

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЦИФРОВЫХ ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ЦИФРОВЫХ РЭС**

**Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И.**  
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,  
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Одна из важнейших тенденций автоматизации подстанций и сетей связана с **интеграцией технологий цифровой подстанции (ЦПС) и синхронизированных векторных измерений.**

Основные преимущества использования СВИ связаны со снижением требований к объему передаваемой информации, так как требуется передача всего шести синхронизированных векторов (синхровекторов) тока и напряжения для расчета на любом уровне управления и защиты десятков параметров режима по конкретному присоединению (около 200 параметров при использовании эквивалентных синхровекторов).

На базе синхровекторов отдельных присоединений может быть произведена оценка параметров схемы замещения энергосистемы, в том числе параметров эквивалентной энергосистемы.

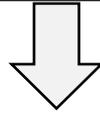
Интеграция технологий ЦПС и СВИ открывает новые возможности для построения распределенных многоуровневых систем защиты и автоматики подстанций и электрических сетей.

1. наличие горизонтальных связей между устройствами РЗА для обмена быстрыми дискретными и аналоговыми сообщениями;
2. возможность более широкого применения защит с абсолютной селективностью;
3. применение современных датчиков тока и напряжения, в которых отсутствуют или минимизированы погрешности вследствие насыщения, остаточной намагниченности, феррорезонанса;
4. использование дополнительных признаков распознавания повреждения на основе синхровекторов за счет расчета до 200 параметров режима присоединения;
5. использование темпоральной логики (temporal logic);
6. идентификация параметров схемы замещения и параметров эквивалентной энергосистемы на основе данных СВИ;
7. реализация распределенных многоуровневых систем РЗА с эффективным резервированием даже в случае частичной или полной деградации коммуникационной сети на подстанции.

# Преимущества использования синхровекторов

## Синхровекторы напряжения и тока присоединения

$$\dot{U}_{a(1)}, \dot{U}_{b(1)}, \dot{U}_{c(1)}, \dot{I}_{a(1)}, \dot{I}_{b(1)}, \dot{I}_{c(1)}, f$$



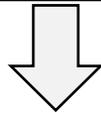
быстрый расчет около 100 параметров режима присоединения

$$\dot{U}_{1(1)}, \dot{U}_{2(1)}, \dot{U}_{0(1)}, \dot{I}_{1(1)}, \dot{I}_{2(1)}, \dot{I}_{0(1)}, \dot{S}_{a(1)}, \dot{S}_{b(1)}, \dot{S}_{c(1)}, \dot{S}_{(1)}, \dot{S}_{1(1)}, \dot{S}_{2(1)}, \dot{S}_{0(1)} \dots$$

дополнительно для защиты  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c, \underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0 \dots$

## Эквивалентные синхровекторы напряжения и тока присоединения

$$\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c, \dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$$



быстрый расчет параметров режима присоединения с учетом высших гармоник

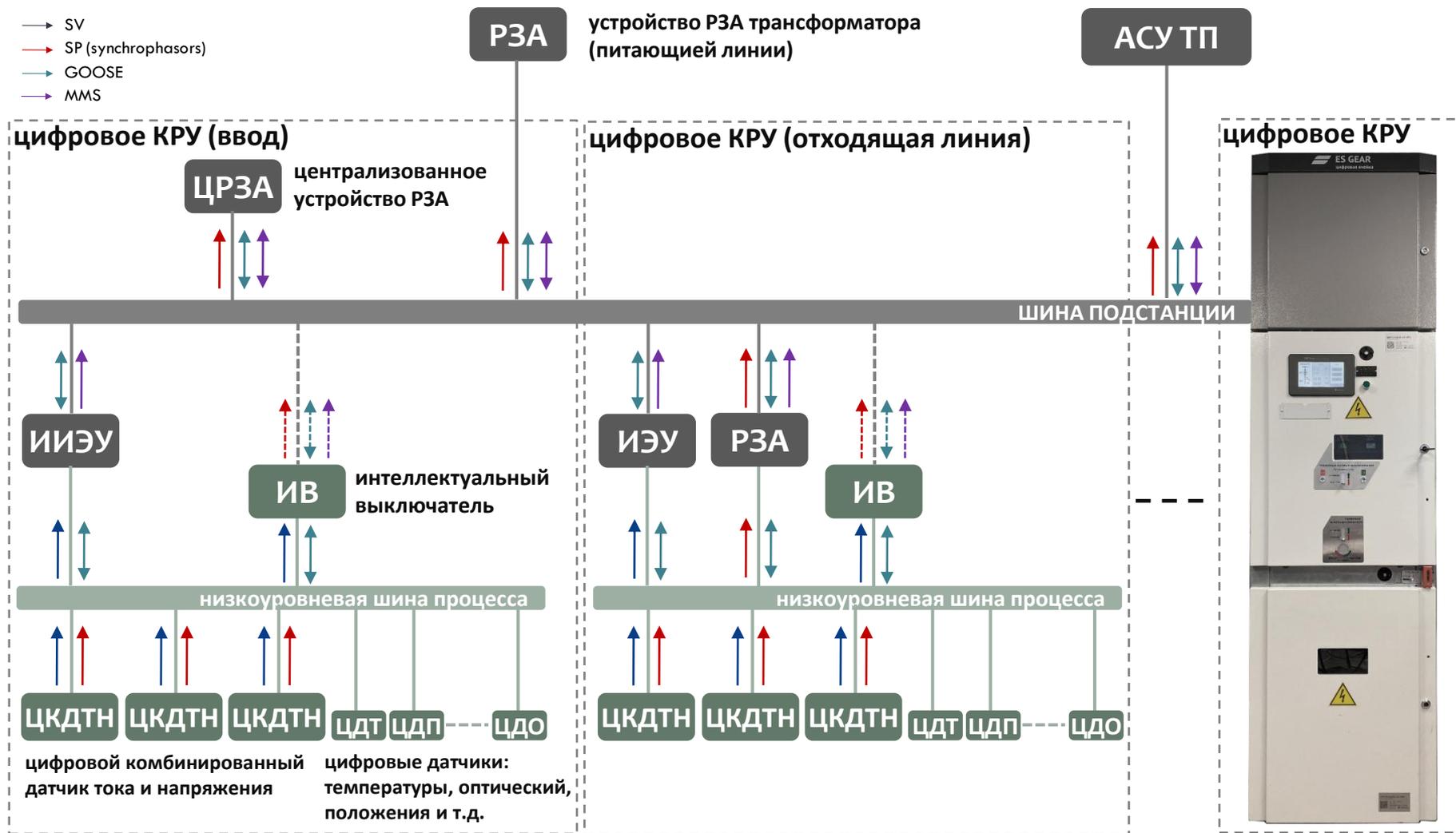
$$\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0, \dot{S}_a, \dot{S}_b, \dot{S}_c, \dot{S}, \dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_0 \dots$$

Оценка параметров схемы замещения и параметров эквивалентной энергосистемы на основе синхровекторов тока и напряжения отдельных присоединений

Эффект от интеграции технологий ЦПС и СВИ: создание распределенных многоуровневых систем РЗА

# АРХИТЕКТУРА РЗА ПОДСТАНЦИЙ (РП)

5



## Трёхуровневая распределенная система РЗА: интеллектуальный выключатель ИВ (резервная РЗ), локальное УРЗА, 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

# ЦИФРОВОЕ КРУ

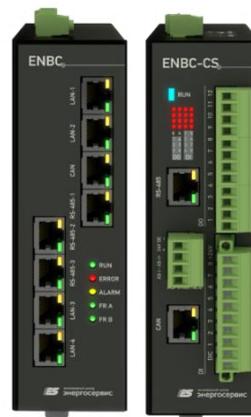
## ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЦИФРОВОГО КРУ



Интеллектуальный выключатель  
VF12



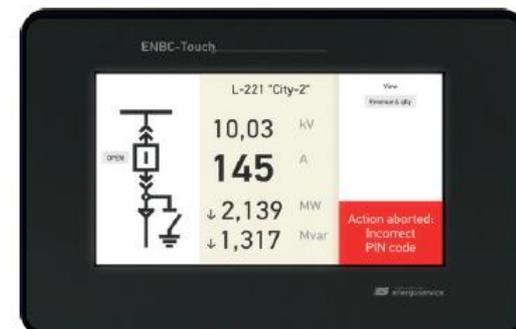
Цифровой комбинированный  
датчик тока и напряжения 10 кВ  
TECV.P1-10



МФУ РЗА ENBC



МФУ ESM



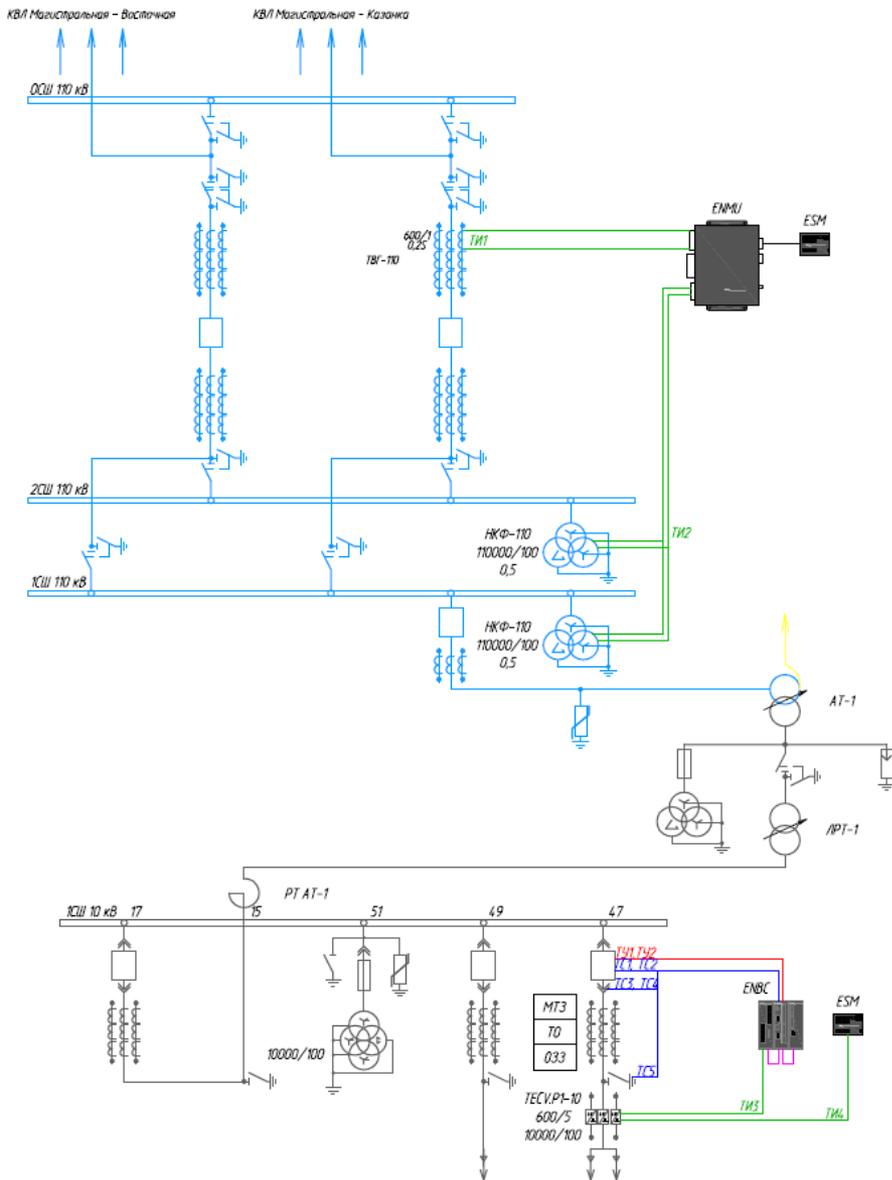
Модуль индикации



Код	Наименование	Статус
51P-1	III ступень МТЗ	Сработала I ступень МТЗ
51P-2	II ступень МТЗ	
50P/51P	I ступень МТЗ	
51N-1	III ступень 3033	
51N-2	II ступень 3033	
50N/51N	I ступень 3033	

В первой половине 2018 года завершены работы по ретрофиту КРУ 10 кВ на подстанции 110 кВ Магистральная (ОАО «Сетевая компания»).

Используемое оборудование:  
TECV.P1-10, ESM, ENBC, ENMU.

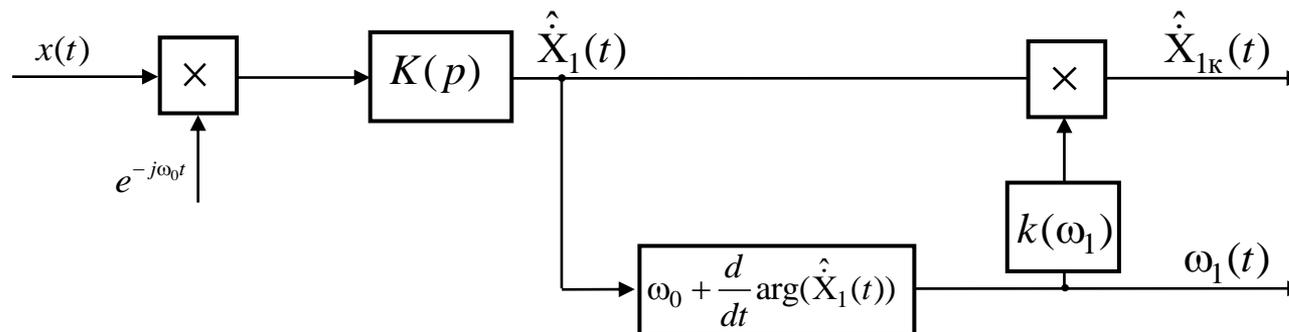


## **Особенности и требования к УСВИ для реализации устройств РЗА**

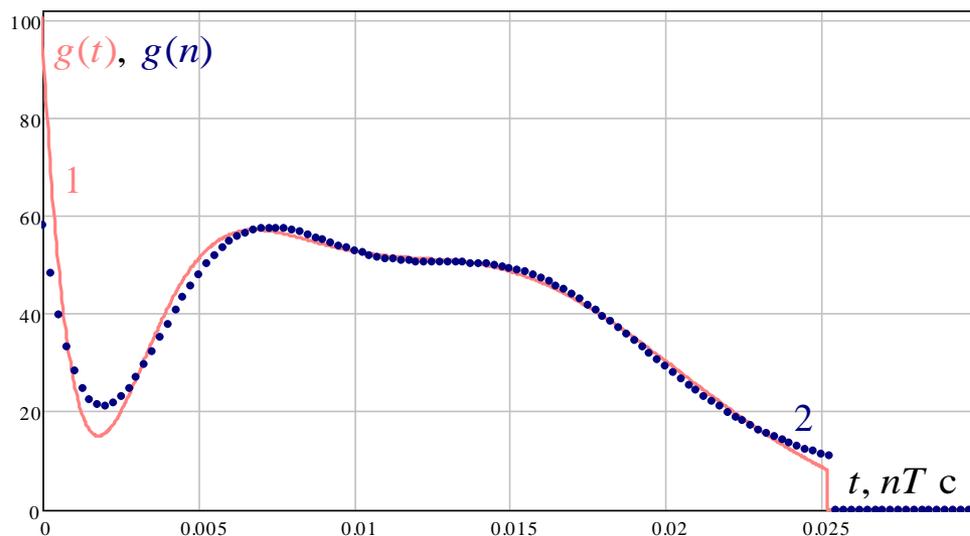
- повышения быстродействия и снижение требований по точности обработки сигналов;
- обеспечение правильной работы в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов;
- повышение темпа передачи синхровекторов.

**Сертификационные испытания:** необходимо увеличивать количество тестовых испытаний, соответствующих сложным электромеханическим и электромагнитным переходным процессам.

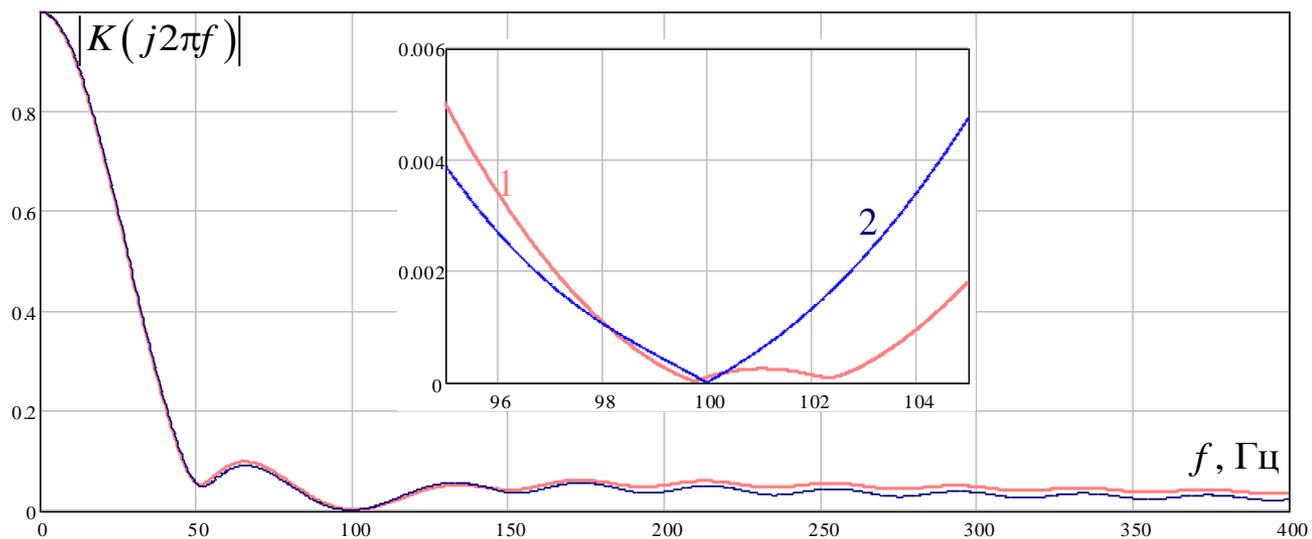
Модифицированный алгоритм обработки сигнала для аналоговой системы-прототипа



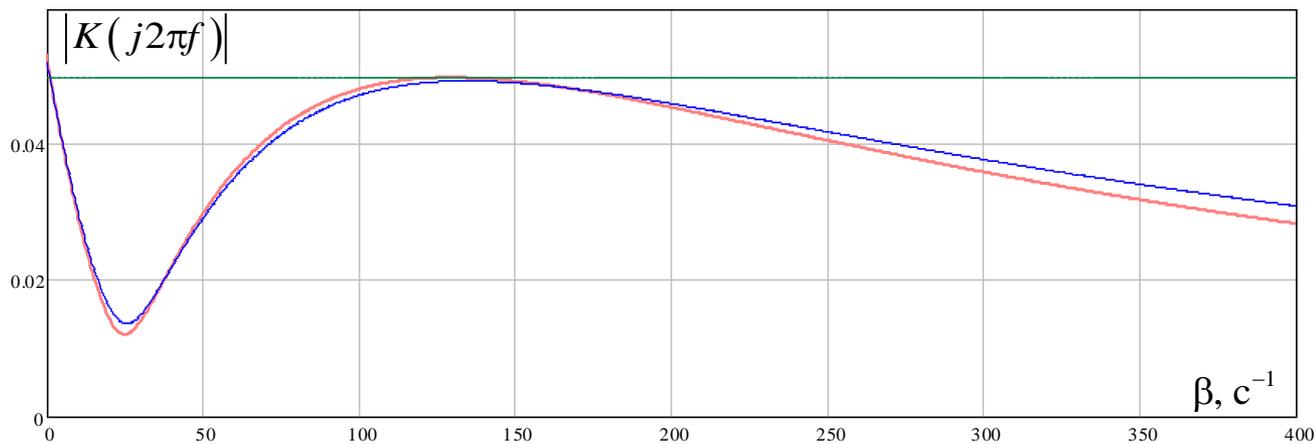
## Импульсные характеристики фильтров



Синтезирован аналоговый фильтр-прототип (кривая 1). Для получения описания цифрового фильтра можно воспользоваться известными способами перехода. Но, как показали исследования, для фильтров с ярко выраженной несимметричной импульсной характеристики лучше использовать прямой синтез цифровых фильтров. На рисунке приведена импульсная функция цифрового фильтра (кривая 2) при тех же условиях синтеза, что и для фильтра 1 при частоте дискретизации 80 точек на период промышленной частоты.

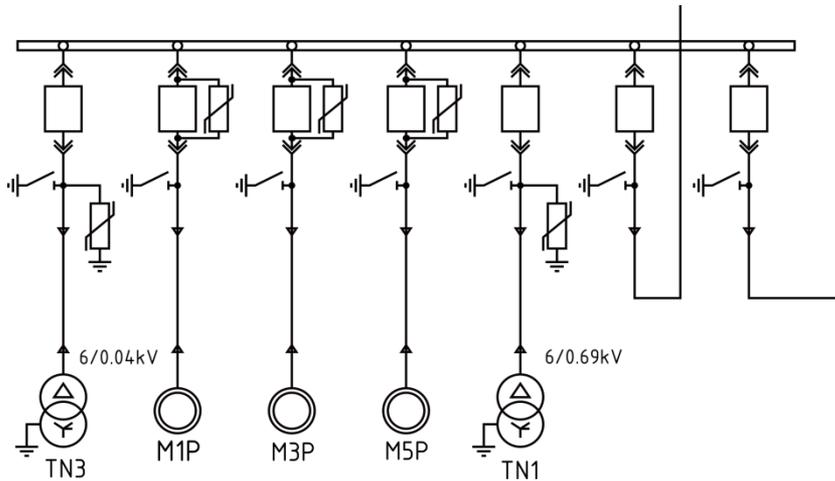


АЧХ в сечении  $p = j2\pi f$



АЧХ в сечении  $p = -\beta + j2\pi 50$

## Модель в системе Simulink®

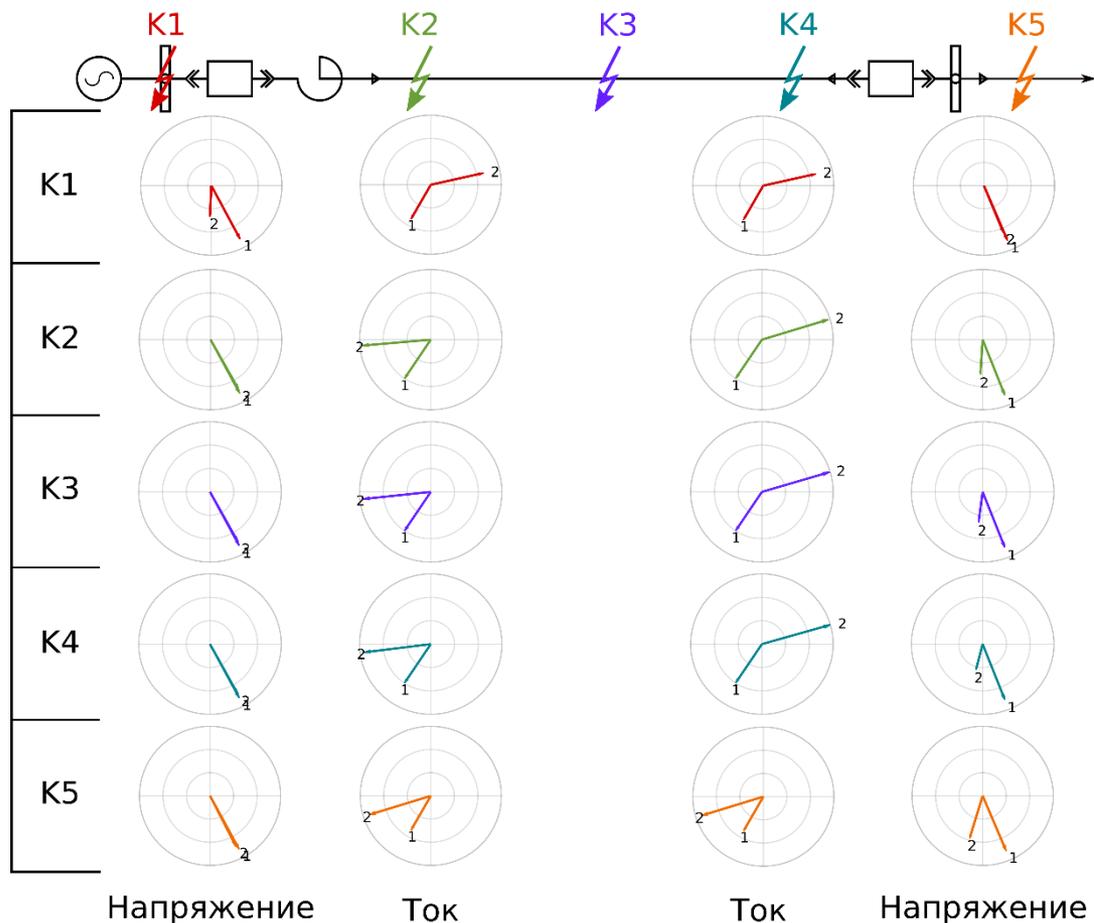


Защита питающей линии и шин для распределительного устройства 6 кВ целлюлозно-бумажного предприятия.

Для упрощения показана только одна секция шин РП, подключенная к шинам генераторного напряжения заводской ТЭЦ.

Отходящие от шин присоединения включают 3 двигателя по 3 МВт (показано только 2), трансформатор 3,2 МВА с преобладанием двигательной нагрузки, трансформатор 1 МВА с очень низкой долей двигательной нагрузки.

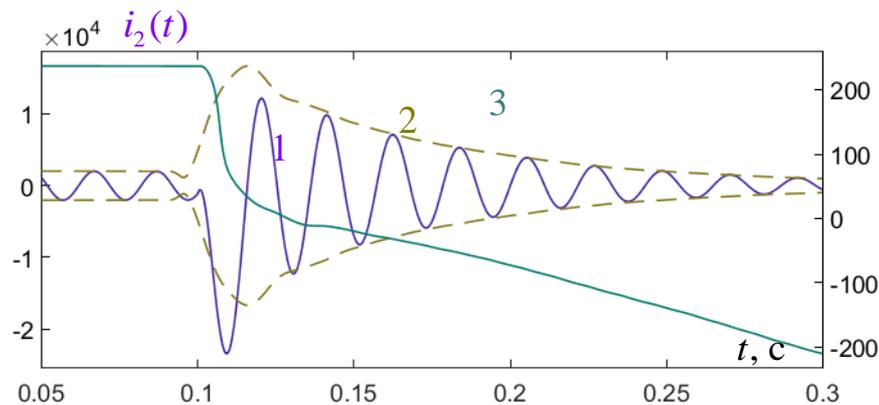
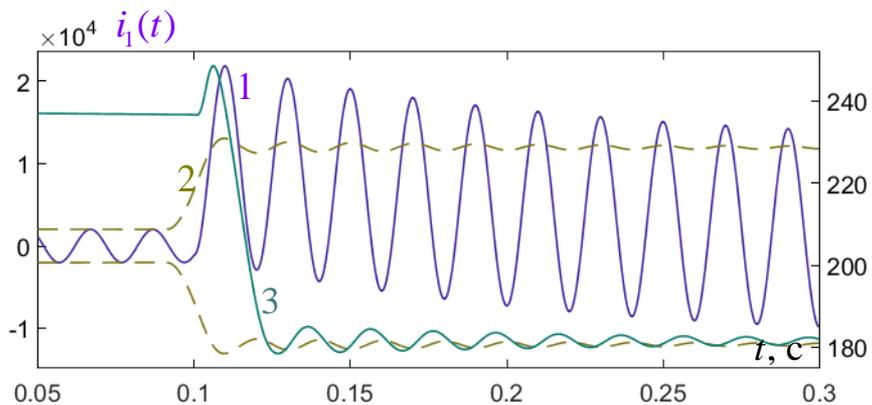
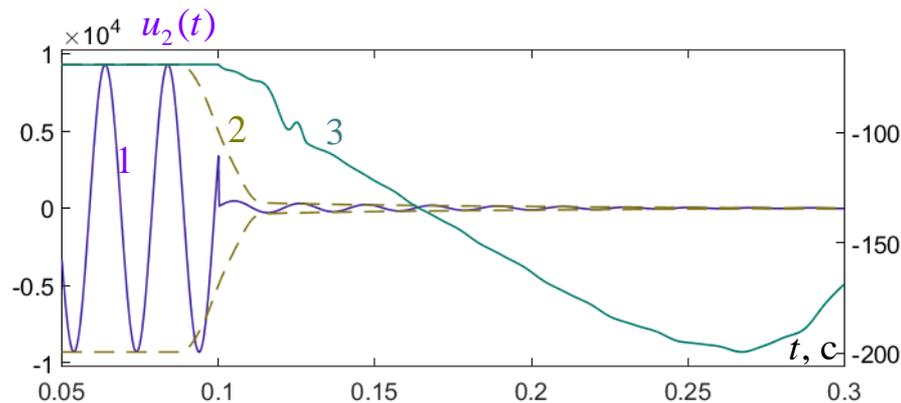
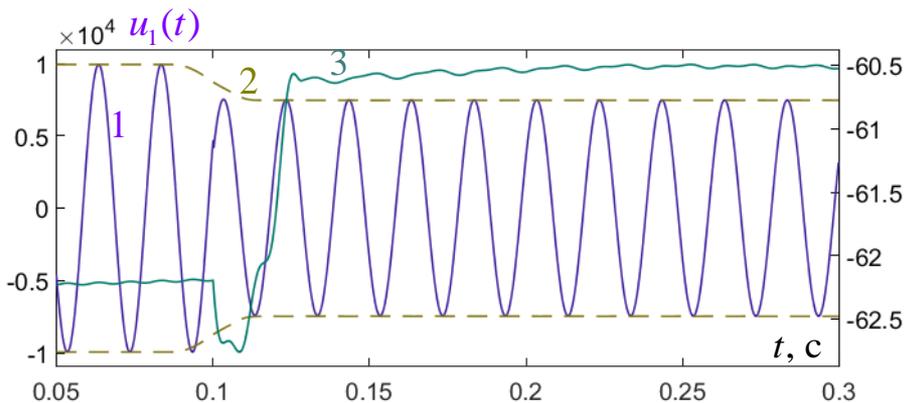
# Защита кабельной линии (РП)



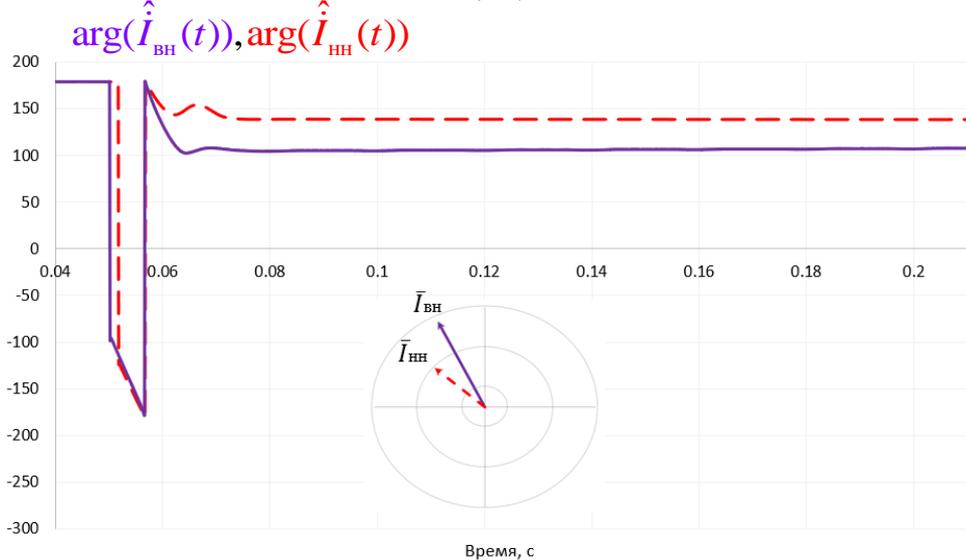
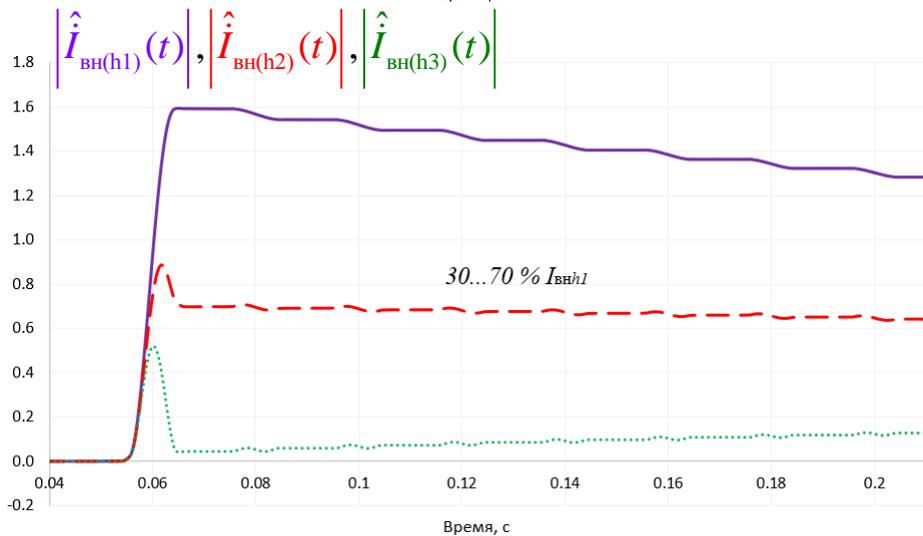
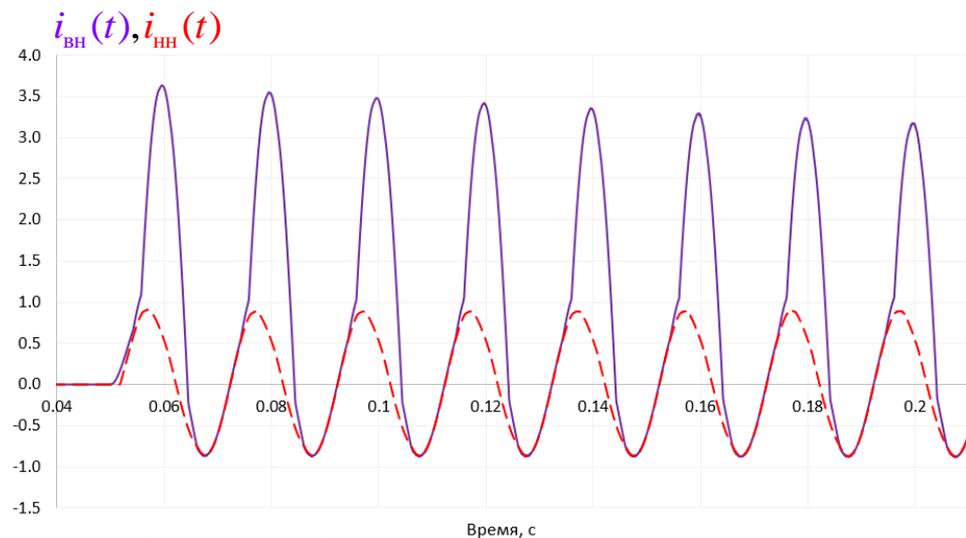
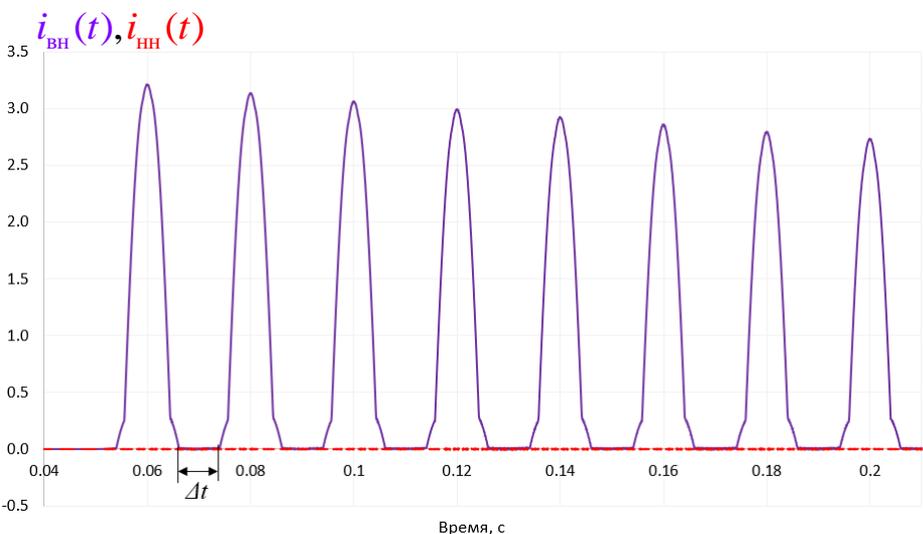
1 – нормальный режим, 2 – по истечении 10 мс после КЗ.

Сравнение модулей и фаз синхровекторов тока позволяет реализовать эффективную защиту с абсолютной селективностью.

Дополнительно для повышения чувствительности защиты может быть использована информация о синхровекторах напряжения на шинах генераторного напряжения и шинах РП.



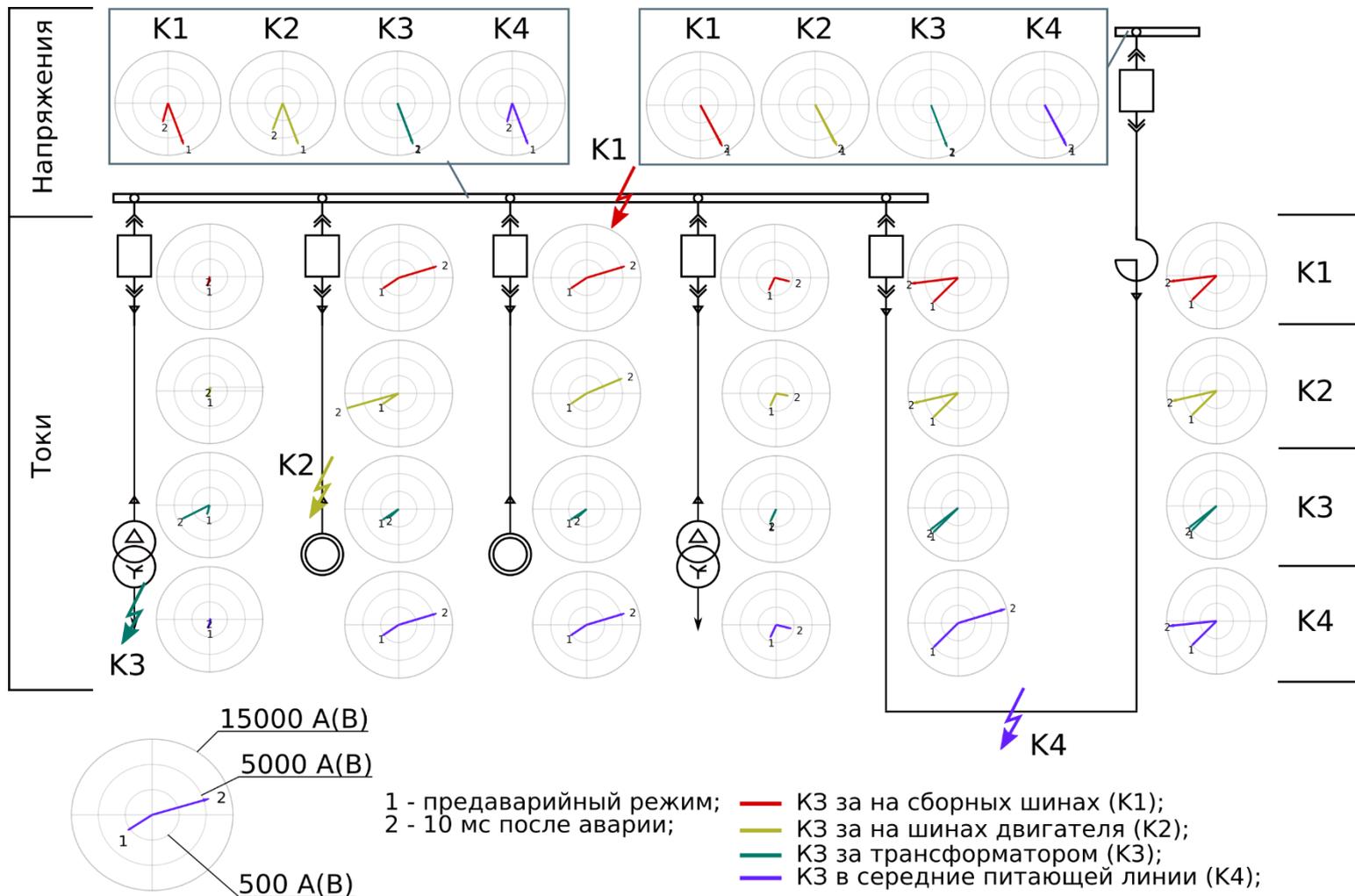
Графики напряжения и тока (кривая 1) вначале  $u_1(t)$ ,  $i_1(t)$  и в конце линии  $u_2(t)$ ,  $i_2(t)$ , а также графики модулей  $\sqrt{2}|\hat{U}_1(t)|$ ,  $\sqrt{2}|\hat{U}_2(t)|$ ,  $\sqrt{2}|\hat{I}_1(t)|$ ,  $\sqrt{2}|\hat{I}_2(t)|$  (кривые 2) и аргументов (кривые 3) синхровекторов при коротком замыкании в середине защищаемой линии.



БТН при включении трансформатора  
на холостой ход

БТН при включении трансформатора  
на нагрузку

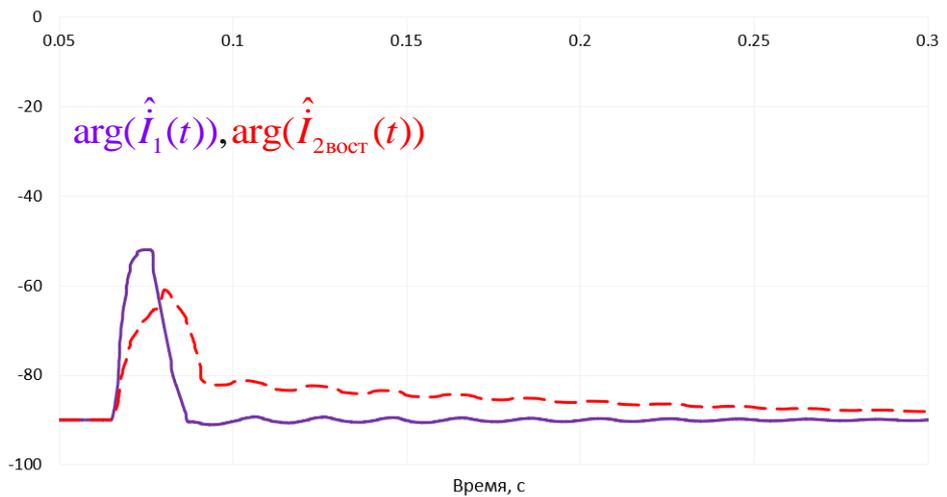
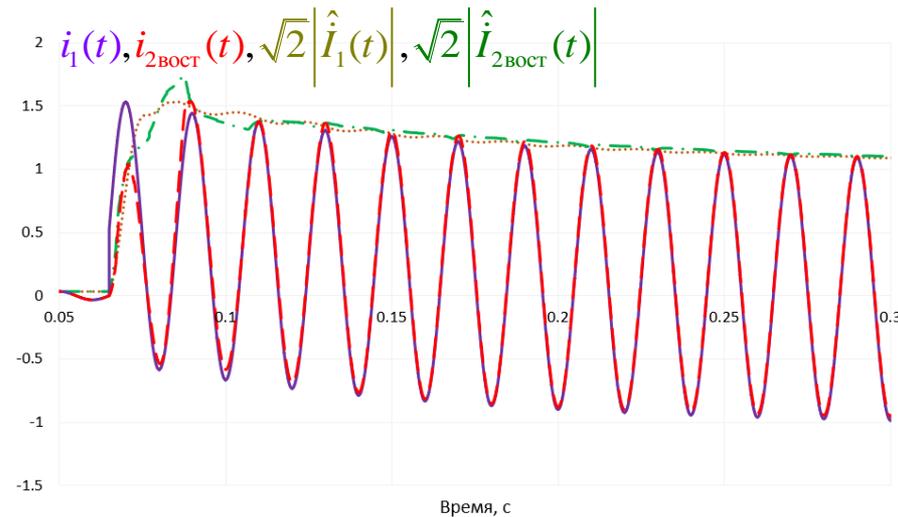
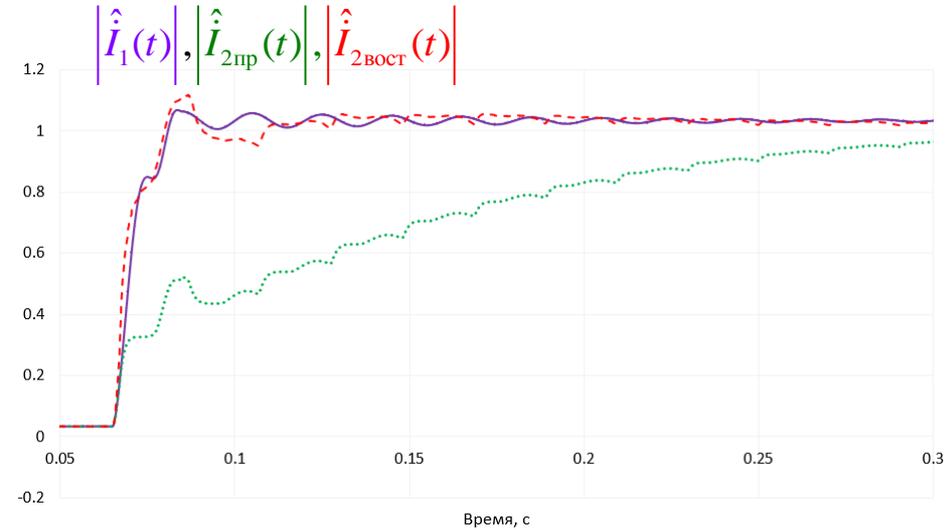
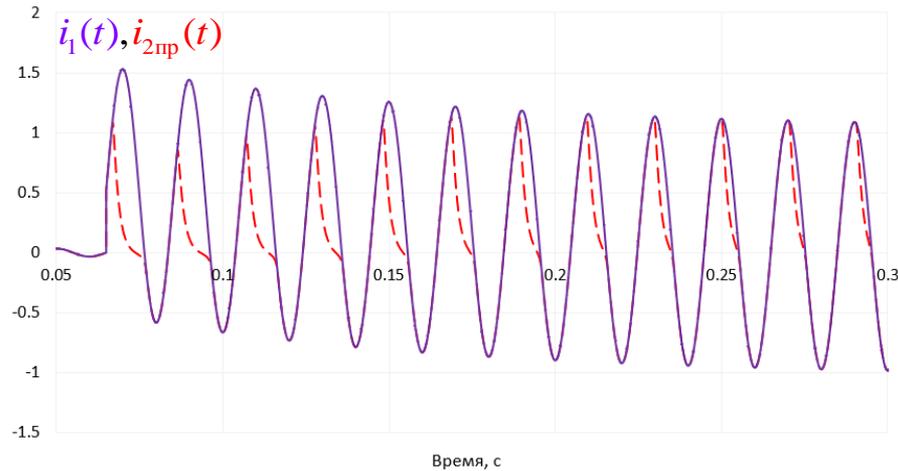
# Защита шин



Релейная защита шин с абсолютной селективностью, сочетающая дифференциальный принцип с контролем аргументов (фаз) и модулей синхровекторов присоединений.

Рассмотренные выше алгоритмы РЗ были основаны на использовании современных датчиков тока и напряжения.

При применении традиционных ИТТ предложен алгоритм восстановления синхровектора вторичного тока.



Перспективность использования технологии СВИ для релейной защиты понизительных подстанций и РП связана с возможностью широкого внедрения быстродействующих защит с абсолютной селективностью, а также увеличения функциональных возможностей защит.

При создании локальных и распределенных систем РЗ с поддержкой технологии СВИ особое внимание следует уделять моделированию защищаемого объекта и защиты, синтезу быстродействующих алгоритмов устройств РЗА.

# *Благодарим за внимание!*

**Мокеев Алексей Владимирович**

зам. генерального директора ООО "Инженерный центр "Энергосервис",

[a.mokeev@ens.ru](mailto:a.mokeev@ens.ru), <http://www.enip2.ru>

доктор техн. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет,

[a.mokeev@narfu.ru](mailto:a.mokeev@narfu.ru)

**Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И.**

[s.piskunov@ens.ru](mailto:s.piskunov@ens.ru), [d.ulyanov@ens.ru](mailto:d.ulyanov@ens.ru), [e.khromtsov@ens.ru](mailto:e.khromtsov@ens.ru)