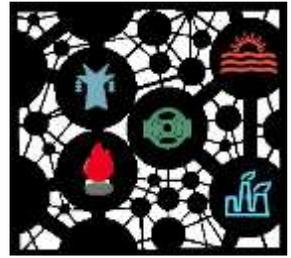


МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ИМ. Ю.Н. РУДЕНКО

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.

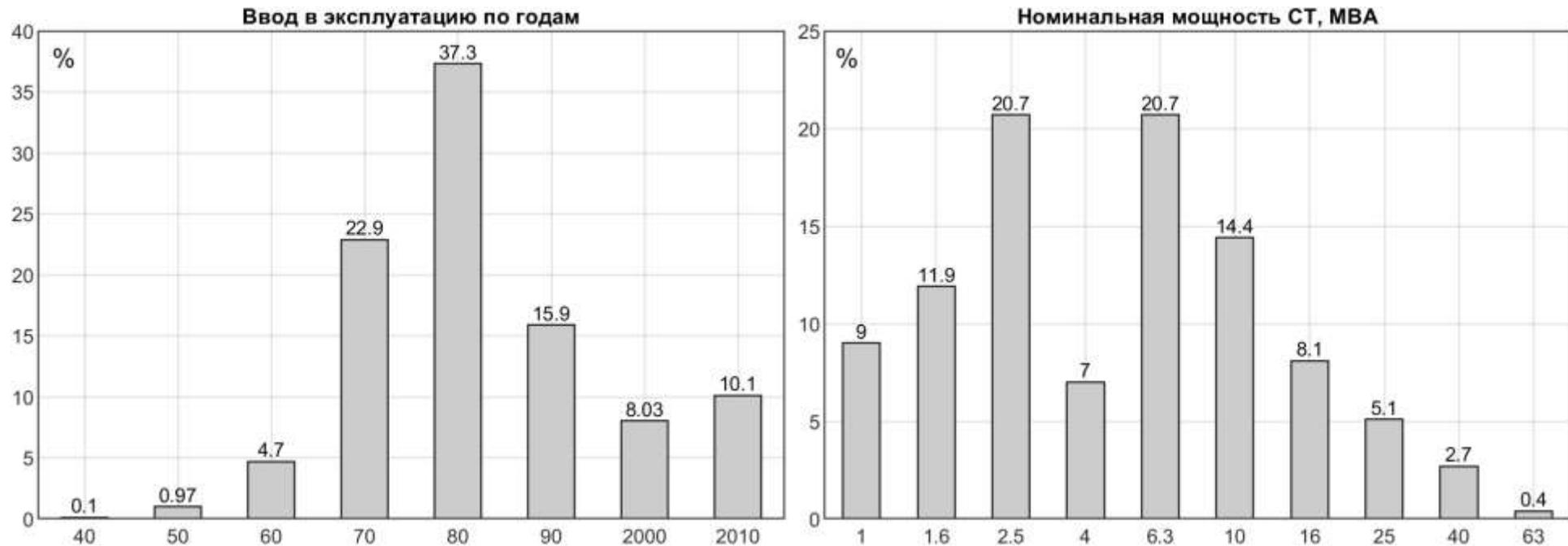
Задачи:

- 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.)

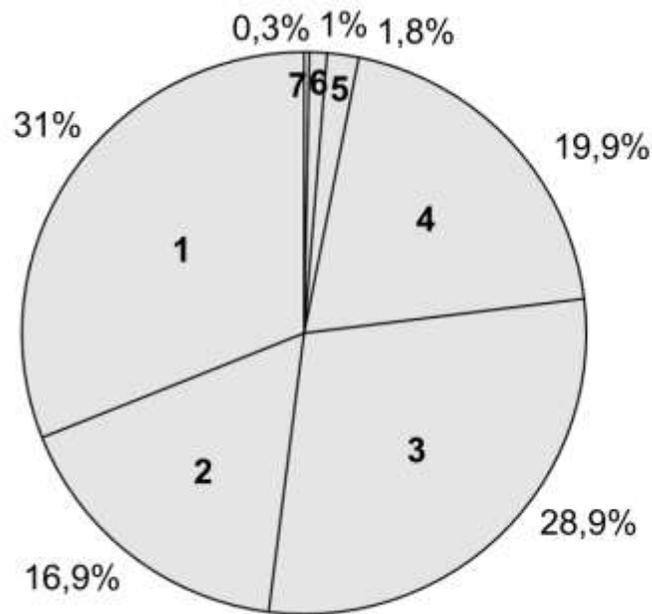


- низкий уровень интеграции РЗА и АСУ ТП;
- несовместимость принципов построения существующих защит с сетями с распределенной генерацией;
- токовые защиты имеют ограниченное применение:

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

- 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 ограничены;
- 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: $I_{\text{нам}} = 0,02 \div 0,03 I_{\text{ном}}$.

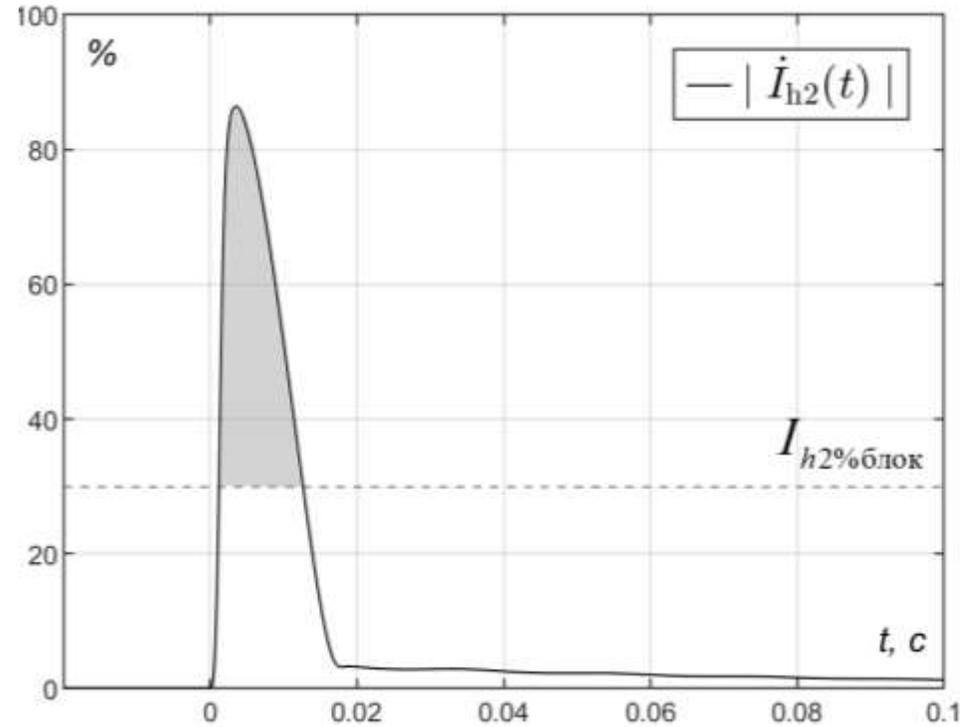
В итоге, диапазон значений тока небаланса с учетом выполнения приведенных условий:

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

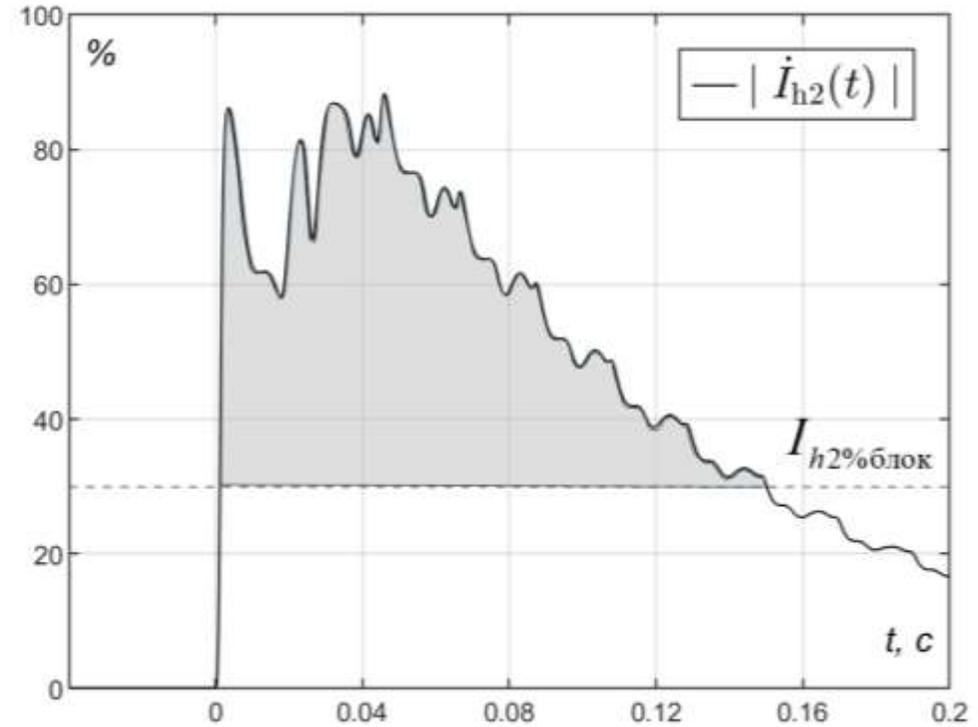
$$I_{\text{нб.мин}} = k I_{\text{раб}} + I_{\text{нам}} = 0,04 I_{\text{ном}}$$



Влияние режима БНТ и насыщения ТТ на дифференциальную защиту СТ



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

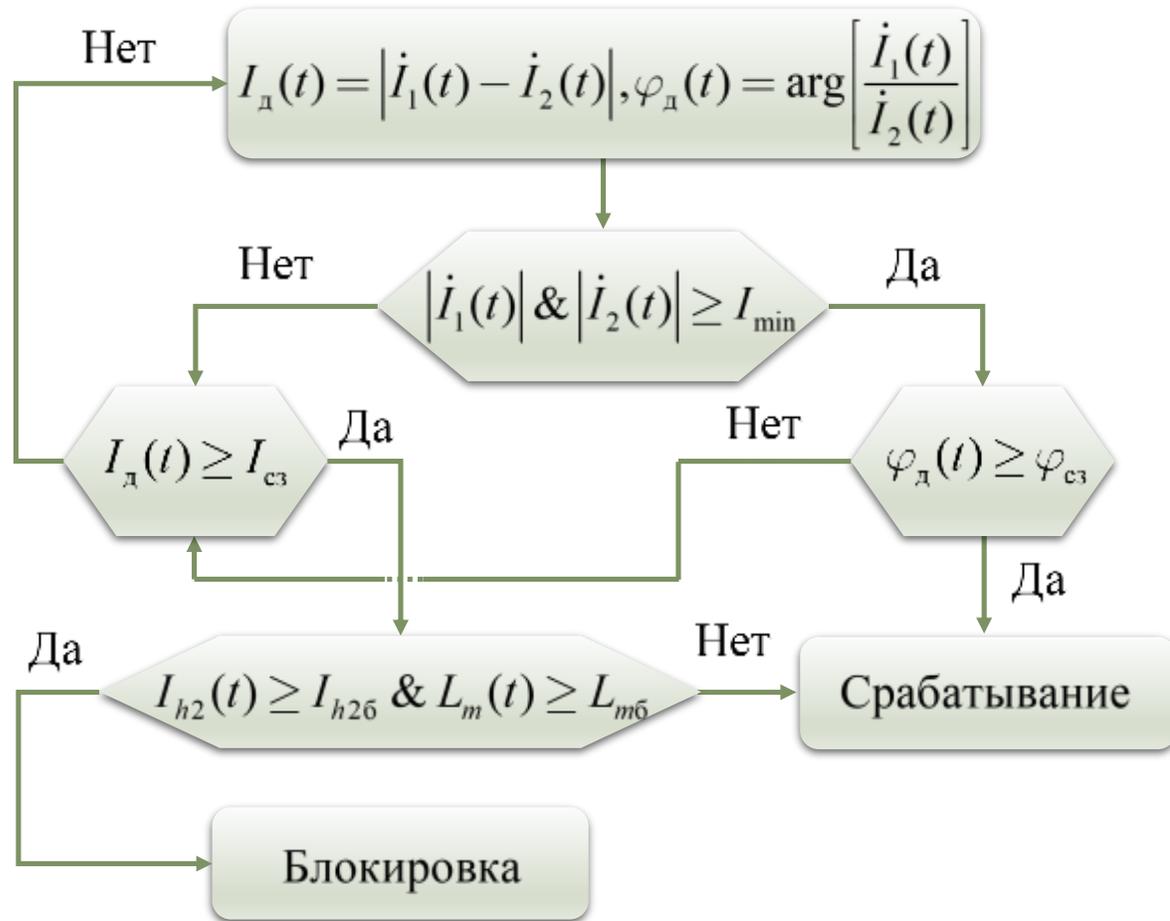


блокировка защиты по 2-ой гармонике из-за насыщения ТТ



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)

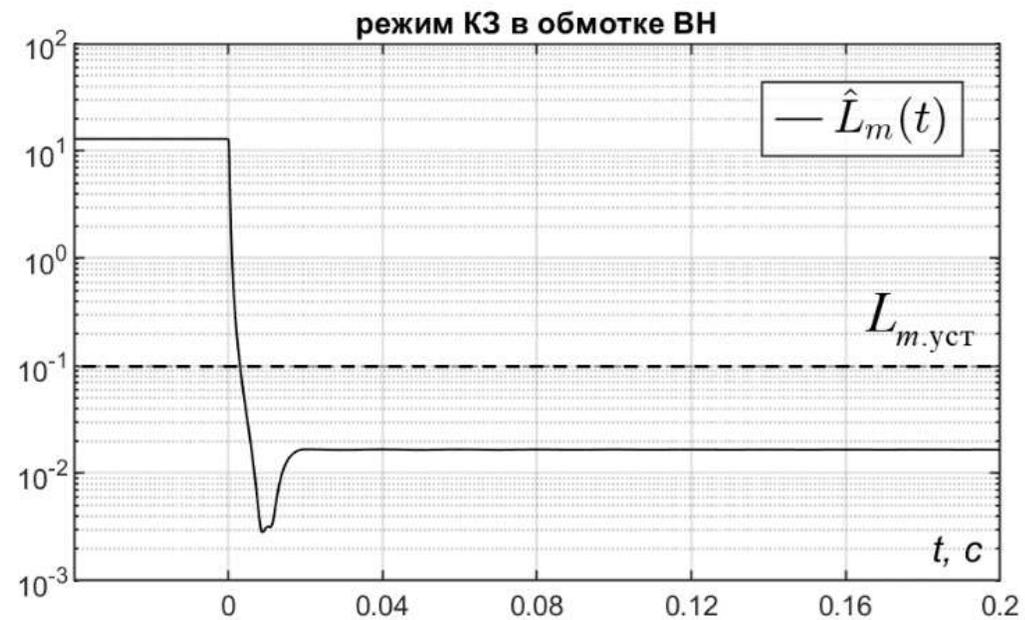
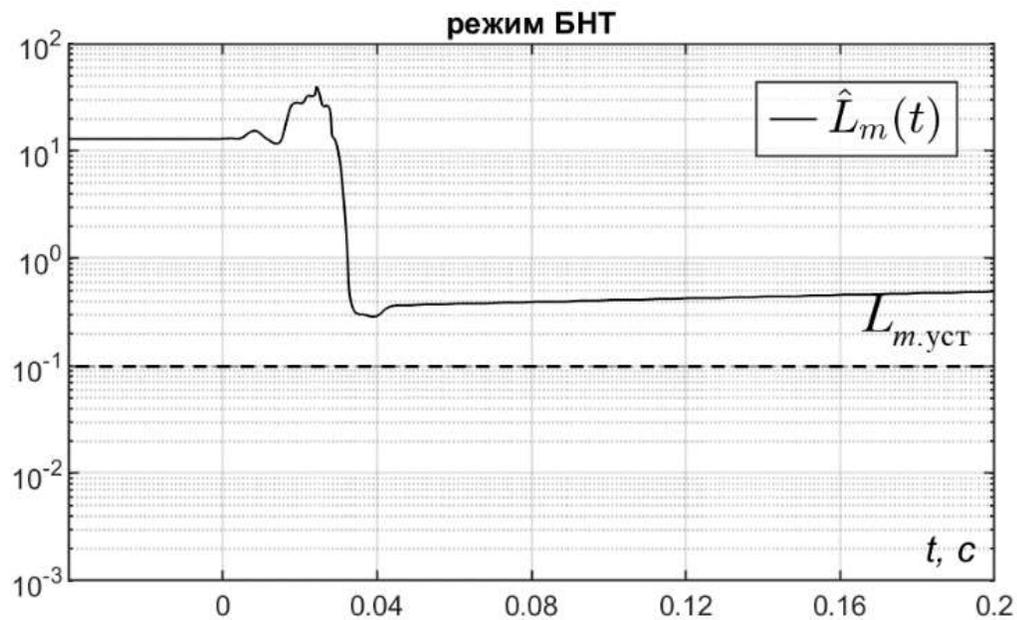
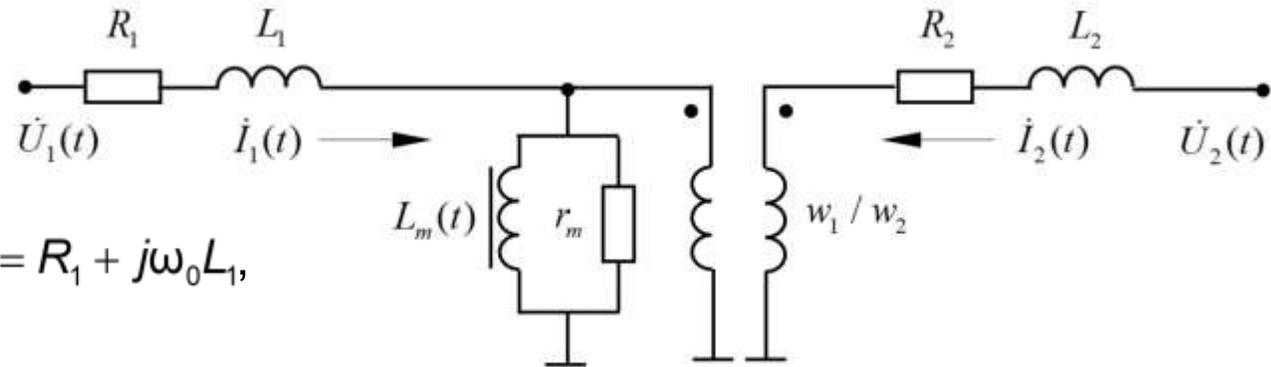


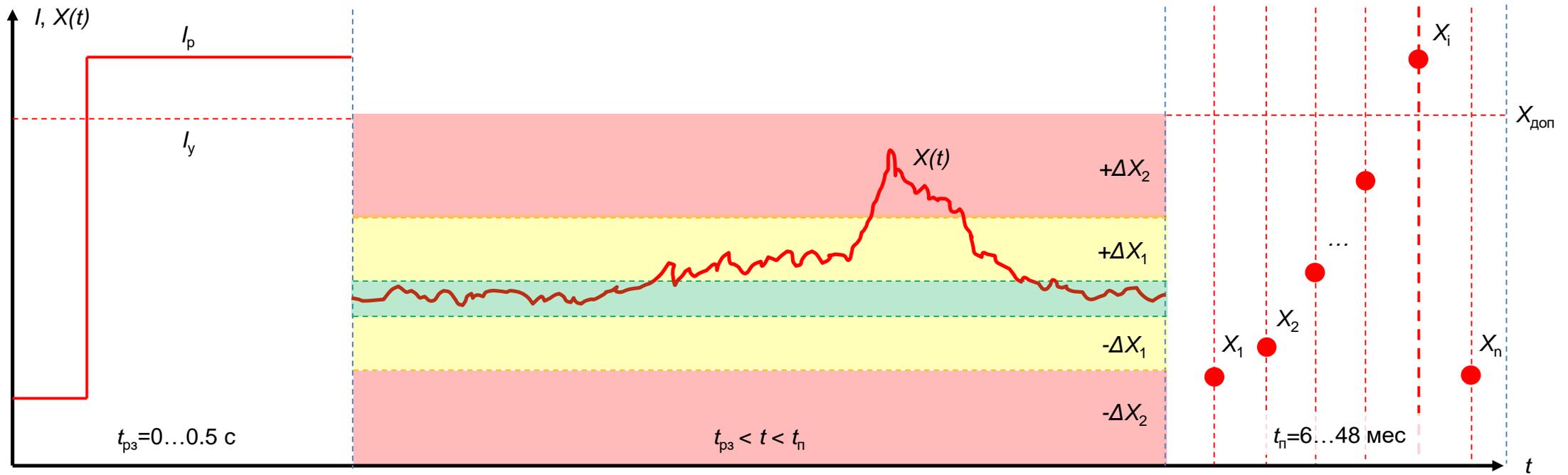
Оценка индуктивности намагничивания

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

$\dot{U}_1(t)$ - 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:

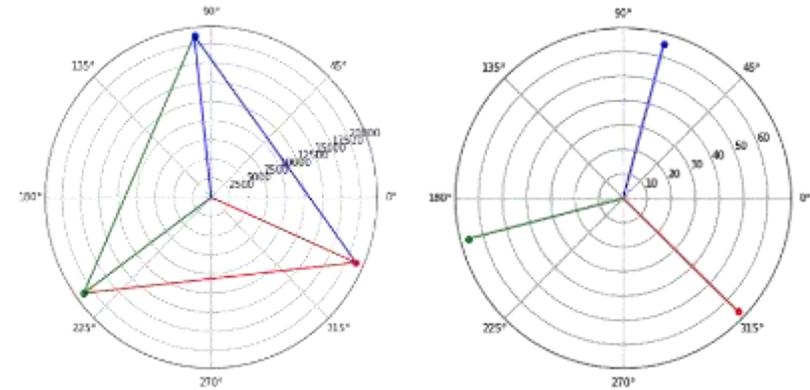
- синхровекторы фазных токов и напряжений СТ
- фазные активные и реактивные мощности обмоток
- параметры качества электроэнергии

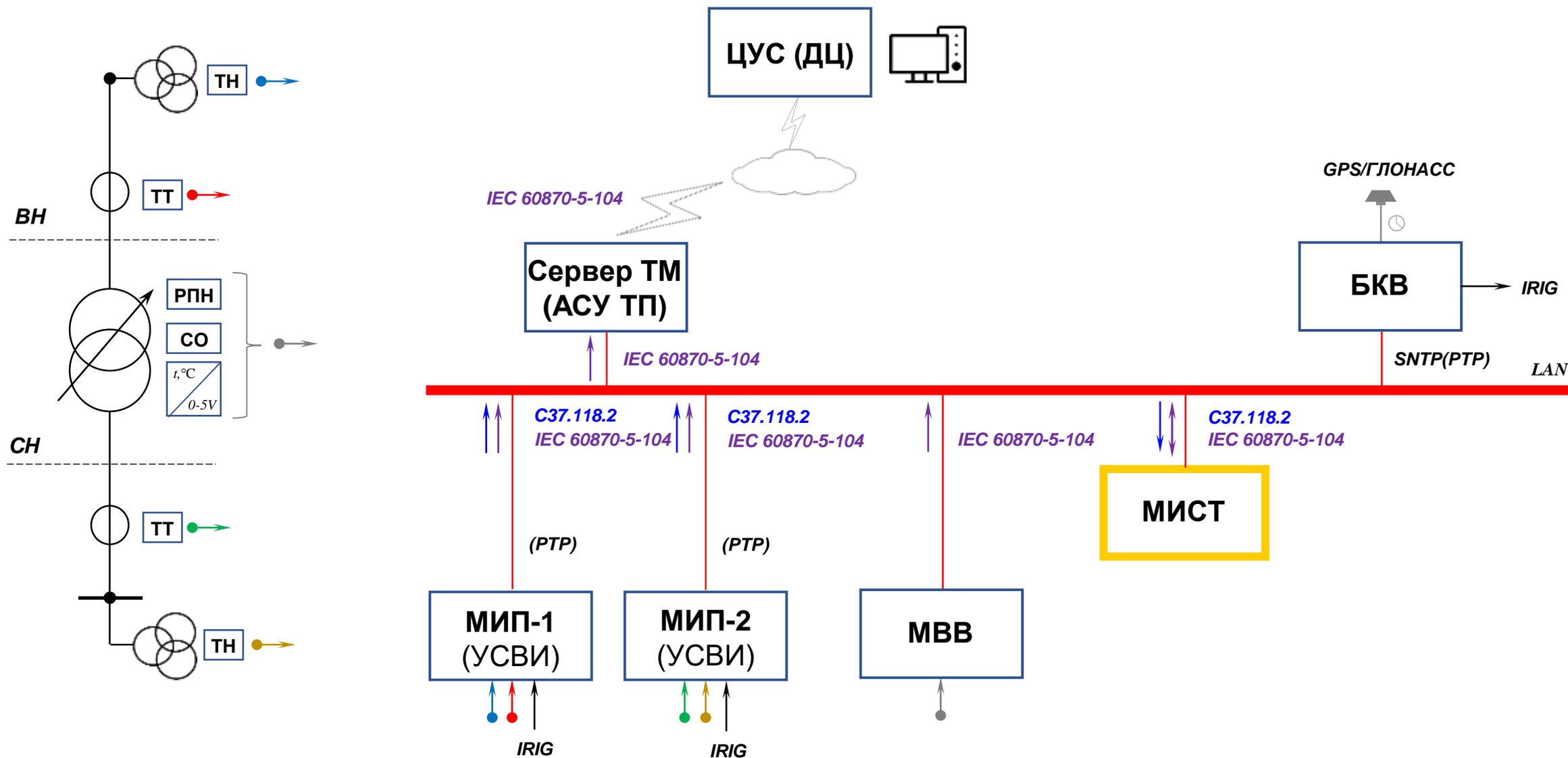
Дополнительные измерения:

- 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 , °	10.21	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 , °	89.87	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 %

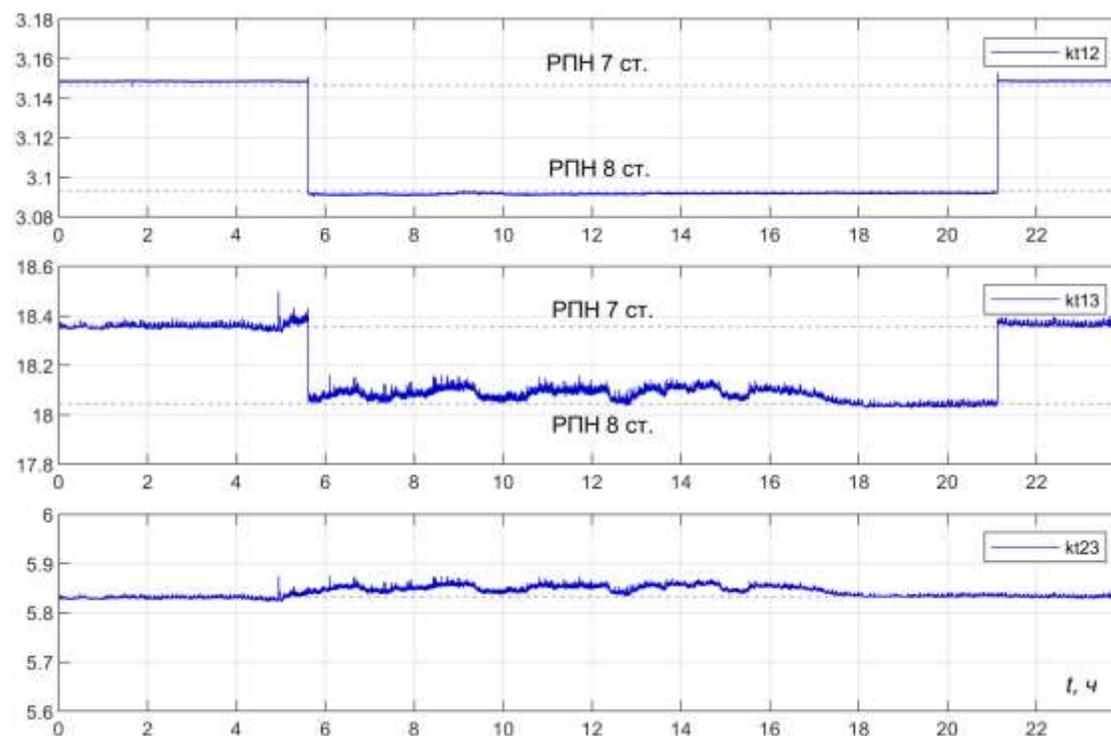
Качество данных

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