

Развитие прикладных задач управления сетями на базе векторных измерений параметров электрического режима

> Векторные измерения

Традиционные измерительные преобразователи:

- измерение **действующих значений** U , I , измерение и расчет дополнительных параметров (f , P , Q , S , $\cos\varphi$ и др.);
- точность синхронизации – от **1** до **50** мс;
- период измерений не нормирован (обычно **0,2 – 1** сек.);

Векторные измерительные преобразователи:

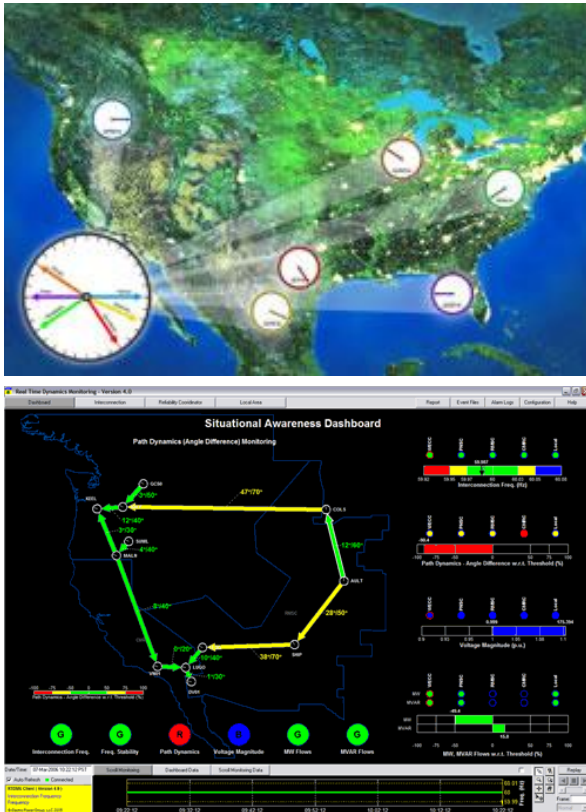
- измерение **векторных (комплексных) значений** \dot{U} , \dot{I} с учетом колебаний частоты, измерение f и расчет дополнительных параметров (P , Q , S , $\cos\varphi$ и др.);
- точность синхронизации – не хуже **0,005** мс; **Качественно новая информация** о текущих фазах электрических сигналов в различных точках энергосистемы;
- период измерений **20-100** мс.

Основные стандарты:

- IEEE C37.118-2005 Standard for Synchrophasors for Power Systems – *Ожидается 2-я ред.*
- IEC 61850-90-5 TR Ed. 1 – Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118 – *Проект проходит обсуждение*

➤ Системы и приложения

WAMS (Wide Area Monitoring System, WAMACS, WAM&CS, WAMPACS) –
Системы распределенного мониторинга и управления энергосистемами

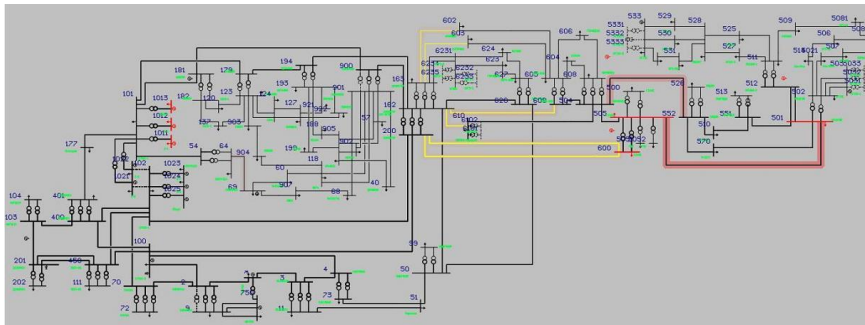


Некоторые прикладные задачи:

- Контроль устойчивости энергосистем
- Мониторинг и анализ низкочастотных межзональных колебаний
- Оценка состояния электрического режима
- Верификация моделей энергосистем
- Динамический контроль и повышение пропускной способности ЛЭП
- Плановое выделение и ресинхронизация участков энергосистем

Более полный перечень: www.naspi.org

➤ Системы и приложения



СМНР – Система мониторинга переходных режимов:

- Запись и off-line анализ текущих и аварийных архивов векторных измерений с дискретизацией 20 мс и длительностью 20 мин.
- 38 объектов ЕЭС/ОЭС 750-500-330 кВ;
- 7 центров концентрации данных

СМЗУ – Система on-line мониторинга запасов устойчивости:

- Оценка состояния (в т.ч. на базе векторных измерений);
- Выявление опасных сечений и расчет условий устойчивости;
- Внедрена в 2009 на севере Тюменской обл.
- В 2011 – расширение на операционную зону ОДУ Урала.
- Возможность повышения пропускной способности сетей – до 15%

Сложности продвижения технологии

СМНР и СМЗУ внедряются на подстанциях и на объектах генерации, но используются в настоящее время исключительно для нужд ОАО «СО ЕЭС».

Существующие стереотипы:

- Результаты векторных измерений не интересны сетевым компаниям
- Векторные измерительные преобразователи – дорогостоящие специализированные устройства, устанавливаемые в дополнение к существующим средствам автоматизации

➤ Прикладные задачи для ЭС

Состав возможных прикладных задач для электрических сетей:

- on-line расчет параметров схем замещения, элементов сети;
- развитие алгоритмов оценки состояния для ЦУС с учетом измерений фазовых углов и параметров схем замещения;
- on-line расчет и структурирование технических потерь мощности и электроэнергии
- расширение инструментов мониторинга термической устойчивости ЛЭП;
- дополнительные способы мониторинга трансформаторного оборудования;
- новые способы ОМП;
- динамическое управление уставками РЗА;
- ...



➤ Прикладные задачи для ЭС

Классификация задач управления с использованием векторных измерений

Прикладные задачи	Актуальность применения			Требуемая частота сбора
	СО	ФСК	РСК	
Оперативное управление				
Базовые алгоритмы обработки измерений				
Идентификация параметров схем замещения элементов электрической сети	√	√	√	Невысокая
Оценка состояния электрического режима:				
• контроль достоверности и замещение недостоверных данных на различных уровнях сбора и агрегации данных	√	√	√	Невысокая
• фиксация фактов изменения топологии сети вне пределов оперативного контроля (в смежных энергосистемах, сетях других собственников)	√	√	√	Высокая
• оценивание состояния электрического режима	√	√	√	Невысокая

➤ Прикладные задачи для ЭС

Классификация задач управления с использованием векторных измерений

Прикладные задачи	Актуальность применения			Требуемая частота сбора
	СО	ФСК	РСК	
Обеспечение ситуационной осведомленности				
Визуализация параметров режима, топологии сети и контроль нарушения пределов:				
• отклонений основной частоты	√			Высокая
• уровней межзональных низкочастотных колебаний	√			Высокая
• запасов по статической устойчивости	√			Высокая
• допустимых уровней напряжения и запаса реактивной мощности	√	√	√	Невысокая
• пропускной способности линий электропередач по условиям термической устойчивости	√	√	√	Невысокая
• уровней технических потерь мощности и электроэнергии в элементах электрической сети		√	√	Невысокая
Определение мест повреждения		√	√	Высокая

➤ Прикладные задачи для ЭС

Классификация задач управления с использованием векторных измерений

Прикладные задачи	Актуальность применения			Требуемая частота сбора
	СО	ФСК	РСК	
Оперативное обеспечение надежности электроснабжения				
Анализ и демпфирование межзональных низкочастотных колебаний	√			Высокая
Автоматизированное управление активным силовым оборудованием в реальном времени	√	√	√	Высокая
Мониторинг и балансирование распределенной генерации с изменчивым графиком выработки электроэнергии	√			Высокая
Управление нагрузкой с учетом ее зависимости от частоты и напряжения	√	√	√	Высокая
Плановое разделение и восстановление синхронной работы энергосистем	√			Высокая
Адаптивная защита и противоаварийная автоматика	√	√	√	Высокая

➤ Прикладные задачи для ЭС

Классификация задач управления с использованием векторных измерений

Прикладные задачи	Актуальность применения			Требуемая частота сбора
	СО	ФСК	РСК	
Планирование режимов				
Послеаварийный анализ динамики параметров режима и оборудования энергосистем	√	√	√	Высокая
Выявление ошибок и уточнение параметров моделей энергосистем как для реального, так и для отложенного времени:	√	√	√	
• уточнение параметров генераторов	√			Высокая
• уточнение параметров пассивного и активного силового оборудования электрических сетей	√	√	√	Невысокая
• анализ поведения и уточнение моделей нагрузки	√	√	√	Высокая
Уточнение уставок защит и противоаварийной автоматики	√	√	√	Невысокая

➤ Прикладные задачи для ЭС

Классификация задач управления с использованием векторных измерений

Прикладные задачи	Актуальность применения			Требуемая частота сбора
	СО	ФСК	РСК	
Управление эксплуатацией оборудования				
Анализ динамики изменения параметров схем замещения ЛЭП и трансформаторного оборудования		√	√	Невысокая
Расчет изменения паспортных характеристик (Z_k , P_{xx}) трансформаторов, дополнительные методы диагностики		√	√	Невысокая
Испытания и ввод в эксплуатацию устройств и систем релейной защиты и автоматики	√	√	√	Высокая
Рыночные операции				
Планирование операций на рынке с учетом прогнозируемых пределов реальной пропускной способности сетей	√			Невысокая

➤ Прикладные задачи для ЭС

Задачи оперативного управления:

Базовые алгоритмы обработки измерений:

Идентификация параметров схем замещения элементов электрической сети

Оценка состояния электрического режима:

контроль достоверности и замещение недостоверных данных на различных уровнях сбора и агрегации данных

фиксация фактов изменения топологии сети вне пределов оперативного контроля (в смежных энергосистемах, сетях других собственников)

оценивание состояния электрического режима

Прикладные задачи для ЭС

Задачи оперативного управления :

Обеспечение ситуационной осведомленности

Визуализация параметров режима, топологии сети и контроль нарушения пределов:

- допустимых уровней напряжения и запаса реактивной мощности

- пропускной способности линий электропередач по условиям термической устойчивости

- уровней технических потерь мощности и электроэнергии в элементах электрической сети

Определение мест повреждения

➤ Прикладные задачи для ЭС

Задачи оперативного управления :

Оперативное обеспечение надежности электроснабжения

Автоматизированное управление активным силовым оборудованием в реальном времени

Управление нагрузкой с учетом ее зависимости от частоты и напряжения

Адаптивная защита и противоаварийная автоматика

➤ Прикладные задачи для ЭС

Задачи оперативного управления :

Планирование режимов

Послеаварийный анализ динамики параметров режима и оборудования энергосистем

Выявление ошибок и уточнение параметров моделей энергосистем как для реального, так и для отложенного времени:

- уточнение параметров генераторов

- уточнение параметров пассивного и активного силового оборудования электрических сетей

- анализ поведения и уточнение моделей нагрузки

- Уточнение уставок защит и противоаварийной автоматики

Прикладные задачи для ЭС

Управление эксплуатацией оборудования:

Анализ динамики изменения параметров схем замещения ЛЭП и трансформаторного оборудования

Расчет изменения паспортных характеристик (Z_k , P_{xx}) трансформаторов, дополнительные методы диагностики

Испытания и ввод в эксплуатацию устройств и систем релейной защиты и автоматики

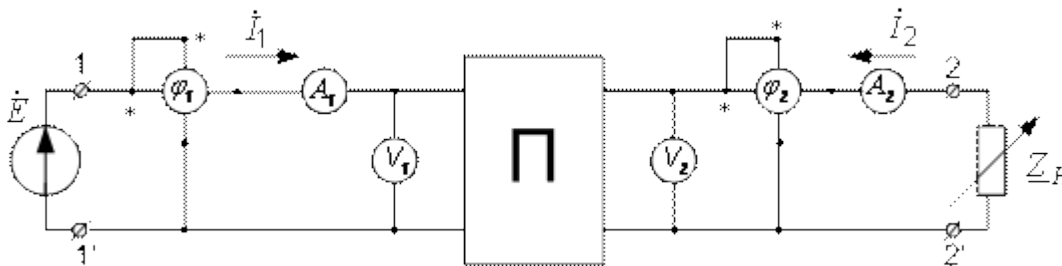
➤ Прикладные задачи для ЭС

Распределение задач по иерархии управления :



➤ Параметры схем замещения

Идентификация параметров схем замещения сетевых элементов на основе синхронизированных измерений токов и напряжений со всех сторон элемента.



$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= A \cdot \dot{U}_2 + B \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= C \cdot \dot{U}_2 + D \cdot \dot{I}_2\end{aligned}$$

Отсутствует необходимость проведения специальных опытов холостого хода и короткого замыкания. Для симметричных схем замещения параметры могут быть идентифицированы по результатам одного измерения.

➤ Параметры схем замещения

Стоит ли овчинка выделки?

1. Погрешности расчета параметров схемы замещения ЛЭП¹

Параметр	Причины Δ	Диапазон Δ	Влияние режима
R	Неучёт поверхностного эффекта, влияния погодных условий	-24...+8%	сильное
X	Неточность задания эквивалентных геометрических параметров. Многократно заземленные тросы и параллельные цепи	-10...+8%	слабое
B	Неучёт изменения стрелы провеса, наличия заземленного троса, параллельных цепей, проводимости грунта и влажности воздуха	25...30%	сильное
G	Конструктивные, режимные и метеорологические условия	в 1.5 – 3 раза	очень сильное

2. Погрешности идентификации параметров схемы замещения – **на порядок меньше**

¹Идельчик В.И., Новиков А.С., Паламарчук С.И. Ошибки задания параметров схем замещения при расчетах режимов электрических систем

²Суворов А.А. Адаптивная идентификация параметров элементов электрической сети для задач оперативного и противоаварийного управления

➤ **Оценка состояния**

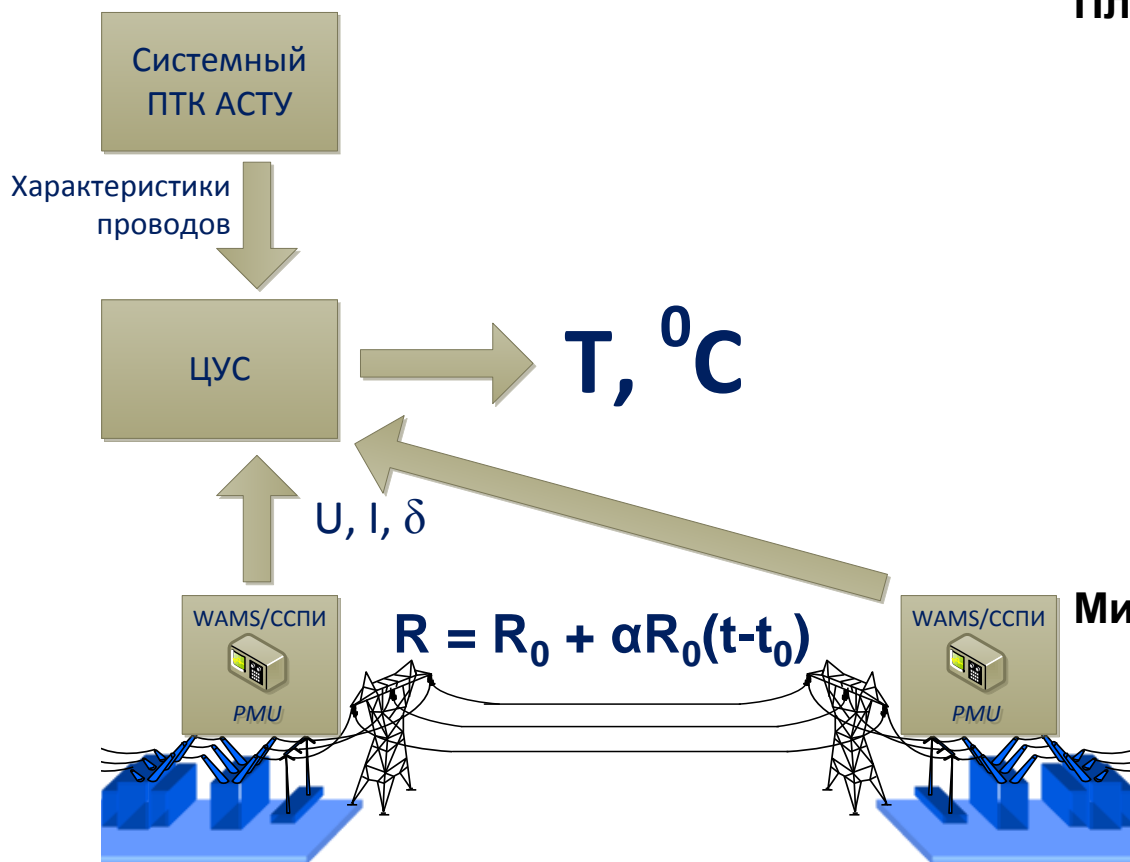
Использование измерений взаимных углов напряжений в узлах сети вместо их расчета.

1. Повышение достоверности данных и улучшение сходимости;
2. Обеспечение избыточности данных – при оптимальном размещении количество устанавливаемых векторных измерительных преобразователей в 4-5 раз ниже;
3. При достаточном количестве измерений – переход от оценки к измерению состояния электрического режима

Переход к оценке состояния электрического режима на базе оперативной идентификации параметров расчетной схемы замещения сети.

Smart Grid => Электрические сети с самоидентификацией!

➤ Мониторинг средней температуры проводов ЛЭП



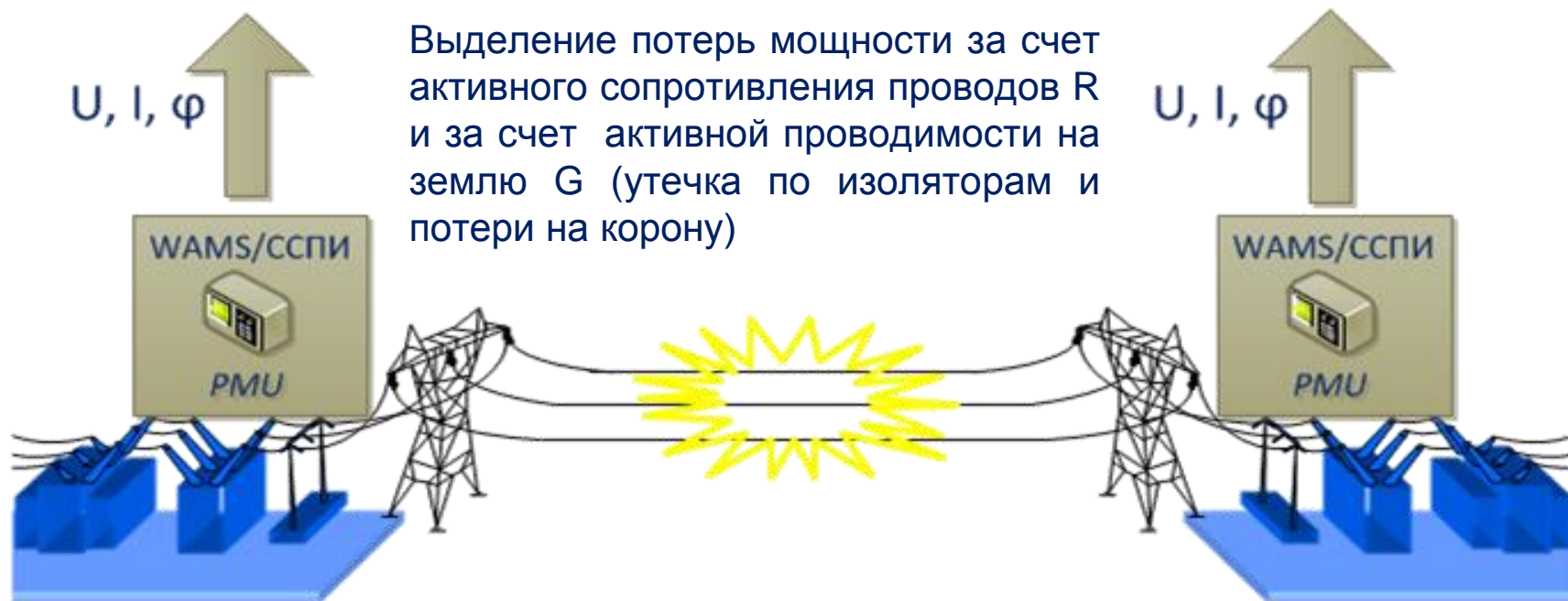
Плюсы:

- Минимальное количество измерительных преобразователей
- Прямое измерение (отсутствие необходимости учета метеорологических факторов)
- Возможность использования многофункциональных измерительных преобразователей

Минусы:

- Отсутствие возможности контроля температуры на отдельных участках ЛЭП

➤ Расчет и структурирование технических потерь мощности и электроэнергии



Дополнительные задачи

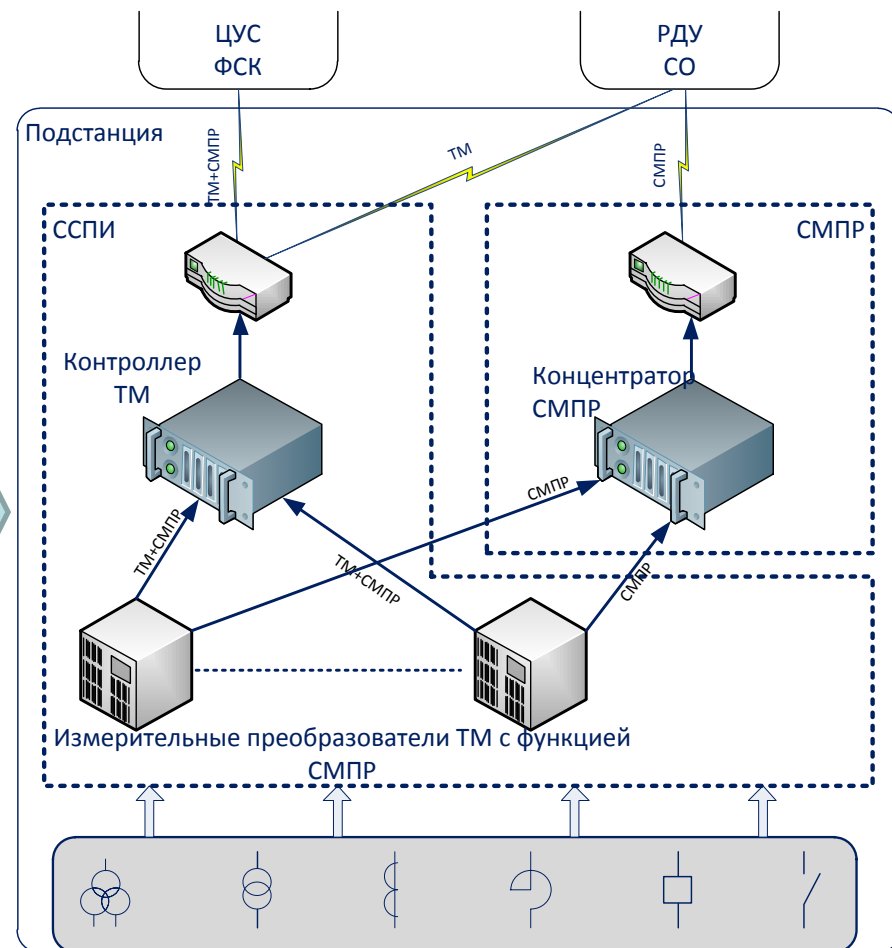
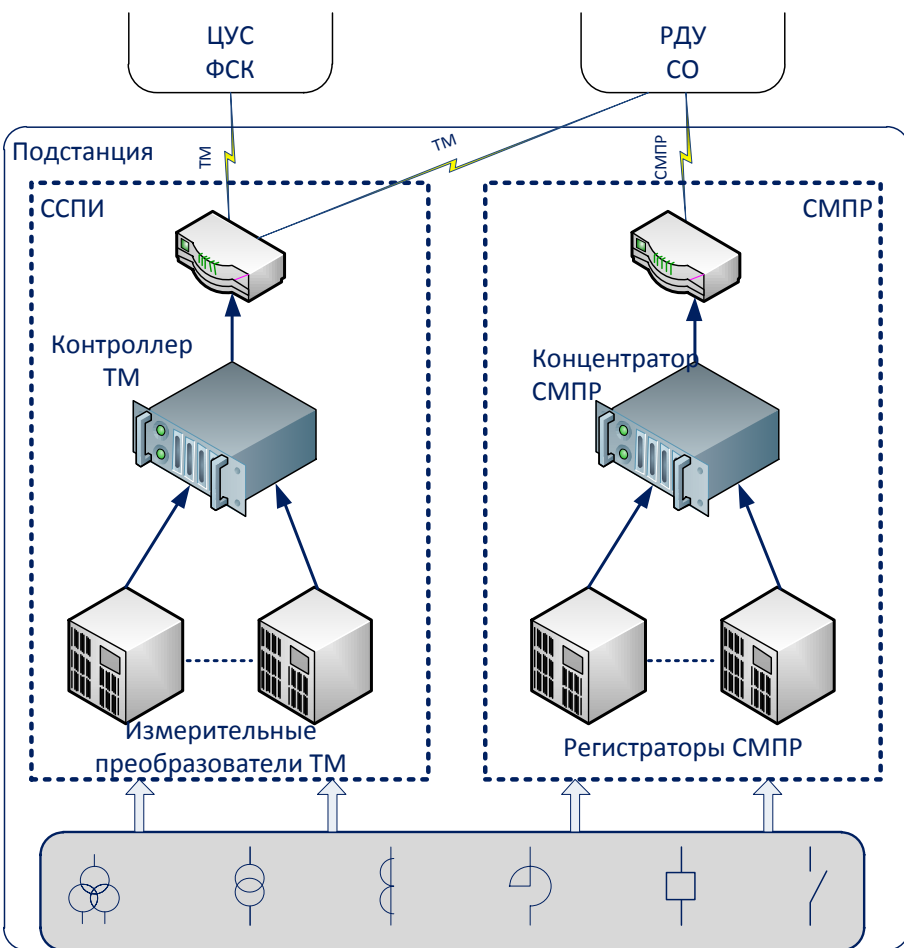
- 1. Дополнительные средства мониторинга трансформаторного оборудования:**
 - On-line мониторинг динамики изменения параметров схемы замещения во времени (выявление витковых замыканий?);
- 2. Точные адаптивные методы ОМП на базе векторных измерений напряжений и токов с двух сторон линии:**
 - Возможность учета отклонений частоты;
 - Возможность учета изменения параметров схемы замещения;
 - Высокая точность синхронизации времени.
- 3. Применения для РЗА и ПА**
 - Учет изменения параметров схем замещения при определении уставок;
 - Динамическое управление уставками?

➤ Инструменты

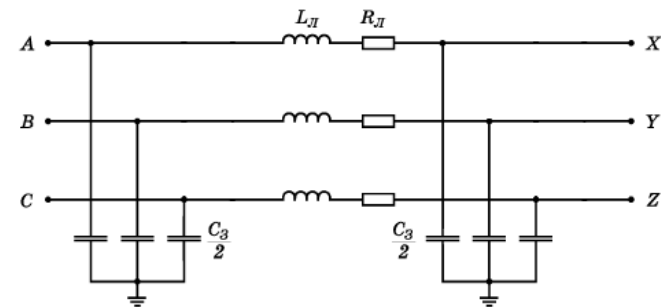
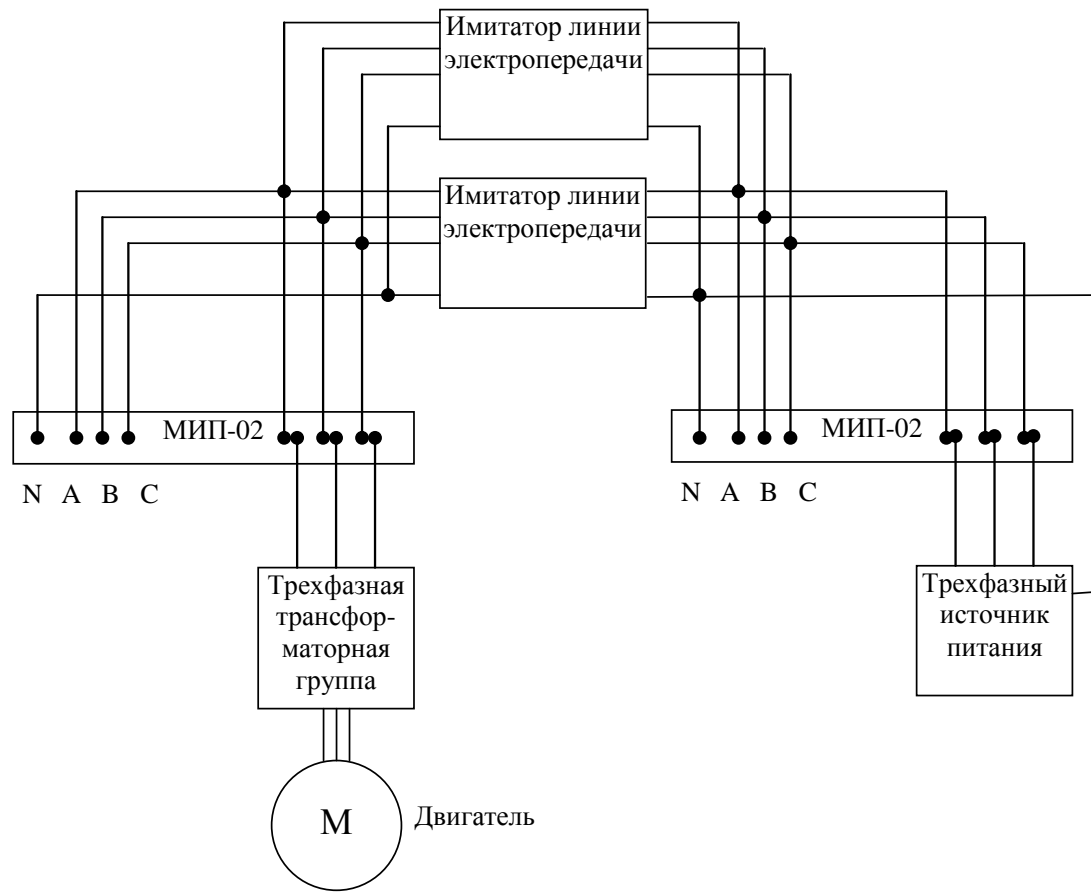


1. Новая серия многофункциональных измерительных преобразователей (ИП) МИП-02 объединяет возможности традиционных ИП для телемеханики и АСУ ТП с выполнением векторных измерений;
2. Результаты векторных измерений могут параллельно передаваться:
 - каждые 20 мс по протоколу IEEE C37.118 (требования СО ЕЭС);
 - один раз в секунду по протоколу МЭК 60870-5-104 в составе традиционных телеизмерений (дополнительная информация по фазам);
3. Порядок стоимости новых ИП тот же, что и у традиционных, что позволяет предложить их массовое применение в программах телемеханизации, создания систем АСУ ТП, систем сбора и передачи данных, систем обмена технологической информацией с СО ЕЭС

➤ Сбор векторных измерений для задач сетевой компании



➤ Схема эксперимента



➤ Результаты экспериментов

Параметры схемы замещения линии

	R (Ом)			L (Гн)			C (мкФ)		
Фаза	Параметр	Расчет	Ошибка %	Параметр	Расчет	Ошибка %	Параметр	Расчет	Ошибка %
Фаза А	29,0000	29,7232	2,4938	0,1500	0,1498	0,1360	0,3600	0,3670	1,9340
Фаза В		29,6413	2,2112		0,1498	0,1483		0,3731	3,6339
Фаза С		29,8794	3,0325		0,1516	1,0598		0,3699	2,7580
Фаза А	33,0000	34,2989	3,9362	0,3000	0,3026	0,8729	0,8000	0,8052	0,6451
Фаза В		34,2560	3,8061		0,2977	0,7693		0,8204	2,5483
Фаза С		34,6513	5,0041		0,2978	0,7208		0,8052	0,6462
Фаза А	37,0000	39,0728	5,6022	0,4500	0,4520	0,4354	1,1600	1,1760	1,3766
Фаза В		39,0530	5,5486		0,4486	0,3027		1,1860	2,2439
Фаза С		39,5111	6,7868		0,4508	0,1777		1,1663	0,5417
Фаза А	37,0000	38,9332	5,2248	0,4500	0,4518	0,3944	0,3600	0,3623	0,6437
Фаза В		39,1578	5,8320		0,4483	0,3687		0,3691	2,5380
Фаза С		39,4329	6,5755		0,4510	0,2113		0,3597	0,0718
			4,671			0,466			1,632