РГ и ВИЭ обеспечивается с помощью государственного регулирования и стимулирования (введение квот на выбросы CO₂, разрешение на подключение к любой точке существующей сети и др.)

Структура установленной мощности электростанций объединенных энергосистем и ЭЭС России на 01.01.2020 (<https://minenergo.gov.ru/node/532>)

Энергообъединение	Всего, МВт	ТЭС		ГЭС		АЭС		ВЭС		СЭС	
		МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%
ЭЭС РОССИИ	246 342,45	164612,14	66,82	49870,29	20,24	30 313,18	12,31	184,12	0,07	1362,72	0,55
ОЭС Центра	52 648,58	36070,23	68,51	1800,07	3,42	14778,28	28,07	-	-	-	-
ОЭС Средней Волги	27 493,88	16203,48	58,93	7013,00	25,51	4 072,00	14,81	85,4	0,31	120	0,44
ОЭС Урала	53 696,44	49979,59	93,08	1901,19	3,54	1 485,00	2,77	1,66	0,00	329	0,61
ОЭС Северо-Запада	24 472,11	15572,14	63,63	2 947,24	12,04	5 947,63	24,30	5,1	0,02	-	-
ОЭС Юга	24 857,73	13757,29	55,34	6 289,69	25,30	4 030,27	16,21	91,96	0,37	688,52	2,77
ОЭС Сибири	52 104,76	26577,96	51,01	25 301,60	48,56	-	-	-	-	225,2	0,43
ОЭС Востока	11 068,95	6 451,45	58,28	4 617,50	41,72	-	-	-	-	-	-

Прогноз ввода новых мощностей централизованной и распределённой генерации в мире (МВт)



Перспективы применения СВИ

Применение СВИ

системный подход

- ❑ для работы РЗА, систем мониторинга оборудования требуется высокая точность измерений
- ❑ на подстанции необходимо создание различных подсистем (РЗА, телемеханика, учет ЭЭ, ПКЭ, мониторинг трансформатора)
- ❑ предлагается для автоматизации центров питания РЭС использовать комплексный подход: два устройства на одно присоединение – УРЗА и MIED с поддержкой СВИ
- ❑ использование комплексного подхода позволяет снизить относительные затраты на внедрение УСВИ



функциональный подход

- ❑ для решения некоторых задач в РЭС не требуется очень высокая точность синхронизации (например, для локализации КЗ/ОЗЗ на базе СВИ)
- ❑ рациональным решением является разработка недорогих устройств с поддержкой СВИ для таких задач
- ❑ функциональный подход позволяет значительно снизить стоимость УСВИ, особенно в больших масштабах производства



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Технология СВИ является важным инструментом для реализации функций систем защиты, автоматики, мониторинга и управления на объектах РЭС и распределенной генерации.
2. Несмотря на привлекательность использования технологии СВИ в РЭС, необходима разработка специализированных устройств с поддержкой СВИ в силу высокой стоимости традиционных УСВИ и систем на их основе.
3. Предлагается применение двух подходов: системного подхода (для автоматизации центров питания РЭС) и функционального подхода (для кабельных и воздушных сетей).
4. Для мониторинга трансформаторов предложено использование многофункционального ИЭУ с поддержкой СВИ. Применение подобных ИЭУ в сочетании с УРЗА трансформатора позволяет решить основные задачи по автоматизации подстанций.
5. Для локализации ОЗЗ в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью разработано специализированное устройство с поддержкой УСВИ, обеспечивающее минимальные затраты на создание системы.
6. Представлены решения для центров питания и РЭС среднего напряжения подтверждают эффективность и перспективность применения технологии СВИ в РЭС.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hojabri, M., Dersch, U., Papaemmanouil, A. & Bosshart, P. 2019, "A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems", *Energies*, vol. 12, no. 23.
2. Илюшин, П. В. Особенности реализации автоматики управления режимами энергорайонов с объектами распределительной генерации / П. В. Илюшин, А. Л. Куликов // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 3(36). – С. 14-23.
3. Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., Ciappi, G. & Solari, A. 2011, "Synchronized phasors monitoring during the islanding maneuver of an active distribution network", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 82-91.
4. Liu, Y., You, S., Yao, W., Cui, Y., Wu, L., Zhou, D., Zhao, J., Liu, H. & Liu, Y. 2017, "A distribution level wide area monitoring system for the electric power grid-FNET/GridEye", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2329-2338.
5. Terzija, V., Valverde, G., Cai, D., Regulski, P., Madani, V., Fitch, J., Skok, S., Begovic, M.M. & Phadke, A. 2011, "Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 80-93.
6. El-Hawary, M.E. 2014, "The smart grid - State-of-the-art and future trends", *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 239-250.
7. Houghton, D.A. & Heydt, G.T. 2013, "A linear state estimation formulation for smart distribution systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1187-1195.
8. Pau, M., Pegoraro, P.A. & Sulis, S. 2013, "Efficient branch-current-based distribution system state estimation including synchronized measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 9, pp. 2419-2429.
9. NASPI Distribution Synchronized Measurements Roadmap Final Report, Mon, 09/27/2021.
10. Angioni, A., Lipari, G., Pau, M., Ponci, F. & Monti, A. 2017, "A Low Cost PMU to Monitor Distribution Grids", *AMPS 2017 - IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, Proceedings*.
11. Estimated Quantitative Cost Range Analysis for Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) in Ontario's Power System, September, 2021
12. PMU COST & BENEFITS STUDY, CAPER Meeting, August 7 & 8, 2017
13. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. и др. Системы управления, мониторинга и защиты на основе синхронизированных векторных // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах, Волжский, 13–17 сентября 2021 года / Отв. редактор Н.И. Воропай. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. – С. 133-142.
14. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. и др. Автоматизация распределительных сетей среднего напряжения на базе синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 4(45). – С. 54-60.
15. Mokeev, A.V. & Piskunov, S.A. 2021, "Expanding the Field of Synchronized Phasor Measurements Application in Power Systems", *SIBCON 2021 - International Siberian Conference on Control and Communications*.
16. Khromtsov, E.I., Mokeev, A.V., Andreev, P.I., Petrov, K.V., Rodionov, A.V. & Ulyanov, D.N. 2019, "Applications of Synchrophasors in Relay Protection of Digital Substations and Digital Grids", *2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019*.
17. Mokeev, A.V., Piskunov, S.A., Ulyanov, D.N. & Khromtsov, E.I. 2020, "Improving the efficiency and reliability of RPA systems of digital step-down substations and digital grids", *E3S Web of Conferences*.
18. Phasor measurement unit RES670 2.0 ANSI Application Manual (режима доступа: <https://library.e.abb.com>)
19. SEL-2240 Axion (режима доступа: <https://selinc.com/ru/products/2240>)
20. Phasor measurement unit, Siemens (режима доступа: <https://new.siemens.com/global/en/products>)
21. GE Grid Solutions MiCOM Agile P847(режим доступа: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/p847.htm>)
22. Nielsen, J.J., Ganem, H., Jorguseski, A. 2017, "Secure Real-Time Monitoring and Management of Smart Distribution Grid Using Shared Cellular Networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 10-17.



инженерный центр
энергосервис

Благодарю за внимание !



Пискунов Сергей

+7 911 583 9102

s.piskunov@ens.ru

