

УДК 621.311.1

## СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ И МОНИТОРИНГА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Пискунов С.А.<sup>1,2</sup>, Мокеев А.В.<sup>1,2</sup>, Ульянов Д.Н.<sup>1,2</sup>

### Аннотация

В настоящем докладе представлены результаты исследований по совершенствованию систем автоматизации силовых трансформаторов (СТ) распределительных сетей 6-35 кВ. Авторами разработаны усовершенствованные алгоритмы дифференциальной и дистанционной защиты СТ на основе измерения синхровекторов напряжения и тока, предложены дополнительные критерии для отстройки защиты от броска тока намагничивания (БНТ), рассмотрены функции системы мониторинга состояния СТ и режимной автоматики подстанции на основе технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ).

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, синхровектор, релейная защита, мониторинг, автоматика.

### Введение

Статистика повреждаемости первичного оборудования подстанций (ПС) показывает, что для силовых трансформаторов наибольшее число повреждений приходится на сети среднего напряжения [1]. В то же время, существующие системы релейной защиты, автоматики и мониторинга СТ с высшим напряжением (ВН) 35-110 кВ, во многих случаях, ограничены по своим функциональным возможностям и характеристикам.

Анализ состава СТ и средств автоматизации распределительных сетей 6-35 кВ показывает, что наиболее распространенные номиналы мощности СТ не превышают 6,3 МВА. При этом для трансформаторов меньшей мощности применяются в основном токовые защиты, которые не обеспечивают полноценного быстрого отключения внутренних повреждений [2]. Кроме того, применяемые для СТ большей мощности устройства дифференциальных защит имеют низкую чувствительность при сложных типах повреждений (витковые замыкания, пожар в стали) и могут иметь неселективное действие при броске намагничивающего тока (БНТ) [3]. В связи с этим важной задачей является совершенствование защит СТ.

В докладе рассматривается применение технологии СВИ для совершенствования систем автоматизации СТ. В первую очередь, отмечены

---

<sup>1</sup> ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия,

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, e-mail: s.piskunov@ens.ru, a.mokeev@ens.ru, d.ulyanov@ens.ru

преимущества СВИ для реализации дифференциальных и дистанционных принципов защиты [4-6]. Кроме того, для своевременного обнаружения и предупреждения развития сложных типов повреждений предложен подход к мониторингу состояния СТ, основанный на контроле его электромагнитных параметров по данным измерений синхровекторов напряжения и тока [7].

В настоящее время развитие сетей с распределенной генерацией (РГ), в том числе с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), обуславливает появление новых задач по совершенствованию релейной защиты и автоматики распределительных сетей [8]. Применение технологии СВИ является перспективным направлением для решения этих задач.

### Анализ состояния систем автоматизации СТ

Топология распределительных сетей обуславливает наличие множества ответвлений и отпаек, питающих тупиковые подстанции с силовыми трансформаторами небольшой номинальной мощности. Анализ данных по одному из филиалов ПАО «Россети» показывает, что наиболее распространенными номиналами мощности СТ с ВН 6-35 кВ являются 2,5 и 6,3 МВА, значительное количество трансформаторов имеют мощность 1 МВА и менее (рис. 1). Кроме того, существенная доля трансформаторного оборудования имеет большой срок эксплуатации, что сопряжено с низким уровнем автоматизации ПС, указанными выше недостатками применяемых типов защит СТ, отсутствием систем мониторинга.

В распределительных сетях 6-35 кВ доля электромеханических устройств РЗА составляет более 78,8%, а превышение их установленного срока службы составляет более 59% [9]. Преобладающим является применение электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, низкий уровень интеграции РЗА и АСУ ТП, несовместимость принципов построения существующих систем защиты с сетями с РГ.

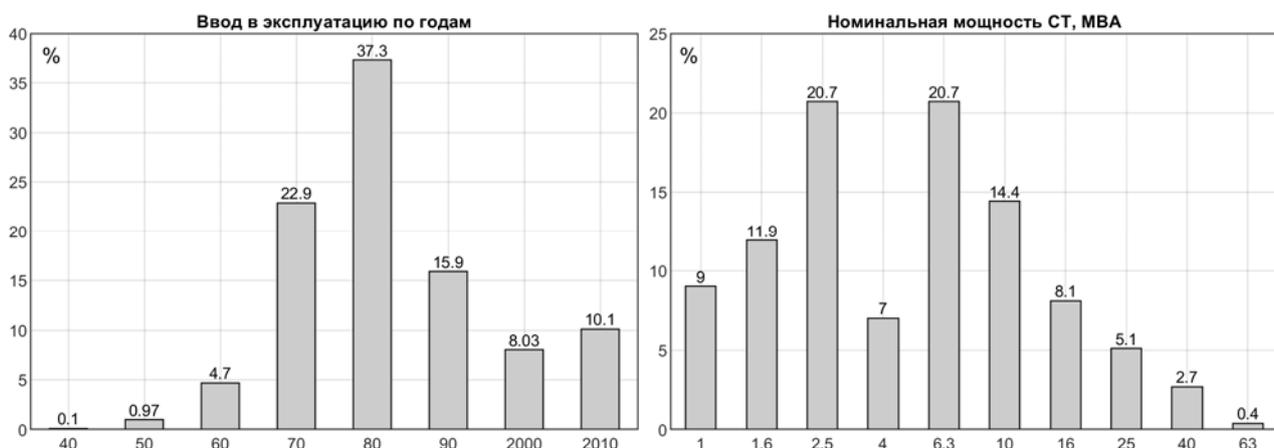


Рис.1 – Статистика по силовым трансформаторам с ВН 35-110 кВ (2021 г.).

Применяемая в качестве основной защиты СТ токовая отсечка (ТО) имеет ограниченную зону защиты со стороны обмотки высокого напряжения (ВН). Защиту оставшейся части трансформатора обеспечивает МТЗ. При этом чувствительность ТО рассчитывается при КЗ на выводах ВН, и на основе выражения для расчета уставки ТО [2] можно показать, что на значение ее чувствительности сильно влияет величина сопротивления СТ, что приводит к существенным ограничениям в ее применении:

$$\frac{|z_{cmax} + z_l + z_t|}{|z_{cmin} + z_l|} \geq \frac{2}{\sqrt{3}} k_{отс} k_{чmin}, \quad (1)$$

где  $z_{cmin}$ ,  $z_{cmax}$  - сопротивление эквивалентной энергосистемы в минимальном и максимальном режиме,  $z_l$  - сопротивление питающей линии,  $z_t$  - сопротивление трансформатора,  $k_{отс}$  - коэффициент отстройки ТО,  $k_{чmin}$  - минимальный коэффициент чувствительности ТО.

Токовая отсечка с пуском по напряжению также не обеспечивает защиты всех обмоток СТ. Гораздо реже в сетях 6-110 кВ для защиты СТ применяются дистанционные защиты и основное предпочтение отдается дифференциальным защитам, не требующим измерений напряжения на стороне ВН. Тем не менее, даже применение дифференциальной защиты не гарантирует защиты СТ от всех типов повреждений, кроме того, такая защита требует эффективной отстройки от БНТ.

Фактически на ПС с ВН 35-110 кВ функции систем мониторинга представлены только средствами телемеханики (рис. 2). Системы мониторинга силовых трансформаторов устанавливаются только на мощных СТ, при этом превалирует контроль неэлектромагнитных параметров [9].

Можно отметить, что средства режимной автоматики ПС, связанной с управлением работой СТ, в распределительных сетях также представлены в ограниченном количестве. Чаще всего применяется автоматическое управление коэффициентом трансформации (АРКТ) силовых трансформаторов с РПН.

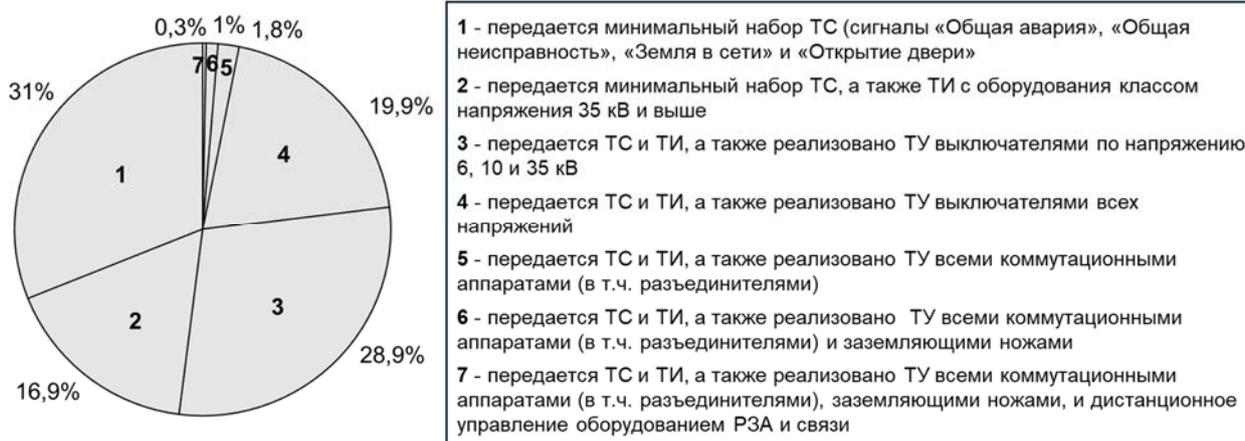


Рис. 2 – Телемеханизация ПС 35-110 кВ (2021 г.).

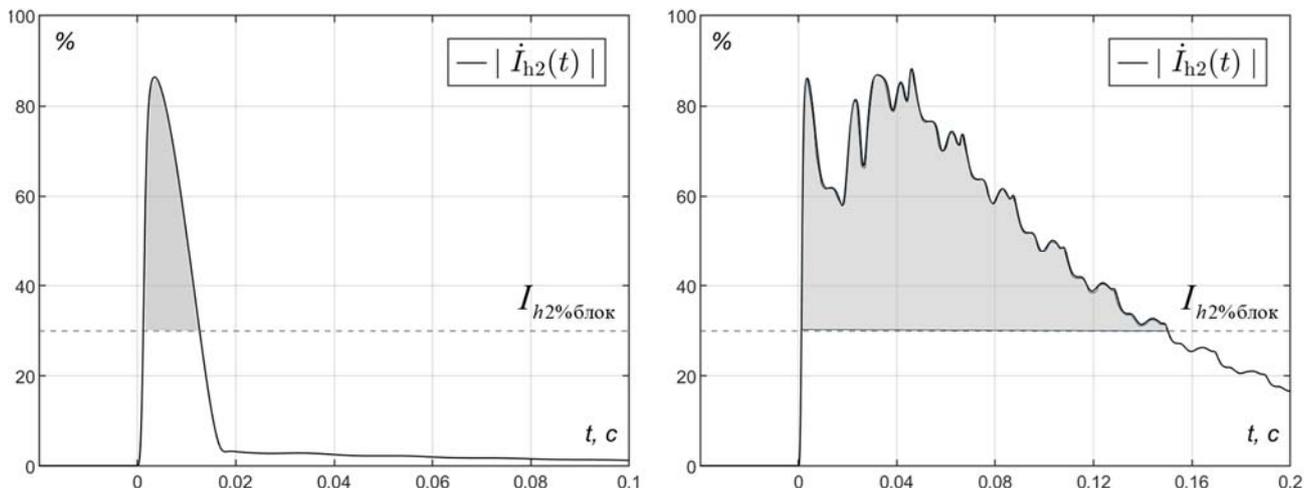
Подводя итоги анализа состояния систем автоматизации СТ, следует подчеркнуть, что для распределительных сетей требуется поиск новых принципов и подходов к построению систем автоматизации ПС 35-110 кВ, применение новых технологий и технических решений, обеспечение мер, направленных на повышение наблюдаемости и управляемости сети.

Развитие современных коммуникационных технологий, массовое производство и постепенное удешевление компонентов интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и микропроцессорных устройств РЗА позволяет рассматривать применение технологии СВИ для решения задач автоматизации распределительных сетей. Основываясь на этих тенденциях, авторами были проведены исследования по развитию теории СВИ и расширению возможностей применения данной технологии в распределительных сетях [10]. Результаты исследований позволяют сформулировать основные направления для совершенствования систем автоматизации СТ на базе СВИ.

### **Релейная защита**

Наиболее надёжной и чувствительной защитой СТ принято считать дифференциальную защиту. Современные микропроцессорные устройства дифференциальных защит позволяют значительно снизить уставку по дифференциальному току и реагировать на развитие некоторых сложных типов повреждений СТ. Тем не менее, такая защита требует качественной отстройки от тока БНТ во избежание ложных срабатываний при включении СТ. В настоящее время широко распространённым подходом является использование блокировки данной защиты при БНТ по уровню второй гармоники в токе СТ [11]. В то же время, наличие значительной апериодической составляющей в токе короткого замыкания (КЗ), а также насыщение электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) также может приводить к повышению уровня второй гармонической составляющей в токе СТ и существенному замедлению защиты при внутренних повреждениях (рис. 3). Отдельно следует отметить возможность ложных срабатываний защиты СТ при электромеханических переходных процессах в энергосистеме.

Расчет уставок дифференциальной защиты СТ основывается на оценке тока небаланса  $I_{нб}$ , который зависит от допустимой погрешности, однотипности и схемы подключения ТТ, регулирования напряжения СТ, расчетной величины БНТ. В этом отношении также следует отметить недостатки применения традиционных электромагнитных ТТ по сравнению с современными цифровыми ТТ, связанные с насыщением стали их сердечников и искажением синусоидальной формы измеряемого сигнала тока (рис. 3).



блокировка действия дифференциальной защиты трансформатора по 2-ой гармонике из-за наличия апериодической составляющей в токе КЗ (слева) и насыщения ТТ (справа)

Рис. 3 – Замедление действия дифференциальной защиты.

Рассмотрим, какие преимущества предлагают технология СВИ и современные цифровые устройства РЗА и цифровые ТТ для решения задач по совершенствованию защиты СТ.

Во-первых, измерение синхровекторов тока СТ в совокупности с применением цифровых ТТ без насыщения позволяет значительно снизить расчетную величину тока небаланса  $I_{нб}$  дифференциальной защиты за счет фильтрации апериодической составляющей, малой погрешности ТТ, возможности контроля положения РПН/ПБВ по данным СВИ. При этом стоит отметить, что разработка и внедрение комбинированных цифровых измерительных трансформаторов на класс напряжения 6-35 кВ уже ведется и в данном направлении достигнуты существенные положительные результаты [12].

Во-вторых, измерение синхровекторов тока СТ  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  позволяет решить ряд вопросов, связанных с отстройкой дифференциальной защиты СТ от режима БНТ при включении на нагрузку и при внешних КЗ, поскольку наличие измерений угла между  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  однозначно определяет направление мощности в обмотках СТ. Как показали исследования, при внутренних повреждениях СТ, точная оценка угла между синхровекторами тока может быть получена за время меньшее окна применяемого цифрового фильтра (для алгоритма Фурье составляет 20 мс).

Ранее авторами доклада были проведены исследования, касающиеся развития теории СВИ и ее применения для совершенствования дистанционных принципов защиты линии [6]. На основе анализа системы дифференциальных уравнений силового трансформатора можно показать, что дистанционные принципы также могут быть эффективно использованы для совершенствования защиты СТ.

В качестве примера рассмотрим схему двухобмоточного силового трансформатора (рис. 4). С точки зрения обеспечения функций защиты

СТ, наиболее важным параметром, характеризующим его состояние, является не измерение величины или разности токов в его обмотках, а точная оценка параметров продольной ветви схемы замещения. При этом возможность оценки индуктивности намагничивания  $L_m$  позволяет обеспечить дополнительные признаки для распознавания режима БНТ:

$$L_m(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \underline{z}_1 \dot{I}_1(t) - L_1 \dot{I}'_1(t)}{\dot{I}'_1(t) + j\omega_0 \dot{I}_1(t) - \dot{I}'_2(t) - j\omega_0 \dot{I}_2(t)}, \quad (2)$$

где  $\dot{I}_1(t)$  и  $\dot{I}_2(t)$  - приведенные значения синхровекторов тока СТ,  $\dot{U}_1(t)$  - синхровектор напряжения на стороне ВН,  $\underline{z}_1 = R_1 + j\omega_0 L_1$ ,  $\dot{I}'_1(t)$ ,  $\dot{I}'_2(t)$  - производные синхровекторов тока СТ.

На основе выражения (2) можно показать, что минимальная величина  $L_m(t)$  в режиме внутреннего КЗ и БНТ для силовых трансформаторов с ВН 35-110 кВ отличается более чем в 4-5 раз, что позволяет использовать величину  $L_m(t)$  и ее изменение в качестве дополнительного критерия для отстройки дифференциальной защиты от БНТ. Кроме того, благодаря применению теории СВИ и использованию системы дифференциальных уравнений СТ, оценка индуктивности (2) справедлива как в установившемся, так и в переходном режиме работы энергосистемы.

Для примера покажем моделирование режима БНТ и режима КЗ в обмотке ВН понижающего силового трансформатора 35/6 кВ мощностью 10 МВА (рис. 5). Результаты оценки  $L_m(t)$  в различных режимах работы энергосистемы по выражению (2) подтверждают эффективность применения этого параметра в качестве критерия отстройки от БНТ.

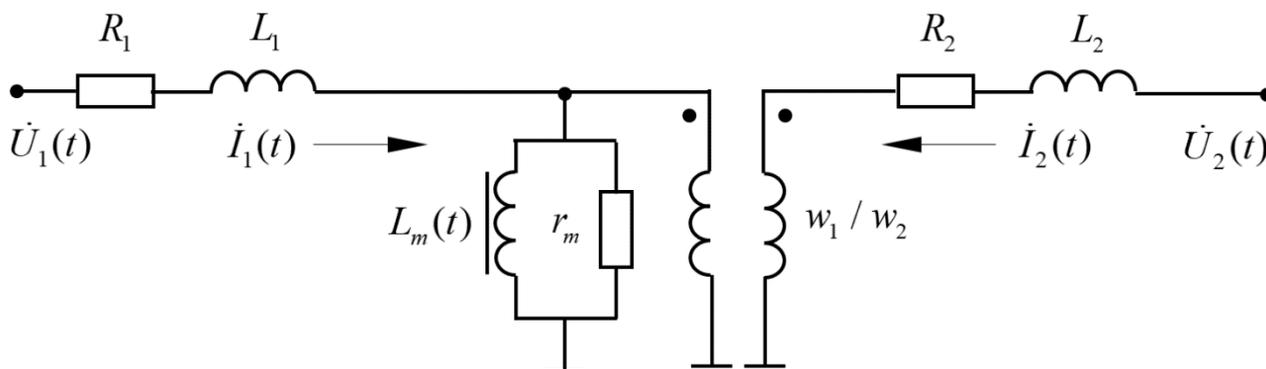


Рис. 4 – Схема замещения двухобмоточного СТ.

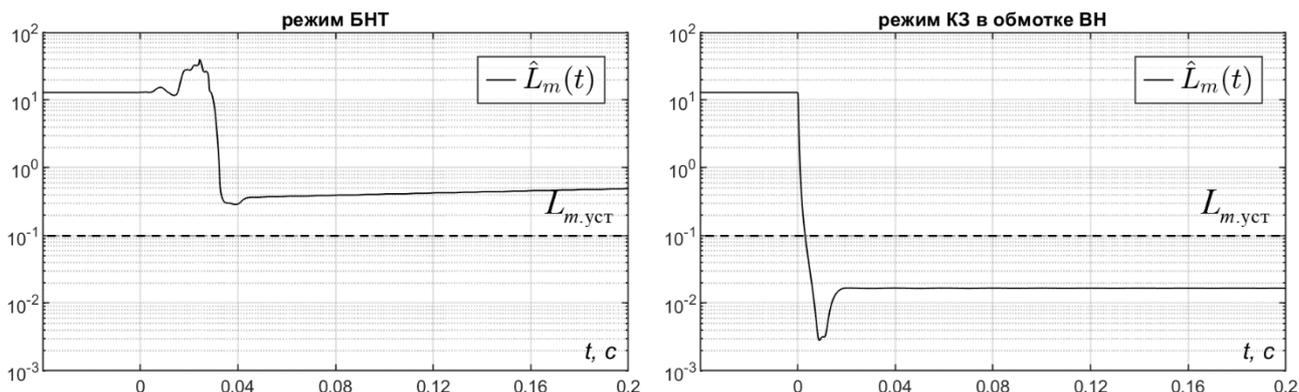


Рис. 5 – Оценка индуктивности намагничивания.

Основываясь на ранее проведенных исследованиях по совершенствованию дистанционной защиты линии [6], согласно схеме (рис.4), можно показать, что полученные выражения для оценки сопротивления линии при КЗ и наличии двухсторонних измерений синхровекторов справедливы и для оценки сопротивления СТ при КЗ:

$$\underline{z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) - \underline{z}_{12} \dot{i}_2(t) - L_{12} \dot{i}'_2(t)}{\dot{i}_1(t) + \dot{i}_2(t) + k [\dot{i}'_1(t) + \dot{i}'_2(t)]}. \quad (3)$$

Таким образом, справедливыми оказываются и те преимущества, которые предоставляют двухсторонние измерения синхровекторов для дистанционной защиты линии [6]. Также стоит отметить подход, при котором используется не отдельная оценка  $\underline{z}_{12}(t)$  или  $\underline{z}_{21}(t)$ , а их разность, что позволяет по аналогии с дифференциальной защитой производить расчет некоторого сопротивления небаланса  $z_{нб}$  и сравнивать его с заданной уставкой  $z_{с3}$ . В этом случае могут сочетаться преимущества дистанционного и дифференциального принципа защиты СТ.

### Мониторинг и автоматика

Основная защита СТ должна обеспечивать чувствительность при внутренних КЗ и быть селективной при внешних КЗ. При этом дополнительно эта защита также должна обеспечивать чувствительность к сложным типам повреждений, такие как витковые замыкания (ВЗ). Природа и характер ВЗ таковы, что даже современные дифференциальные защиты не могут обеспечить чувствительность при малом числе замкнувшихся витков. В этом случае выявление и предупреждение развития сложных повреждений может обеспечивать система мониторинга СТ [7].

Традиционным представлением о системе мониторинга СТ является контроль ряда параметров, для измерения которых требуется установка отдельных измерительных датчиков и ИЭУ. Тем не менее, для распределительных сетей такой подход не всегда является приемлемым. Как было указано выше, с точки зрения обеспечения функций защиты СТ наиболее важным является контроль параметров СТ, по изменению которых можно

судить о развитии тех или иных процессов. Измерение синхровекторов напряжения и тока СТ позволяет оценивать эти параметры в любом режиме работы энергосистемы:

$$z_{12}(t) = \frac{2[\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)]}{i_1(t) + i_2(t) + k[i_1'(t) + i_2'(t)]} \quad (4)$$

Оценка параметров (2) – (4) может производиться не только в целях обеспечения функций защиты, когда необходимо быстрое отключение СТ, но и в целях мониторинга его состояния, для предотвращения развития сложных типов повреждений, когда чувствительность защиты не может быть обеспечена. При этом применение цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения [12] позволяет обеспечить точную оценку параметров СТ как в нормальном режиме, так и при коротких замыканиях, что предоставляет возможность реализовать некоторые функции мониторинга в микропроцессорном устройстве РЗА.

На базе оборудования ООО «Инженерный центр «Энергосервис» совместно с авторами доклада ведутся разработки системы мониторинга трансформатора на основе СВИ. В настоящее время реализовано специализированное устройство – модуль индикации состояния трансформатора (МИСТ), который осуществляет сбор и обработку данных СВИ для оценки параметров СТ и мониторинга его состояния (рис.6). Устройство имеет ряд экранных форм, с помощью которых можно оценить состояние СТ непосредственно на объекте, а также оно формирует перечень суточных, недельных, месячных и годовых отчетов, по которым можно судить об изменении состояния СТ. Любые аномальные отклонения параметров также фиксируются путем записи осциллограмм.

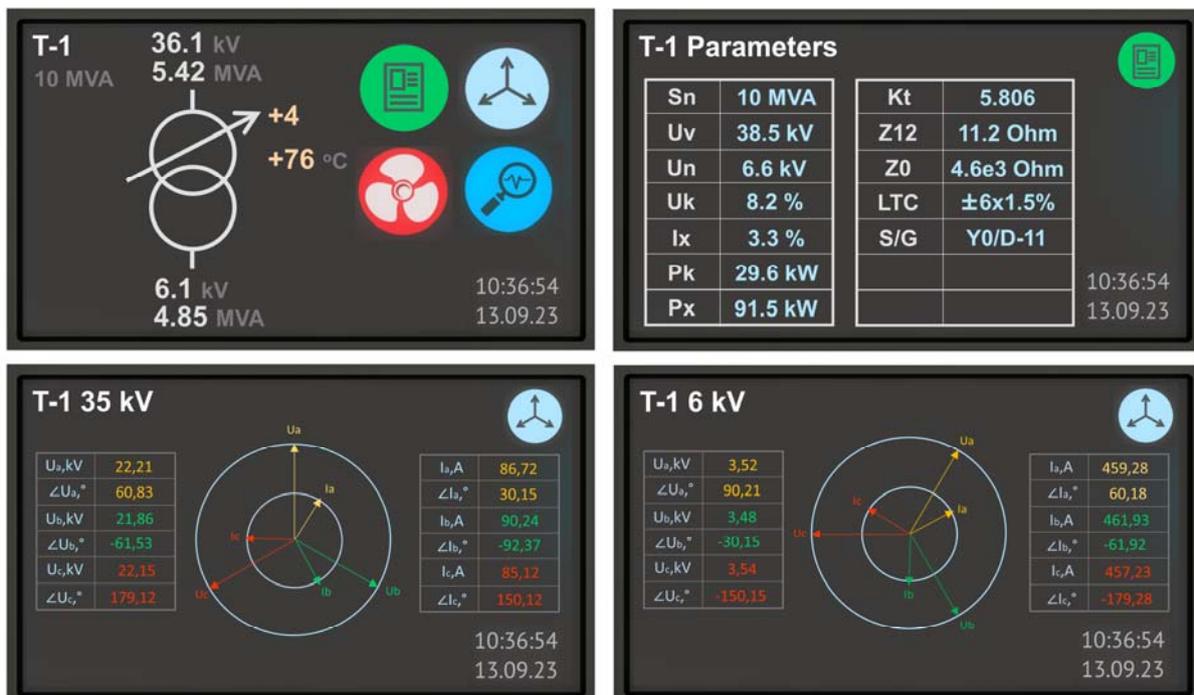


Рис. 6 – Мониторинг состояния СТ на основе СВИ.

Важной задачей для систем автоматики СТ является управление и контроль переключений коэффициента трансформации с помощью РПН (АРКТ). Технология СВИ обеспечивает возможность контролировать длительность и характер переключений, ресурс привода РПН, фиксировать случаи «самохода», «застревания» и др. Дополнительно с помощью СВИ могут быть реализованы специализированные алгоритмы работы РПН для обеспечения требуемого уровня напряжения одновременно у нескольких потребителей.

С помощью принципа многосторонних измерений на базе СВИ [6] могут быть реализованы дополнительные условия для работы автоматики управления выключателем СТ (АУВ) на трансформаторных подстанциях 6(10)/0,4 кВ, устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ) на крупных подстанциях, функций автоматического повторного включения (АПВ) и автоматической частотной разгрузки (АЧР) силового трансформатора. В этом случае наличие СВИ позволяет сравнивать измерения синхровекторов тока и напряжения по различным присоединениям как на одном объекте, так и на нескольких, например, на смежных ПС.

В настоящее время активное внедрение различных источников генерации на среднем и низком напряжении обуславливает необходимость в поиске новых принципов построения систем автоматики распределительных сетей. Безусловно, что для систем автоматики сетей с РГ наибольшие преимущества могут быть получены на базе СВИ [8], поскольку здесь возникают новые задачи по совершенствованию устройств автоматики управления режимом и противоаварийной автоматики. Поэтому применение СВИ в системах автоматизации СТ позволяет не только расширить возможности этих систем, но также открывает пути для развития релейной защиты, автоматики и мониторинга распределительных сетей в целом.

### **Заключение**

Совершенствование устройств защиты во многом зависит от эффективности применения новых технологий, интеллектуальных устройств, современных технических средств. Одним из таких направлений по совершенствованию систем автоматизации СТ является применение технологии СВИ.

В докладе были рассмотрены основные преимущества применения СВИ в системах автоматизации СТ, результаты исследований авторов по совершенствованию релейной защиты, мониторинга и автоматики СТ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока. Разработанные алгоритмы и принципы работы рассматриваемых систем были протестированы на математических и физических моделях, а также в ходе опытно-промышленной эксплуатации на объектах распределительных сетей.

## Литература

1. Богомолов В. С. и др. Повреждаемость основного электрооборудования ПС напряжением 110-750 кВ в РФ // Энергия единой сети. 2013. № 2. С. 14-21.
2. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат. 1998. 800 с.
3. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебник для вузов. 1991.
4. Piskunov S. A., Mokeev A. V. Power transformer relay protection with its condition monitoring function // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2021. С. 1-5.
5. Мокеев А. В. и др. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3 (47). С. 92-100.
6. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов // Релейная защита и автоматизация. № 1 (54). 2024. С. 8-15.
7. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Системы управления, защиты, автоматике и мониторинга сетей среднего напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 2 (77). С. 94-102.
8. Илюшин, П. В. Особенности реализации автоматике управления режимами энергорайонов с объектами распределительной генерации / П. В. Илюшин, А. Л. Куликов // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 3(36). С. 14-23.
9. Концепция развития релейной защиты, автоматике и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «Россети». Приказ № 286/186 от 24.06.2022.
10. Пискунов С. А., Мокеев А. В., Ульянов Д. Н. Применение принципов WAMPACS для повышения надежности распределительных сетей среднего напряжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 2023. С. 613-622.
11. Белкин Д. Г., Маркевич Н. Н. Способы отстройки дифференциальных защит трансформаторов от токов небаланса. – 2010.
12. Ульянов Д.Н. и др. Разработка и исследование комбинированных цифровых трансформаторов тока и напряжения // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сборник докладов VII международной научно-практической конференции. Чебоксары. 2023. С. 41-45.