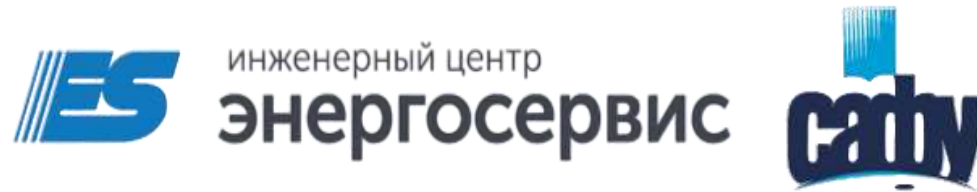


МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ИМ. Ю.Н. РУДЕНКО

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

96-е заседание «Надежность систем энергетики: устойчивое развитие и функционирование»



СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ И МОНИТОРИНГА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

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

15-19 июля 2024 г., Архангельск



Объект исследования: распределительные сети (РС) 6-35 кВ.

Предмет исследования: системы автоматизации силовых трансформаторов (СТ).

Постановка проблемы:

- наибольшее число повреждений СТ приходится на сети среднего напряжения;
- применяемые для СТ мощностью менее 6,3 МВА токовые защиты значительно ограничены по чувствительности к внутренними повреждениям СТ;
- дифференциальные защиты СТ имеют низкую чувствительность к сложным типам повреждений (витковые замыкания, пожар в стали);
- существует проблема отстройки дифференциальной защиты СТ от бросков тока намагничивания (БНТ).

Цель исследования: совершенствование систем релейной защиты, мониторинга и автоматики СТ на основе применения технологии СВИ.

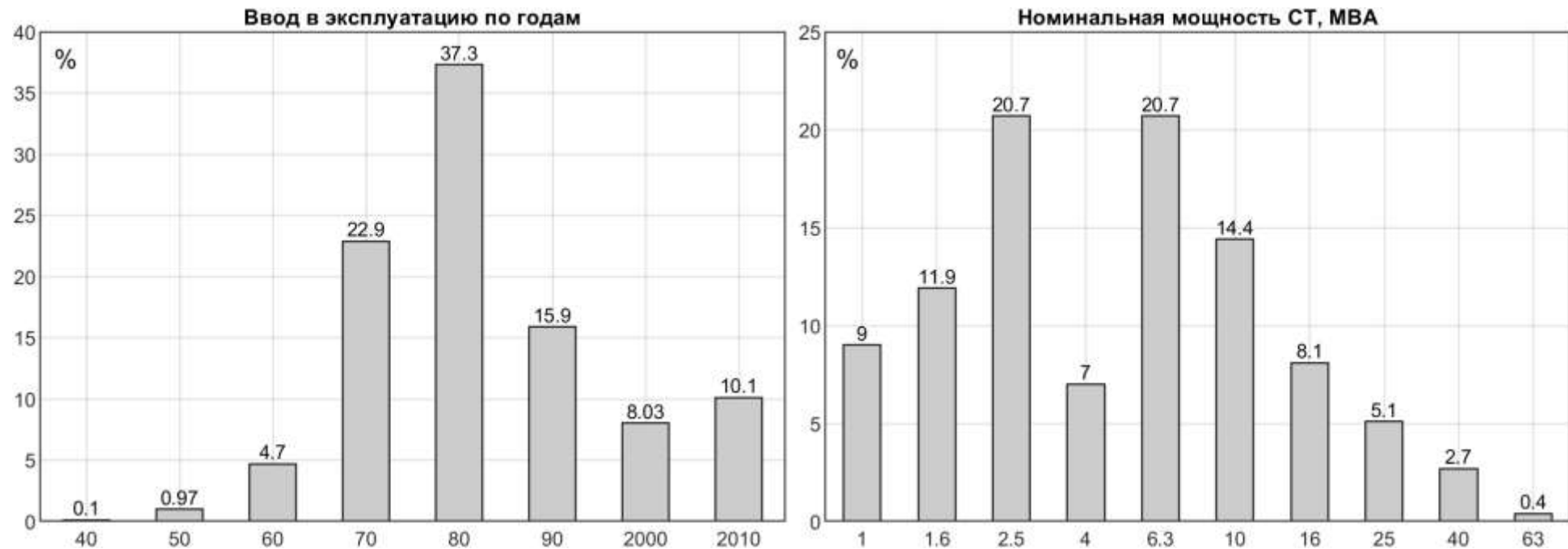
Задачи:

- анализ состава СТ и средств автоматизации распределительных сетей 6-35 кВ;
- совершенствование релейной защиты СТ;
- совершенствование систем мониторинга и автоматики СТ;
- опытно-промышленная эксплуатация разработанных систем и тестирование алгоритмов.



- топология РС обуславливает наличие множества ответвлений с тупиковыми ПС;
- наиболее распространенными номиналами мощности СТ с ВН 6-35 кВ являются 2,5 и 6,3 МВА;
- существенная доля СТ имеет большой срок эксплуатации
- доля электромеханических устройств РЗА в сетях 6-35 кВ составляет более 78 %
- преобладающим является применение электромагнитных ТТ и ТН

Статистика по силовым трансформаторам с ВН 35-110 кВ (2021 г.)



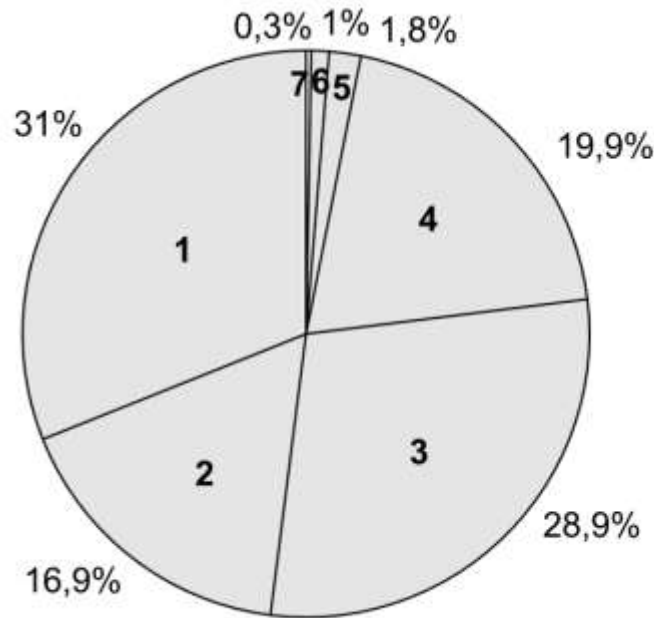


- низкий уровень интеграции РЗА и АСУ ТП;
- несовместимость принципов построения существующих защит с сетями с распределенной генерацией;
- токовые защиты имеют ограниченное применение:

$$\frac{|\underline{Z}_{сmax} + \underline{Z}_{л} + \underline{Z}_{т}|}{|\underline{Z}_{сmin} + \underline{Z}_{л}|} \geq \frac{2}{\sqrt{3}} k_{отс} k_{чmin}$$

- соотношение для токовой отсечки блока линия – трансформатор.

Телемеханизация ПС 35-110 кВ (2021 г.)



- 1 - передается минимальный набор ТС (сигналы «Общая авария», «Общая неисправность», «Земля в сети» и «Открытие двери»)
- 2 - передается минимальный набор ТС, а также ТИ с оборудования классом напряжения 35 кВ и выше
- 3 - передается ТС и ТИ, а также реализовано ТУ выключателями по напряжению 6, 10 и 35 кВ
- 4 - передается ТС и ТИ, а также реализовано ТУ выключателями всех напряжений
- 5 - передается ТС и ТИ, а также реализовано ТУ всеми коммутационными аппаратами (в т.ч. разъединителями)
- 6 - передается ТС и ТИ, а также реализовано ТУ всеми коммутационными аппаратами (в т.ч. разъединителями) и заземляющими ножами
- 7 - передается ТС и ТИ, а также реализовано ТУ всеми коммутационными аппаратами (в т.ч. разъединителями), заземляющими ножами, и дистанционное управление оборудованием РЗА и связи



Выводы:

- применяемые в сетях 6-35 кВ типы защит СТ часто не обеспечивают требуемой чувствительности при внутренних повреждениях, в особенности, при сложных видах повреждений (витковые замыкания, пожар в стали);
- средства режимной автоматики ПС, связанные с управлением работой СТ, а также системы мониторинга СТ в распределительной сети существенно ограничено представлены;
- для распределительных сетей требуется поиск новых принципов и подходов к построению систем автоматизации ПС 35-110 кВ, применение новых технологий и технических решений, обеспечение мер, направленных на повышение наблюдаемости и управляемости сети.



Оценка тока небаланса дифференциальной защиты СТ

$I_{\text{нб}} = (k_{\text{апер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta U_{\text{рег}} + \Delta f_{\text{выр}}) I_{\text{вн.мах}} + I_{\text{нам}}$ - ток небаланса дифференциальной защиты.

$k_{\text{апер}}$ - коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока КЗ;

$k_{\text{одн}}$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока;

ε - относительный предел допускаемой погрешности ТТ в установившемся режиме КЗ;

$\Delta U_{\text{рег}}$ - составляющая, учитывающая работу ПБВ/РПН в трансформаторе;

$\Delta f_{\text{выр}}$ - составляющая, учитывающая схему соединения ТТ в защите;

$I_{\text{вн.мах}}$ - максимальный ток внешнего КЗ (ток КЗ на выводах обмотки НН);

$I_{\text{нам}}$ - ток намагничивания СТ.

Предельные значения: $k_{\text{апер}} = 2, k_{\text{одн}} = 1, \varepsilon = 0,1, \Delta U_{\text{рег}} = 0,16, \Delta f_{\text{выр}} = 0,05$

Ток намагничивания: $I_{\text{нам}} \leq 0,02 \div 0,03 I_{\text{ном}}$ - в нормальном режиме, $I_{\text{нам}} = 2 \div 8 I_{\text{ном}}$ - при БНТ.

Максимальный ток небаланса:

$I_{\text{нб.мах}} = (k_{\text{апер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta U_{\text{рег}} + \Delta f_{\text{выр}}) I_{\text{вн.мах}} \approx 0,41 I_{\text{вн.мах}}$ - при внешнем КЗ; $I_{\text{нб.мах}} = 8 I_{\text{ном}}$ - при БНТ.

Минимальный ток небаланса:

$I_{\text{нб.мин}} = k I_{\text{раб}} + I_{\text{нам}}$



Снижение тока небаланса в дифференциальной защите СТ:

- фильтрация апериодической составляющей: $k_{\text{апер}} = 1$;
- цифровые одностипные ТТ без эффекта насыщения: $k_{\text{одн}} = 0,5, \varepsilon = 0,005$;
- контроль положения ступени РПН: $\Delta U_{\text{рег}} = 0$;
- цифровая обработка измеряемого сигнала тока: $\Delta f_{\text{выр}} < 0,01$;
- отстройка от режима БНТ: $I_{\text{нам}} = 0,02 \div 0,03 I_{\text{ном}}$.

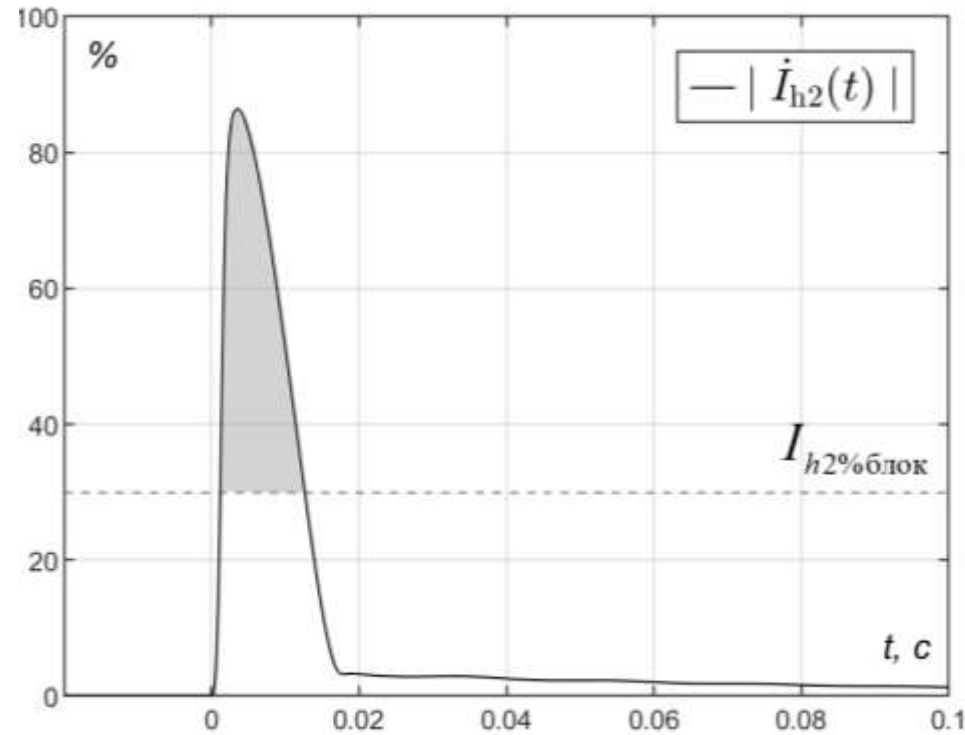
В итоге, диапазон значений тока небаланса с учетом выполнения приведенных условий:

$$I_{\text{нб.мах}} = (k_{\text{апер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta U_{\text{рег}} + \Delta f_{\text{выр}}) I_{\text{вн.мах}} \approx 0,0125 I_{\text{вн.мах}}$$

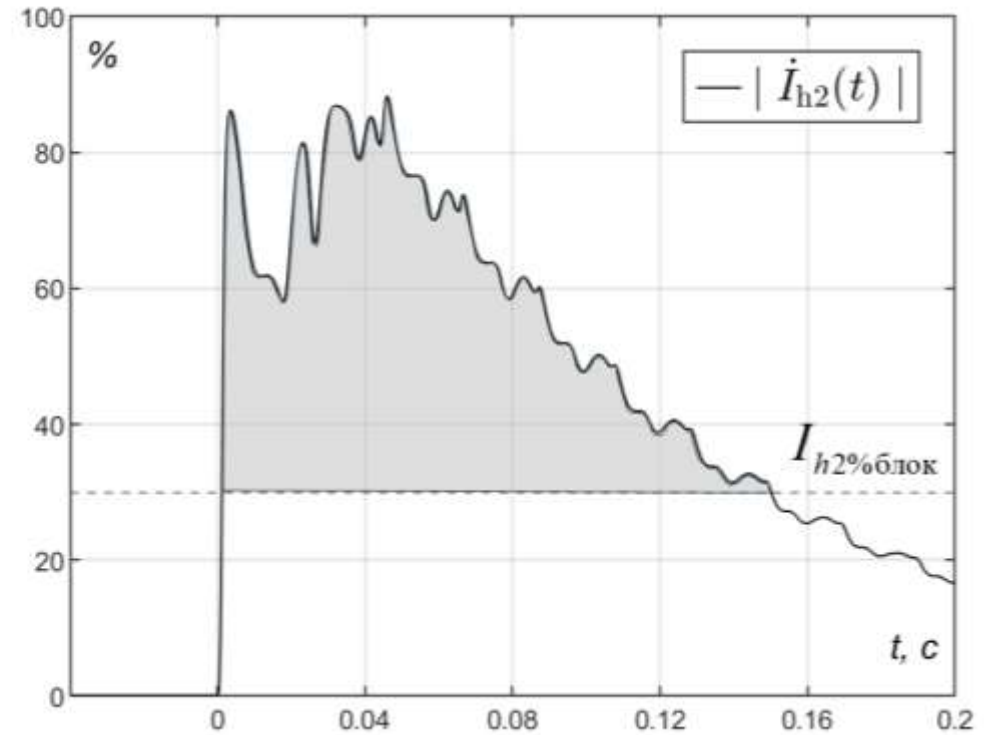
$$I_{\text{нб.мин}} = k I_{\text{раб}} + I_{\text{нам}} = 0,04 I_{\text{ном}}$$



Влияние режима БНТ и насыщения ТТ на дифференциальную защиту СТ



блокировка защиты по 2-ой гармонике
из-за наличия апериодической
составляющей в токе КЗ

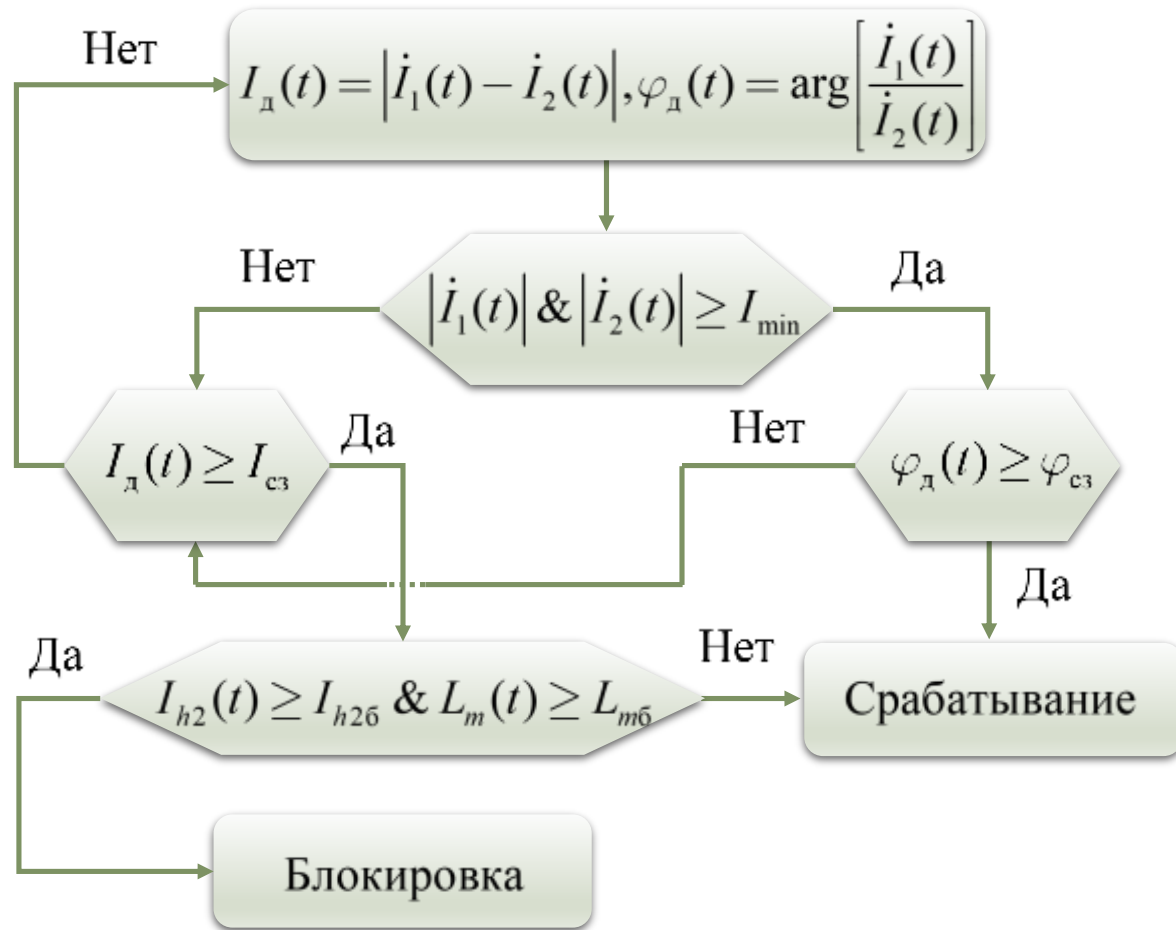


блокировка защиты по 2-ой гармонике
из-за насыщения ТТ



Дифференциальная защита СТ на синхровекторах тока

$$I_d(t) = |\dot{i}_1(t) - \dot{i}_2(t)|, \varphi_d(t) = \angle \{ \dot{i}_1(t), \dot{i}_2(t) \} = \arg \left(\frac{\dot{i}_1(t)}{\dot{i}_2(t)} \right) - \text{оценка модуля и фазы дифференциального тока.}$$



Преимущества СВИ и цифровых ТТ:

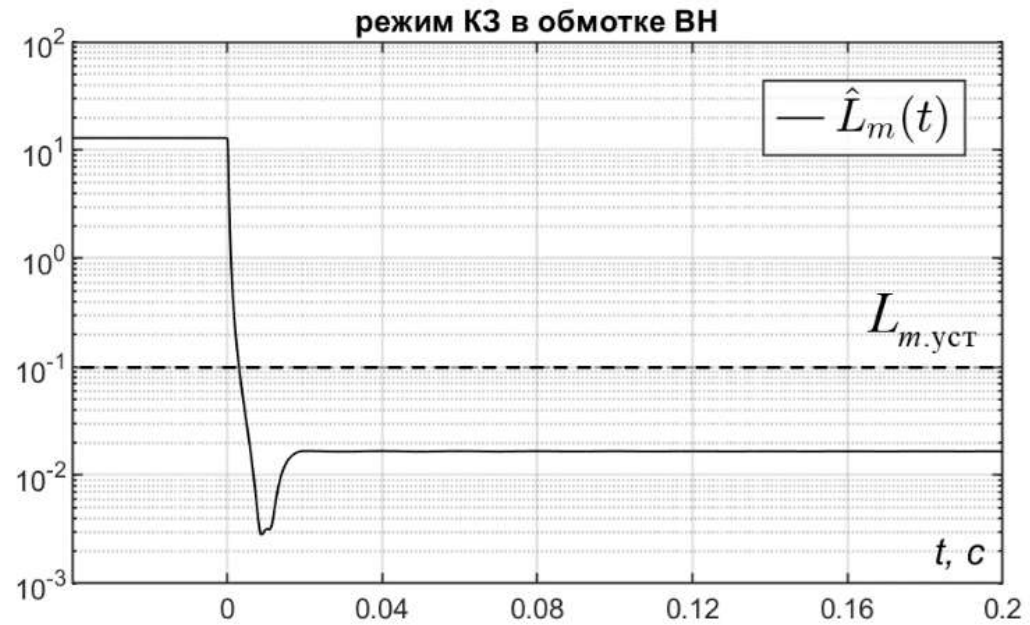
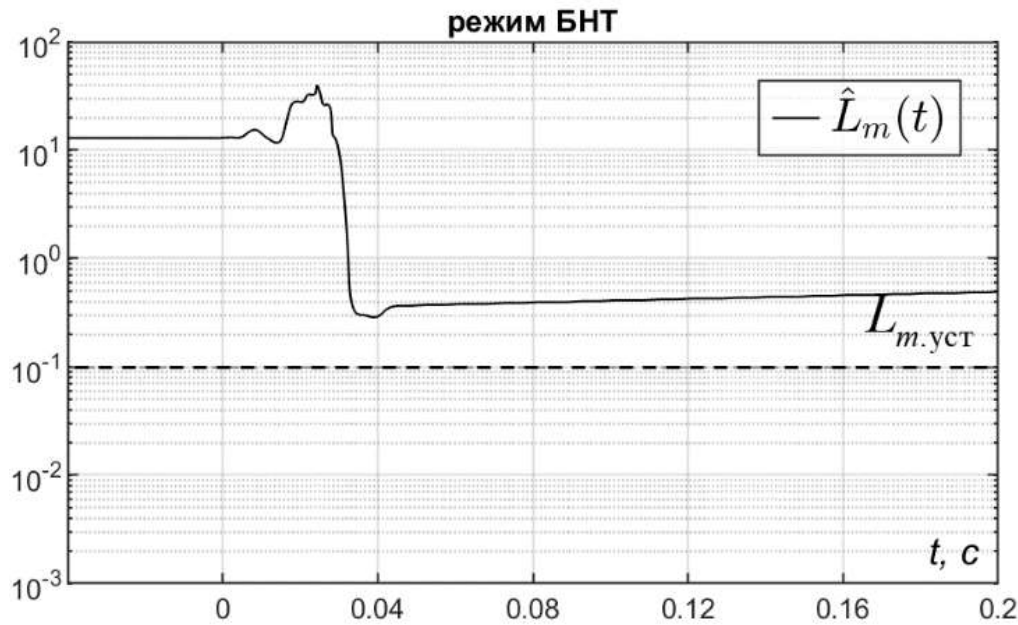
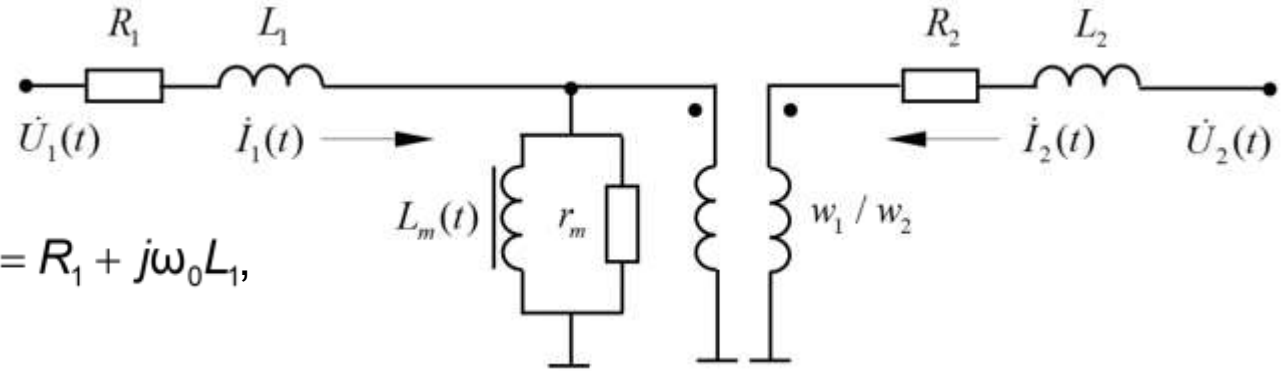
- значительное снижение расчетной величины тока небаланса за счет фильтрации апериодической составляющей, малой погрешности ТТ, контроля РПН;
- дополнительные признаки отстройки от режима БНТ;
- точная оценка фазы дифференциального тока за время меньше длины окна фильтра (20 мс для алгоритма Фурье)

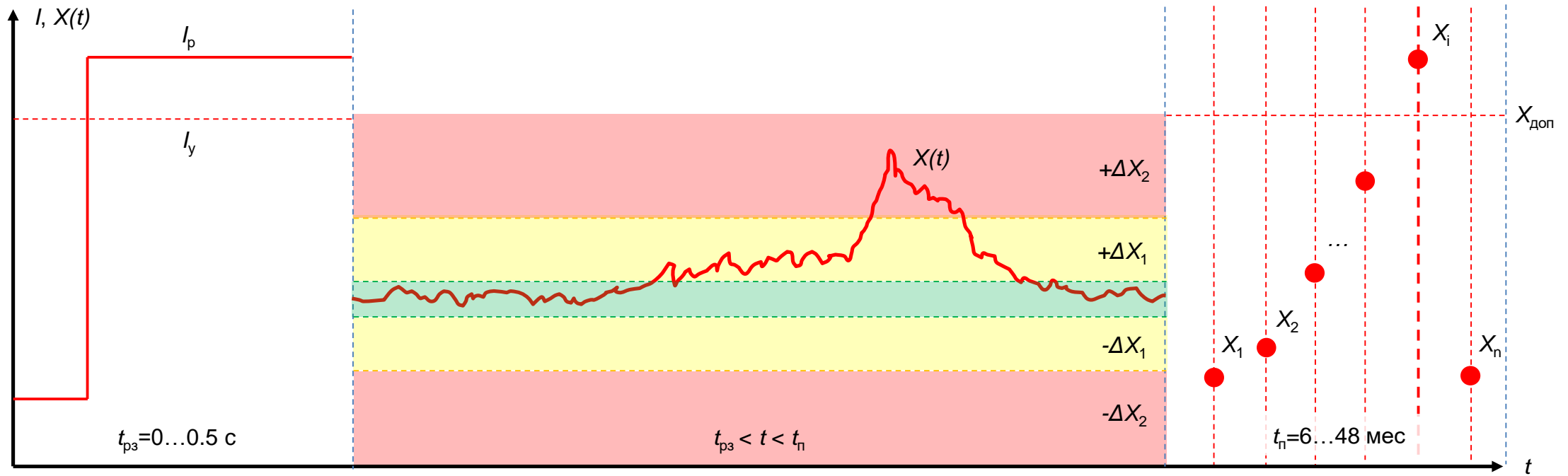


Оценка индуктивности намагничивания

$$L_m(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - z_1 i_1(t) - L_1 i_1'(t)}{i_1'(t) + j\omega_0 i_1(t) - i_2'(t) - j\omega_0 i_2(t)}$$

$\dot{U}_1(t)$ - синхровектор напряжения на стороне ВН, $z_1 = R_1 + j\omega_0 L_1$,
 $i_1'(t), i_2'(t)$ - производные синхровекторов тока СТ.





Релейная защита

Система мониторинга (СМСТ)

Периодический
контроль



Основные измерения:

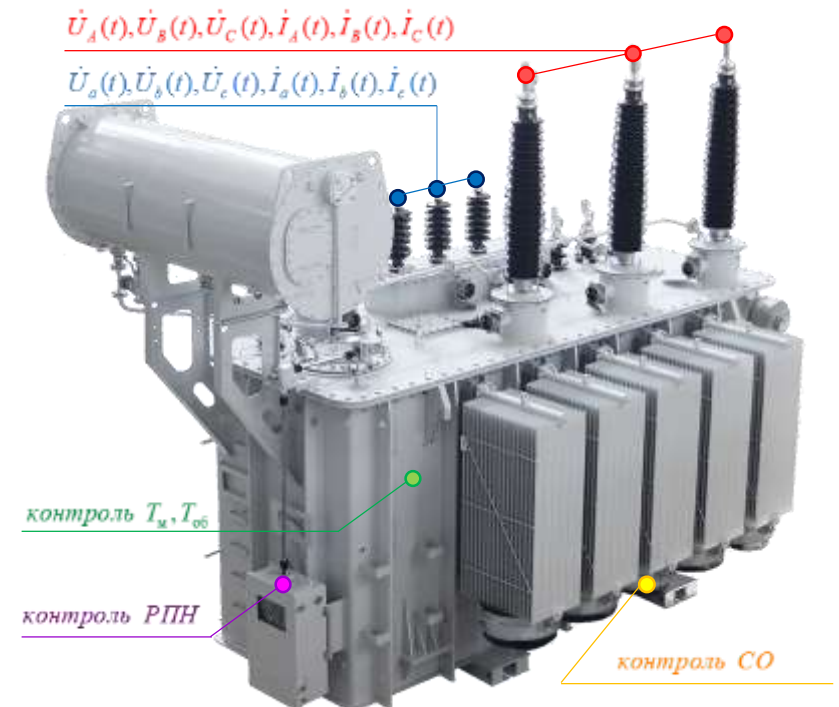
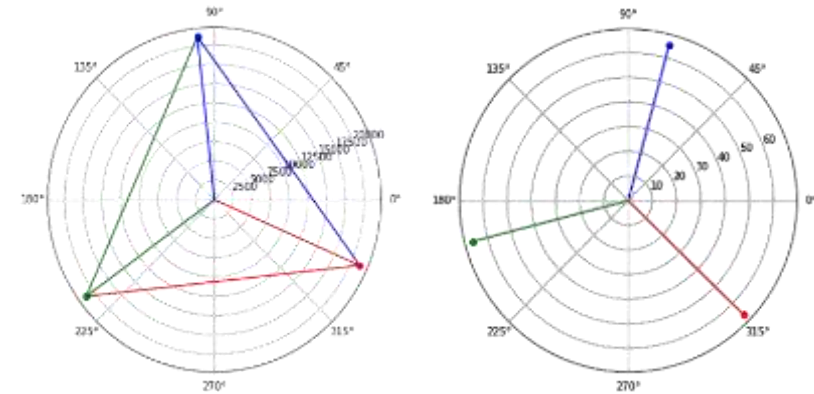
- синхровекторы фазных токов и напряжений СТ
- фазные активные и реактивные мощности обмоток
- параметры качества электроэнергии

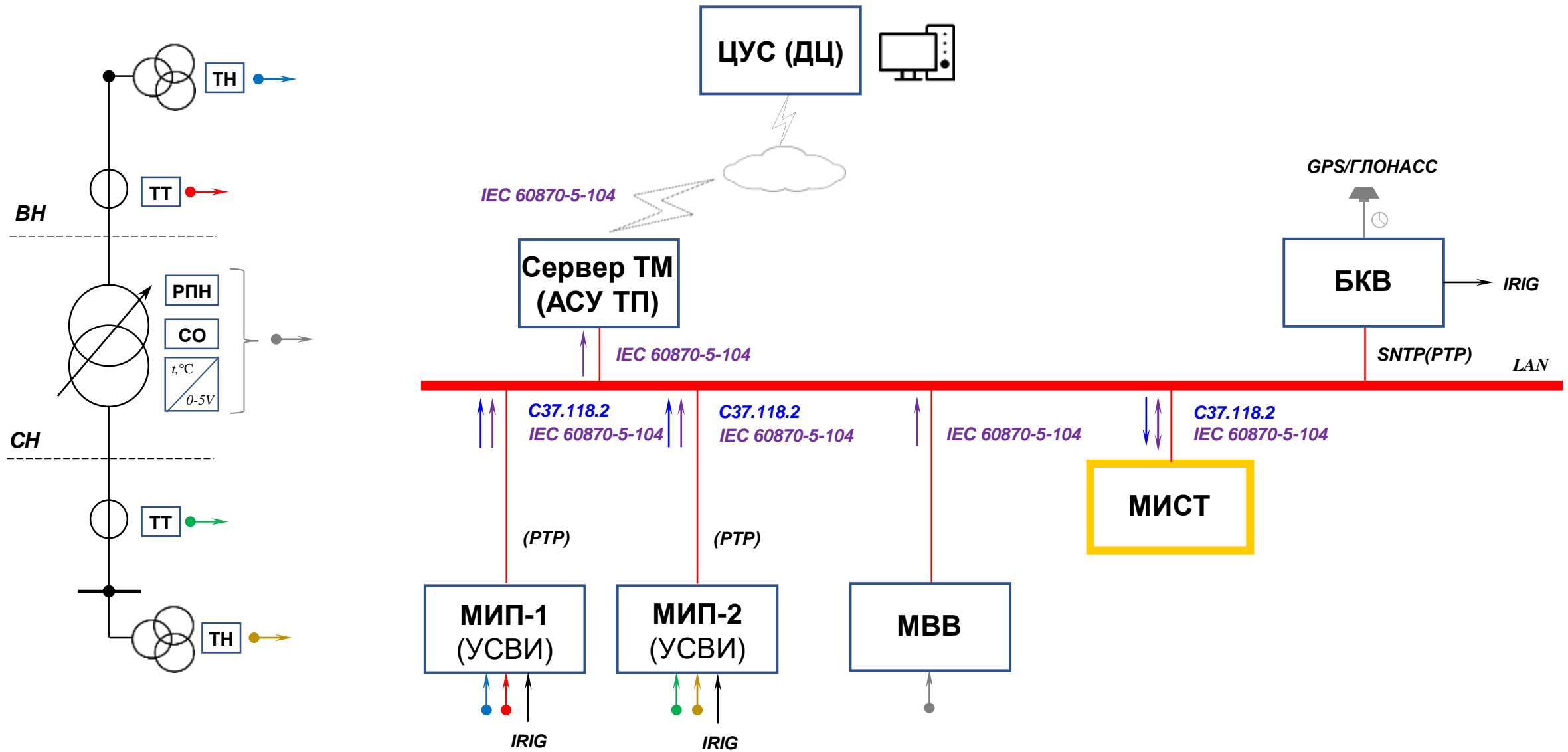
Дополнительные измерения:

- положение ступени РПН
- температурные датчики (температура масла, обмоток)
- состояние электродвигателей системы охлаждения (СО)

Оцениваемые диагностические параметры:

- фазные потери активной и реактивной мощности
- импедансы продольной и поперечной ветвей схемы замещения
- потери холостого хода и короткого замыкания
- напряжение короткого замыкания и ток холостого хода
- фактический коэффициент трансформации по фазам
- параметры для прямой последовательности (обратной, нулевой)
- оценка перегрузочной способности и износа витковой изоляции
- оценка состояния цепей ИТТ и ИТН







МИСТ
мониторинг состояния трансформатора

T-1
10 MVA

35.6 kV 398 kVA
+4
+76 °C

10:36:54
13.09.23

5.99 kV 331 kVA

ESC < > OK

T-1
10 MVA

36.1 kV 5.42 MVA
+4
+76 °C

6.1 kV 4.85 MVA

10:36:54
13.09.23

T-1 Parameters

| | | | |
|----|---------|-----|-----------|
| Sn | 10 MVA | Kt | 5.806 |
| Uv | 38.5 kV | Z12 | 11.2 Ohm |
| Un | 6.6 kV | Z0 | 4.6e3 Ohm |
| Uk | 8.2 % | LTC | ±6x1.5% |
| Ix | 3.3 % | S/G | Y0/D-11 |
| Pk | 29.6 kW | | |
| Px | 91.5 kW | | |

10:36:54
13.09.23

T-1 35 kV

| | | | |
|---------------------|--------|---------------------|--------|
| U _a , kV | 22.21 | I _a , A | 86.72 |
| zU _a , ° | 60.83 | zI _a , ° | 30.15 |
| U _b , kV | 23.86 | I _b , A | 103.94 |
| zU _b , ° | 61.53 | zI _b , ° | -92.37 |
| U _c , kV | 22.15 | I _c , A | 85.11 |
| zU _c , ° | 179.32 | zI _c , ° | 150.17 |

10:36:54
13.09.23

T-1 6 kV

| | | | |
|---------------------|--------|---------------------|--------|
| U _a , kV | 3.52 | I _a , A | 459.28 |
| zU _a , ° | 101.21 | zI _a , ° | 60.18 |
| U _b , kV | 3.48 | I _b , A | 401.93 |
| zU _b , ° | 21.35 | zI _b , ° | 61.92 |
| U _c , kV | 3.54 | I _c , A | 483.23 |
| zU _c , ° | 290.87 | zI _c , ° | 178.28 |

10:36:54
13.09.23

T-1 Sd

Sd: -30% 0% 30%

10:36:54
13.09.23

T-1 Kt

Kt: -1% 0% 1%

10:36:54
13.09.23

T-1 Z12

Z12: -15% 0% 15%

10:36:54
13.09.23

T-1 Z0

Z0: -30% 0% 30%

+6.5%

10:36:54
13.09.23

T-1 Ix

Ix: -30% 0% 30%

10:36:54
13.09.23

Период проведения измерений (UTC+0): 2024.07.06 00:00:00 – 2024.07.07 00:00:00

Общие сведения
 Объект: ПС-7
 Трансформатор: Т-1

Фазные напряжения

| Среднее значение, кВ | | | Среднее отклонение, % | | | Максимальное отклонение, % | | |
|----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| U_{1a} | U_{1b} | U_{1c} | δU_{1a} | δU_{1b} | δU_{1c} | δU_{1a} | δU_{1b} | δU_{1c} |
| 68.6792 | 69.0844 | 68.9505 | 8.14 | 8.78 | 8.57 | 9.33 | 10.02 | 9.81 |
| U_{2a} | U_{2b} | U_{2c} | δU_{2a} | δU_{2b} | δU_{2c} | δU_{2a} | δU_{2b} | δU_{2c} |
| 21.0051 | 21.3180 | 21.3345 | 3.95 | 5.5 | 5.58 | 106.96 | 95.67 | 79.11 |
| U_{3a} | U_{3b} | U_{3c} | δU_{3a} | δU_{3b} | δU_{3c} | δU_{3a} | δU_{3b} | δU_{3c} |
| 3.5885 | 3.6029 | 3.5976 | 3.59 | 4.01 | 3.85 | 45.18 | 48.4 | 48.59 |

Фазные токи

| Среднее значение, А | | | Минимальное значение, А | | | Максимальное значение, А | | |
|---------------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|--------------------------|-----------|-----------|
| I_{1a} | I_{1b} | I_{1c} | I_{1a} | I_{1b} | I_{1c} | I_{1a} | I_{1b} | I_{1c} |
| 28.7973 | 28.8432 | 28.9581 | 18.1000 | 18.7000 | 18.8000 | 750.7500 | 770.6500 | 723.4000 |
| I_{2a} | I_{2b} | I_{2c} | I_{2a} | I_{2b} | I_{2c} | I_{2a} | I_{2b} | I_{2c} |
| 78.3360 | 79.7699 | 79.7680 | 48.5400 | 51.7200 | 51.1200 | 1525.2600 | 1536.1801 | 1468.0801 |
| I_{3a} | I_{3b} | I_{3c} | I_{3a} | I_{3b} | I_{3c} | I_{3a} | I_{3b} | I_{3c} |
| 75.2075 | 71.5248 | 74.4194 | 42.6000 | 31.5000 | 42.0000 | 169.2000 | 160.5000 | 142.5000 |

Потери мощности

| Среднее значение, кВт/кВА | | | Мин. значение, кВт/кВА | | | Макс. значение, кВт/кВА | | |
|---------------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|-------------------------|------------|------------|
| P_d | Q_d | S_d | P_d | Q_d | S_d | P_d | Q_d | S_d |
| 7.7937 | 60.8863 | 61.4014 | -66.8018 | 16.5850 | 33.1773 | 5593.7644 | 31656.0238 | 32146.4468 |
| Отклонение, %: | | 5.99 | Отклонение, %: | | 0 | Отклонение, %: | | 408.7 |

Коэффициенты мощности и загрузки

| Среднее значение | | Минимальное значение | | Максимальное значение | |
|------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| k_1 | $\cos\varphi_1$ | k_1 | $\cos\varphi_1$ | k_1 | $\cos\varphi_1$ |
| 0.0497 | 0.7868 | 0.0320 | 0.2737 | 1.1994 | 0.9249 |

Импедансы схемы замещения

| Среднее значение, Ом | | | Среднее отклонение, % | | | Максимальное отклонение, % | | |
|----------------------|---------|-------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------|
| Z_1 | Z_2 | Z_0 | δZ_1 | δZ_2 | δZ_0 | δZ_1 | δZ_2 | δZ_0 |
| 48.5259 | 44.7226 | 182562.8612 | 18.47 | 73.87 | 13.54 | 52.58 | 172.57 | 170.54 |

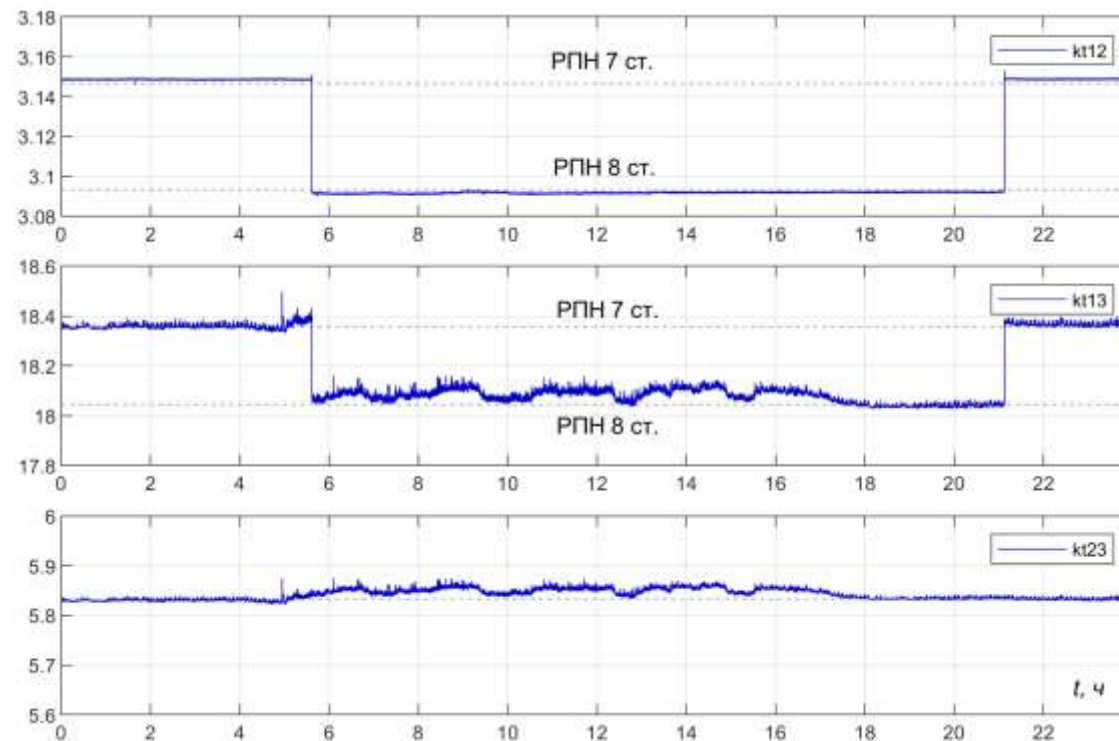
18.07.2024, 11:32 2024-07-06-00-00:00_2024-07-07-00-00:00_ПС-7_Т-1

| Обозначение | Уровень 1 | | Уровень 2 | |
|-----------------|------------|-------------|------------|-------------|
| | Количество | Время, мин. | Количество | Время, мин. |
| δU_{1a} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δU_{1b} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δU_{1c} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δU_{2a} | 2 | 0 | 0 | 0 |
| δU_{2b} | 3 | 0 | 0 | 0 |
| δU_{2c} | 16 | 0 | 1 | 150 |
| δU_{3a} | 0 | 0 | 1 | 0 |
| δU_{3b} | 0 | 0 | 1 | 0 |
| δU_{3c} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δS_d | 0 | 0 | 1 | 0 |
| δZ_1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δZ_2 | 1724 | 106 | 615 | 274 |
| δZ_0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δK_{12} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δK_{13} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| k_1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $k_1(K_{2max})$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{нп}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{нп1}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F_D | 0 | 0 | 0 | 0 |

Общее время работы системы: 1458 ч. (60 д. 18 ч. 36 мин.)
Общий износ витковой изоляции: 1 ч. (0 д. 1 ч. 16 мин.)
Относительный износ витковой изоляции: 0.09 %
Качество данных
 Статус измерений: 100 %
 Дополнительные признаки: 99.31 %

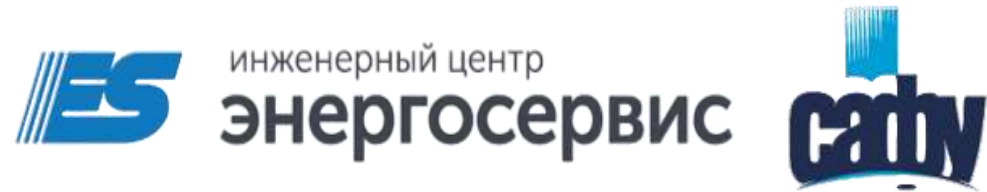
- управление и контроль состояния РПН (АРКТ);
- автоматика управления выключателем СТ (АУВ) на ТП 6(10)/0,4 кВ;
- устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ) на крупных подстанциях;
- функции автоматического повторного включения (АПВ) и автоматической частотной разгрузки (АЧР) силового трансформатора.

Контроль положения РПН по данным СВИ





1. Анализ систем автоматизации СТ показывает, что необходимы поиск новых принципов и подходов к их построению на ПС 35-110 кВ, применение новых технологий и технических решений, обеспечение мер, направленных на повышение наблюдаемости и управляемости сети.
2. Применение технологии СВИ совместно с цифровыми трансформаторами тока без эффекта насыщения позволяют значительно снизить расчетный ток небаланса, повысить чувствительности дифференциальной защиты к внутренним повреждениям, сформировать дополнительные признаки для распознавания режима БНТ.
3. Мониторинг СТ по данным СВИ обеспечивает предиктивный анализ его состояния и выявление на ранних стадиях различных типов повреждений СТ.
4. Технология СВИ также имеет преимущества для совершенствования алгоритмов работы режимной автоматики ПС, связанной с управлением работой СТ.



Благодарим за внимание!

Пискунов Сергей Александрович, s.piskunov@ens.ru