

# Проблемы контроля изоляции и защиты высоковольтных вводов

Краячич А.В., к.т.н., Мордкович А.Г., к.т.н., Цфасман Г.М., к.т.н.

ООО «АСУ-ВЭИ»

*Доверяй, но проверяй  
(Народная пословица)*

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения надежной работы высоковольтных вводов является весьма актуальной многие десятилетия не только в нашей стране, но и за рубежом. По данным из разных источников, например [1,2], отказы трансформаторного оборудования из-за дефектов вводов составляют до 50% для маслонаполненных вводов и до 30% для вводов с RIP изоляцией. В связи с массовым переходом к твердым вводам изменились доминирующие факторы, вызывающие повреждения, но статистика по-прежнему не очень утешительна. Так за последние несколько лет (с 2006 по 2013 гг.) по данным [3] произошло 78 случаев отказов трансформаторного оборудования по причине повреждения высоковольтных вводов, и это статистика только одного трансформаторного завода. Накопленный опыт эксплуатации и разбора аварий позволяет сделать вывод, что основными причинами повреждений изоляции RIP-вводов являются дефекты заводского изготовления, повышенная температура верхних слоев масла, наличие остаточных механических напряжений, особенно при эксплуатации в регионах с низкими температурами.

Разнообразие влияющих факторов, их случайный характер в процессе эксплуатации делают задачу прогнозирования срока службы по результатам периодических испытаний трудно выполнимой. При этом в подавляющем большинстве случаев ухудшение электрических параметров вводов происходит не мгновенно и может быть своевременно обнаружено системой непрерывного контроля.

Безусловно, проблема повышения надежности высоковольтных вводов - проблема многофакторная, включающая, прежде всего вопросы совершенствования конструкторских решений и технологии изготовления. Однако данная статья посвящена другому аспекту проблемы - вопросам современного состояния и практике применения методов и средств контроля и защиты современных высоковольтных вводов и возможных путей их совершенствования.

Приведенные в работе данные и предложения авторов получены в результате разработки, опыта внедрения и промышленной эксплуатации устройства непрерывного контроля высоковольтных вводов НКВВ.

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

**На сегодняшний день одной из не решенных проблем**, препятствующих эффективной эксплуатации внедренных устройств контроля и защиты вводов с RIP изоляцией, является практически полное отсутствие в рамках всей ЕНЭС нормативной документации, регламентирующей требования к таким устройствам, к их использованию и правилам их эксплуатации. Действующие нормативные документы устарели, весьма противоречивы и не соотнобразуются с современной практикой.

Так, в [4] и [5] указывается, что необходимо обеспечивать под рабочим напряжением непрерывный (автоматический) контроль состояния высоковольтных вводов 110 кВ и выше по изменению абсолютного значения угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  и емкости изоляции  $C_1$ . Для силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов 110 кВ и выше прямо указывается, что они должны оборудоваться системами автоматического контроля вводов под рабочим напряжением по изменению  $\text{tg}\delta$  и емкости изоляции  $C_1$ . При этом определено, что каждый ввод независимо от класса напряжения должен иметь измерительный вывод для обеспечения возможности его технической диагностики.

В то же время в Правилах устройства электроустановок, Издание 7 [6] определено, что для высоковольтных вводов класса напряжения 500 кВ и 750кВ необходимо применение устройства контроля изоляции вводов (КИВ) с действием на сигнал при частичном пробое и на отключение при полном пробое изоляции ввода. В [7] регламентируется применение в автотрансформаторах и шунтирующих реакторах 500-750 кВ устройств защиты, действующих по небалансу токов проводимости, однако только для маслонаполненных высоковольтных вводов, вопрос с вводами с RIP изоляцией остается открытым. Отсутствует нормативная база, регламентирующая граничные значения и выдержки времени срабатывания КИВ-500 для вводов с RIP изоляцией 330кВ и выше.

Существующие методические указания [8] изданы в 1983 г. и безнадежно устарели. В этом документе даны рекомендации по применению релейных устройств защиты типа КИВ-500, в то время как в настоящее время функции КИВ-500 реализуются в терминалах микропроцессорных устройств РЗА.

Объем и нормы испытаний высоковольтных вводов приведены в [9]. Указанный документ содержит полный перечень предельно-допустимых значений параметров изоляции вводов и рекомендации по их контролю под рабочим напряжением (т.е. в эксплуатации) для вводов с бумажно-масляной изоляцией, однако в документе не приведены нормы для вводов с RIP изоляцией 330-750кВ.

Таким образом, к настоящему моменту нет ни одного нормативного документа, в котором бы на современном уровне были сформулированы технические требования к устройствам непрерывного контроля и защиты вводов, порядку их применения и методические указания по наблюдению, контролю и эксплуатации вводов с RIP изоляцией.

Требуют скорейшего решения вопросы, возникающие при использовании для защиты вводов 500 и 750 кВ устройства КИВ-500, созданного более 50 лет назад [10]



Рис.1 Реле защиты КИВ-500

Это устройство (рис.1) формирует релейные сигналы на предупредительную сигнализацию и на отключение защищаемого трансформаторного оборудования по факту превышения модуля геометрической суммы токов проводимости вводов 3-х фаз некоторых наперед заданных значений (уставок).

С некоторыми «косметическими» усовершенствованиями это устройство используется как для защиты маслонаполненных вводов, так и для вводов с RIP изоляцией.

По мнению авторов, устройство КИВ-500 имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются:

- Устройство контролирует параметр, не гарантируемый ни одним из поставщиков высоковольтных вводов. В паспортных данных на каждый ввод гарантируются предельные значения  $\text{tg}\delta$  и емкости  $C_1(C_3)$ . Качественный параметр  $|\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C|$  может быть источником ложной информации, так как причиной превышения модуля суммы токов заданной уставки может быть не ухудшение диэлектрических характеристик ввода (вводов), а изменения приложенных к ним напряжений, как по амплитуде, так и по фазе в различных несимметричных режимах.
- В приборе КИВ-500 до настоящего времени используются согласующие трансформаторы тока. Эти трансформаторы с коэффициентом трансформации по току 5-10 - безусловный атавизм, оставшийся нам в наследство с тех времен, когда суммирование токов проводимости вводов трех фаз проводилось с помощью трансформаторно-резисторной схемы [10]. Для современных микропроцессорных КИВ, имеющих высокую чувствительность, ничего, кроме дополнительной фазовой погрешности, они не дают. Более того, согласующие трансформаторы, повышая ток на вторичной стороне в 5-10 раз, во столько же повышают напряжение на тестовом измерительном выводе. В результате испытательное напряжение при проверке электрической

прочности изоляции измерительного вывода должно быть повышено до 2-2,5 кВ.

- Еще одним недостатком используемой схемы является разнесенное исполнение устройства, при котором чувствительный элемент (согласующий трансформатор) размещается в непосредственной близости от контролируемого трансформаторного оборудования, а исполнительный орган (терминал МП РЗА или блок реле КИВ-500Р) - на релейном щите энергообъекта. Такое исполнение увеличивает расход кабельной продукции, и повышает вероятность воздействия помех, наводимых на кабели связи, длина которых может достигать 1000 и более метров. Кроме того, распределенная емкость и продольное активное сопротивление кабеля создают дополнительную фазовую погрешность в измерении суммы токов проводимости.

- На практике, при замене одного из трех вводов, зачастую возникает такая ситуация, при которой трансформаторная группа работает с одним новым вводом с RIP изоляцией и двумя другими маслонаполненными. Для таких случаев вообще нет рекомендаций по настройке КИВ и критериев для установки граничных значений защит.

**Отдельно стоит обратить внимание** на проблемы, возникающие при проектировании и монтаже оборудования защиты и мониторинга, связанные с конструкцией измерительных выводов серийно поставляемых высоковольтных вводов. На рынке России представлено несколько основных производителей вводов – это АВВ (вводы импортного производства и произведенные на заводе ООО “АББ” г. Хотьково), HSP, ООО «Масса». Многочисленные типы высоковольтных вводов, выпускаемых этими производителями, имеют разную конструкцию измерительного вывода (рис.2 и 3).



Рис.2 Разнообразие устройств присоединения к тестовым выводам вводов разных типов



Рис.3 Устройство присоединения к измерительному выводу на вводе фирмы АВВ

Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) разработан и введен в действие Международный стандарт [11], регламентирующий размеры и конструкцию высоковольтных вводов, в том числе измерительных и потенциальных выводов (с которых возможен отбор мощности), в зависимости от класса напряжений.

К сожалению, на российском рынке только часть производителей вводов (например, Trench) следует этому стандарту, большинство - нет. Представляется целесообразным пойти еще дальше, с тем, чтобы в комплект поставки ввода включалось стандартное устройство присоединения (УП). Такое УП должно быть оснащено средствами ограничения перенапряжений измерительного вывода, возникающими при обрыве кабеля связи с устройствами защиты и мониторинга или при грозовых (коммутационных) воздействиях на ввод.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Для реализации функций непрерывного контроля (мониторинга) в ЕНЭС в настоящее время в подавляющем большинстве случаев используются два устройства – R1500/R1600 (производитель фирма «ДИМРУС», г. Пермь) и НКВВ (ООО «АСУ-ВЭИ»). При этом приборы R1500/R1600 используют принцип контроля модуля геометрической суммы токов проводимости вводов 3-х фаз и обладают тем же принципиальным недостатком, что и устройство защиты КИВ – 500.

Более перспективным, по мнению авторов, является способ прямого измерения активных и реактивных составляющих тока утечки изоляции ввода, напряжения на вводе и частоты сети с последующим вычислением ампли-

туд и фазовых соотношений между током и напряжением,  $\operatorname{tg} \delta$  и емкости основной изоляции ввода [12..14]. Такой способ позволяет осуществлять мониторинг именно тех параметров, которые наиболее полно характеризуют состояние изоляции ввода, указаны в паспортных данных и гарантированы поставщиком. Более того, такое устройство одновременно может являться измерительным органом средств РЗА (как и другие устройства мониторинга трансформаторного оборудования – датчики температуры масла и обмотки, приборы контроля растворенных газов и влаги). При такой реализации исчезает необходимость в согласующем трансформаторе и сумматоре. На вход РЗА поступают дискретные сигналы (или цифровой код), сигнализирующие о превышении контролируемыми параметрами предупредительной и/или аварийных уставок, непосредственно с выхода устройства мониторинга и защиты.

Под руководством и при непосредственном участии авторов разработан, освоен в серийном производстве и поставляется заказчикам прибор непрерывного контроля изоляции высоковольтных вводов НКВВ (рис.4), основанный на методе прямого измерения [15]. Принцип действия прибора основан на вычислении  $\operatorname{tg} \delta$  и емкости изоляции  $C_1$  путем прямого измерения тока проводимости ввода и приложенного к нему напряжения и разложения измеренных периодических сигналов на ортогональные составляющие.



Рис.4 Устройство НКВВ на ПС «Грозный»

Пусть мы имеем два подлежащих измерению сигнала (приложенное напряжение и ток проводимости ввода), искаженных высшими гармониками и содержащих случайные искажения:

$$u(t) = U \cos(\omega t + \psi_u) + \sum_{k=2}^{\infty} U_k \cos(k\omega t + \psi_u) + \xi_u(t), \quad (1)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \psi_u + \varphi) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \cos(k\omega t + \psi_{ik}) + \xi_i(t), \quad (2)$$

где  $\psi_u$  – смещение фазы сигнала напряжения относительно опорной косинусоиды,  $\varphi$  – разность фаз первых гармоник сигналов тока и напряжения,  $\xi(t)$  – случайные составляющие сигналов.

Ортогональные косинусные и синусные составляющие первых гармоник измеряемых сигналов определяются первыми членами разложения функций (1), (2) в ряды Фурье:

$$U_c = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(\omega t) \cdot u(t) \cdot d\omega t, \quad (5)$$

$$U_s = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(\omega t) \cdot u(t) \cdot d\omega t, \quad (6)$$

$$I_c = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(\omega t) \cdot i(t) \cdot d\omega t, \quad (7)$$

$$I_s = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(\omega t) \cdot i(t) \cdot d\omega t. \quad (8)$$

Действующее значение тока утечки ввода определяется по соотношению

$$I_e = \sqrt{(I_c^2 + I_s^2) / 2}, \quad (9)$$

а тангенс угла потерь  $\delta = (\frac{\pi}{2} - \varphi)$  - по соотношению  $\operatorname{tg} \delta = I_c / I_s$ . (10)

Далее определяются емкость основной изоляции ввода  $C_1 = I_s / \omega U_c$  (11)

и сопротивление утечки основной изоляции  $R = U_c / I_c$ . (12)

В соответствии с известной теоремой квантования интегралы в первых членах ряда Фурье могут быть заменены суммированием  $N$  дискретных значений:

$$F = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(\omega t - m \frac{\pi}{2}) d\omega t = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k \frac{T}{N}) \cos(k \frac{2\pi}{N} - m \frac{\pi}{2}), \quad (13)$$

если спектр сигнала  $f(t)$  не содержит частот, превышающих критическую частоту  $f_c = (N-1)/T$ . Здесь  $m = 0$  для косинусных составляющих и  $m = 1$  для синусных составляющих,  $T = 2\pi / \omega$ . Выполнение указанного условия обеспечивается некоторой фильтрацией входных сигналов в узлах нормализации. Например, при  $N=1024$  для ослабления в  $2\pi$  раз составляющих искажений с частотой более  $f_c$ , амплитуда которых и так обычно невелика, требуется фильтр первого порядка с постоянной времени  $T/1024$ , или  $\sim 20$  мкс при частоте сети 50 Гц. При этом разность сдвига фаз между каналами тока и напряжения, связанная с начальным разбросом постоянных времени фильтров, будет иметь порядок 1 мкс и может быть скомпенсирована программными средствами после начальной калибровки прибора. При калибровке компенсируются также фазовые погрешности встроенных в устройство ТТ и ТН.

Авторами намечен путь дальнейшего совершенствования устройства защиты и контроля состояния изоляции вводов, позволяющий одновременно



решить две задачи, в том числе уменьшить влияние длинных линий связи между ТН и контролируемым трансформаторным оборудованием.

Дело в том, что измерительные трансформаторы напряжения располагаются часто на значительном удалении от контролируемого аппарата. Так, на гидроэлектростанциях при расположении блочных трансформаторов на плотине ГЭС расстояние до ближайших измерительных трансформаторов стороны высокого напряжения, располагаемых на сборных шинах в начале отходящих линий, может достигать до 1000 м и более.

При этом сигналы от измерительных трансформаторов напряжения приходится передавать к устройству контроля состояния высоковольтных вводов с помощью длинной кабельной линии. В этом случае возникают два вида искажений сигналов:

- 1) собственные искажения сигналов, связанные с их передачей по длинной несогласованной линии (как правило – изменение амплитуды и искажение фазы сигналов),
- 2) наводки на кабельную линию от электромагнитных полей, создаваемых оборудованием и ошиновкой станции (подстанции).

Искажения первого типа в принципе являются детерминированными и могут быть скомпенсированы при начальной калибровке устройства. Однако при изменении состава подключенной к измерительному трансформатору за кабельной линией аппаратуры измерений, релейной защиты и автоматики, приборов учета и контроля качества электроэнергии, значения амплитуды и, что особенно важно, фазы измеряемых напряжений могут изменяться. Искажения же второго типа в принципе являются нестационарными и не могут быть скомпенсированы. Решение проблемы изложено в патенте авторов [16]. Суть его состоит в реализации распределенного устройства, в котором оцифровка напряжения осуществляется отдельным блоком измерений, устанавливаемым в непосредственной близости от трансформаторов напряжения, а оцифровка измеренных токов проводимости – в блоке, размещенном вблизи контролируемых вводов. В него же по оптоэлектронным линиям передаются данные оцифровки сигналов напряжения. При этом синхронность оцифровки измеренных токов и напряжений обеспечивается специальным высокоскоростным каналом взаимной синхронизации. Второй решаемой задачей при применении такого устройства является максимальное приближение к топологии цифровых подстанций.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Для достижения максимального эффекта от использования средств защиты и контроля состояния высоковольтных вводов требуется безотла-

гательная разработка нормативных документов, в которых бы на современном уровне были сформулированы технические требования к устройствам непрерывного контроля и защиты вводов, порядку их применения и методические указания по наблюдению, контролю и эксплуатации вводов с RIP изоляцией.

2. Наиболее перспективным (по техническим и экономическим критериям) является отказ от использования отдельных устройств защиты и мониторинга вводов и переход на применение единых устройств, объединяющих эти функции и размещаемых в непосредственной близости от контролируемого оборудования.
3. Представляется целесообразным (по техническим и юридическим критериям) осуществлять контроль и защиту вводов по параметрам, которые гарантируют поставщики оборудования, а именно, по току проводимости,  $\tan\delta$  и емкости изоляции С1 каждого ввода.
4. Необходима разработка и внедрение стандарта (аналогичного стандарту IEEE), регламентирующего и унифицирующего требования к размерам и конструкции измерительных и потенциальных выводов высоковольтных вводов, в том числе устройств присоединения со встроенными ограничителями перенапряжений для подключения вводов к устройствам защиты и мониторинга.

## Литература

1. Жорняк Л.Б., к.т.н., доц, Райкова Е.Ю., Осинская В.И. (Запорожский национальный технический университет) ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ ЭНЕРГЕТИКА ТА ЭНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ. Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського .Випуск 4/ 2008 (51)
2. Славинский А.З., Сипилкин К.Г, Кассихин С.Д., Никитин Ю.В. О надёжности высоковольтных вводов 330–500 кВ с твёрдой полимерной изоляцией. Электрические станции, № 3, 2013. – С. 52-55.
3. Доля О.Е. Повышение надежности эксплуатации вводов. Доклад на конференции DIMRUS 2013. г. Пермь, 2013 г.
4. Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
5. Типовые технические требования к трансформаторам, автотрансформаторам (распределительным, силовым) классов напряжения 110 - 750 кВ. СТО 56947007-29.180.091-2011 ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
6. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
7. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ. СТО 56947007- 29.240.10.028-2009 ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.

8. Методические указания по техническому обслуживанию устройств КИВ. МУ-34-70-39-83. СО 34.35.669. МинЭнерго СССР, Москва, 1983.
9. Объем и нормы испытаний электрооборудования (РД 34.45-51.300-97). РАО «ЕЭС России», Москва, «Издательство НЦ ЭНАС», 2004.
10. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. 239с., М. Энергоатомиздат 1992
11. IEEE C57.19.01 Standard Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
12. Мордкович А.Г., Туркот В.А., Шеремет А.А., Тарасов А.А., Крайнич А.В., Комплекс мониторинга, диагностики и защиты конденсаторных высоковольтных вводов. Электро, №5, 2008г,
13. Шеремет А.А., Тарасов А.А., Устройство мониторинга высоковольтных вводов и сигнализации о состоянии их изоляции. Патент РФ на изобретение № 2328009, МПК G01R 31/02, G01R 31/14, приор. 25.12.2006, опубл. 27.06.2008, Бюлл. № 18.
14. Цфасман Г.М. Устройство для мониторинга состояния высоковольтных вводов. Патент РФ на изобретение № 2401434, МПК G01R 31/14, приор. 28.04.2009, опубл. 10.10.2010, Бюлл. №28.
15. Устройство непрерывного контроля высоковольтных вводов трансформаторного оборудования.  
<http://www.asu-vei.ru/production/transformers/sensors/nkvv/>
16. Мордкович А.Г., Несвижский А.М., Тарасов А.А., Цфасман Г.М. Устройство для контроля состояния высоковольтных вводов. Патент РФ на изобретение № 2452973, МПК G01R 31/02, приор. 26.01.2011, опубл. 10.06.2012, Бюлл. №16.