

Валькевич А.Н.

**ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
6-35 кВ КЫРГЫЗСТАНА. ПОВРЕЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ
НАПРЯЖЕНИЯ 6-35 кВ.**

A.N. Valkevich

**FERRORESONANT OVERVOLTAGES IN ELECTRIC NETS
OF 6-35 kV IN KYRGYZSTAN. THE FAILURES OF THE VOLTAGE
TRASFORMATORS OF 6-35kV.**

УДК: 621.316.1.027

Статья посвящена проблеме феррорезонансных перенапряжений в электрических сетях 6-35 кВ. Представлена статистика повреждений трансформаторов напряжения и их анализ. Предложены мероприятия по защите от феррорезонансных перенапряжений трансформаторов напряжения 6-35кВ.

The article considers the problem of ferroresonant overvoltages in electrical net of 6-35 kV. The damage statistics of voltage transformer and its analyzing are given. The actions for ferroresonant overvoltage protection of voltage transformer are considered.

Феррорезонансные перенапряжения представляют собой серьезную опасность для электрооборудования сетей 6-35 кВ. В сетях различного назначения практически всегда есть элементы, содержащие ферромагнитные сердечники. Поэтому в любой схеме имеется принципиальная возможность появления феррорезонансных процессов на промышленной частоте, на высших или низших гармониках. Для возникновения этих процессов необходимо наличие двух условий: токи должны быть достаточны для перехода кривых намагничивания за колено насыщения, а входное сопротивление сети, подключенной к обмотке, должно иметь емкостной характер. Активные сопротивления входных сопротивлений как подключенной сети, так и самой обмотки демпфируют феррорезонансные колебания. Поэтому наиболее опасными в отношении феррорезонансных перенапряжений являются режимы холостого хода.

В симметричных трехфазных режимах сети имеющиеся в схеме емкостные элементы (участки воздушных и кабельных линий, батареи конденсаторов) обычно оказываются зашунтированными низкоомным входным сопротивлением питающей сети, которое всегда имеет индуктивный характер. Поэтому в нормальных режимах феррорезонанс маловероятен. Наиболее часто возникает феррорезонанс при неполнофазных режимах сети, когда емкость сети относительно земли оказывается соединенной

последовательно с обмотками силового трансформатора или электромагнитного трансформатора напряжения.

Феррорезонансным процессам посвящено достаточно много исследований и статей [1, 2, 3, 4, 5].

Первопричиной самопроизвольного феррорезонансного процесса могут быть неодинаковые характеристики намагничивания фазных обмоток трансформаторов напряжения, несимметрия емкостей фаз относительно земли, повышение рабочего напряжения сети, повреждения отдельных элементов сети (заземление фазы, обрыв фазы и др.), неустойчивость нейтрали при возникновении колебательных контуров (включение трансформаторов на холостые шины, включение холостой линии и др.), влияние ненормальных режимов в одном участке сети на смежные здоровые участки сети.

Возможность возникновения и существования феррорезонансных процессов в цепях с трансформаторами напряжения определяются следующими тремя условиями [4, 5]:

1. Величина эквивалентной ёмкости сети ($C_{э\text{кв}}$) должна находиться в пределах, определяемых пределами изменения индуктивности трансформатора напряжения, т.е.

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{xx}} \leq C_{э\text{кв}} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_S}, \quad (1)$$

где L_{xx} - индуктивность холостого хода (х.х.),

L_S - индуктивность насыщения, L_N ;

ω - угловая частота напряжения сети, $1/c$;

$C_{э\text{кв}} = 3C$ - суммарная емкость сети по отношению к земле, Ф.

2. Феррорезонансный процесс возбуждается в контуре с резонансными параметрами после скачка напряжения в том случае, если суммарный поток в магнитопроводе ТН окажется больше потока начального насыщения магнитопровода ($\Psi_{нач,нас}$), так как это вызывает насыщение магнитопровода и плавное изменение индуктивности ТН:

$$\psi_{OCT} + \psi_{VCT} \geq \psi_{НАЧ.НАС} \quad (2)$$

Ток в первичной обмотке трансформатора напряжения при резонансе резко возрастает. Таким событием является отключение металлического однофазного замыкания на землю, при котором напряжение на трансформаторе напряжения скачком изменяется от линейного до фазного. Феррорезонанс в сети 6-10 кВ возникает даже при номинальном уровне напряжения в сети. В сети 35 кВ при отключении металлического замыкания на землю феррорезонанс может возникнуть, если напряжение в сети будет на 5 % выше номинального и отключение происходит в момент максимума потока в магнитопроводе.

3. Величина энергии, поступившей в феррорезонансный контур при каждом изменении индуктивности трансформатора напряжения, должна быть больше величины потерь в нём. Частота свободных колебаний тока в параметрическом контуре определяется исключительно параметрами L , C и R контура. Если активное сопротивление мало по сравнению с волновым сопротивлением контура, то собственная частота зависит только от индуктивности и ёмкости и совпадает с его резонансной частотой. По мере увеличения активного сопротивления собственная частота уменьшается, при значении активного сопротивления, превышающем в два раза волновое сопротивление контура, собственная частота обращается в нуль и возникновение резонансных колебаний становится невозможным.

$$R_{KP} \geq 2 \sqrt{\frac{L_{ЭКВ}}{C_{ЭКВ}}} \quad (3)$$

Феррорезонансные процессы на частоте 24-26 Гц имеют место в сетях с относительно небольшой ёмкостью фаз линий по отношению к земле. Резонансный процесс может возникнуть после исчезновения однофазного дугового замыкания на землю, при этом действующее значение тока в обмотках трансформаторов напряжения в несколько раз превышает предельное длительное допустимое значение. При таком токе трансформатор напряжения за несколько минут может перегреться и выйти из строя.

Резонансные процессы на частоте 150 Гц обусловлены несимметрией ёмкостей сети малой протяженности и неодинаковостью характеристик намагничивания магнитопроводов разных фаз. Токовые перегрузки обмоток трансформаторов напряжения в этом случае отсутствуют, но

в сети возникает смещение нейтрали и соответствующие перенапряжения [6].

Уменьшение ёмкости сети (линии малой длины) вплоть до случая отключения последней линии с однофазным замыканием, когда на источнике остается одна ёмкость шин ведет к очень большим кратностям феррорезонансных перенапряжений доходящих до 3 – 6 $U_{фм}$ [7].

Следует отметить, что при некоторых сочетаниях параметров сети напряжение на одной из фаз при феррорезонансном процессе может оставаться весьма малым (близким к нулю), в то же время на других фазах оно близко к линейному. В этом случае режим феррорезонанса очень трудно отличить от однофазного замыкания на землю. Подобный случай феррорезонанса нередко наблюдается в эксплуатации при подаче напряжения на холостые шины с трансформаторами напряжения. При этом срабатывает сигнализация замыкания на землю, хотя на самом деле имеет место феррорезонансный процесс. Опыт эксплуатации и литературные данные показывают, что уровень повреждаемости трансформаторов напряжения в различных энергосистемах неодинаков. В Краснодарэнерго [8] ежегодно повреждаемость трансформаторов напряжения контроля изоляции в электрических сетях 6-10 кВ составляла 6-9 % от числа установленных, в сетях 6-10 кВ Ставропольэнерго [9] эта величина достигает значений 10-20%. Более благоприятная статистика имеет место в распределительных сетях Свердловэнерго [10], где повреждаемость трансформаторов напряжения 6-10 кВ находится в пределах 1,0÷2,7%. По данным ОРГРЭС [3] повреждаемость трансформаторов напряжения типа ЗНОМ-35 составляет ежегодно 5-8 % от числа установленных.

Обобщённые данные [6] показывают, что за период 1995-1999 года число аварий с трансформаторами в распределительных сетях Чуйской области Кыргызстана достигала 7,6% от числа установленных комплектов ЗНОМ-35. Анализ данных позволяет высказать предположение, что повреждаемость трансформаторов напряжения в 1995-1999 года была обусловлена двумя взаимосвязанными причинами.

Во-первых – неоднократными воздействиями, возникающих при однофазных замыканиях на землю, феррорезонансных процессов в течение достаточно большого срока эксплуатации. При сравнительно небольших действующих значениях токов (2-3 кратных допустимому значению), возникающих при феррорезонансе, и времени их воздействия в первые годы эксплуатации, трансформатор напряжения может длительно не повреждаться.

Однако каждое такое воздействие, сопровождающееся существенным нагревом высоковольтной обмотки, не проходит бесследно, ведет к более интенсивному старению изоляции и возникновению ослабленных мест, т.е. имеет место своеобразный кумулятивный эффект. С точки зрения повышенной вероятности возникновения феррорезонансных процессов, являются значения ёмкостных токов, лежащие в пределах $0,5 \div 2,0$ А на один комплект трансформаторов напряжения ЗНОМ-35.

Во-вторых, длительная эксплуатация приводит к естественному старению и ослаблению изоляции.

Для выявления подстанций с повышенной вероятностью возникновения феррорезонансных процессов проведен анализ схем электрических сетей 35 кВ Кыргызстана [6]. В результате анализа установлены центры питания, в электрических сетях которых имеет место повышенная вероятность возникновения феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях на землю.

Одними из таких центров являются подстанции «Аламедин», «Кант», находящиеся на балансе Чуйского Предприятия Высоковольтных Электрических Сетей (ЧуПВЭС) и подстанция «Тюп», находящаяся на балансе Иссыкульского Предприятия Высоковольтных Электрических Сетей (ИПВЭС).

26 декабря 2007 года на подстанции «Тюп» (ИПВЭС) произошло перекрытие и выброс масла из трансформаторов напряжения ЗНОМ-35 кВ на фазах «А» и «В» второй секции шин 35 кВ. 28 мая 2007 года на подстанции «Аламедин» (ЧуПВЭС) и подстанции «Кант» (ЧуПВЭС) в интервале одного часа произошли похожие случаи повреждения трансформаторов напряжения типа ЗНОМ-35 кВ.

Повреждения трансформаторов напряжения подстанций «Аламедин» «Кант» являются взаимосвязанными. В 06 час. 38 мин. 28 мая 2007 года на подстанции «Аламедин» произошёл выброс масла из трансформатора напряжения 35 кВ второй секции шин 35 кВ фазы «В» типа ЗНОМ-35. Подстанции «Аламедин» и подстанции «Кант» связаны друг с другом через линии и подстанции 35 кВ. После повреждения трансформаторов напряжения на подстанции «Аламедин» на первой системе шин 35 кВ была отключена отходящая от данной системы шин линия. Секционный выключатель на подстанции «Аламедин» был отключен. Потребители со стороны 35 кВ были перезапитаны через подстанцию «Кант». В 07 час. 15 мин. на подстанции «Кант» произошёл взрыв, выброс масла и возгорание на всех трех фазах трансформаторов напряжения 35 кВ первой

секции шин и второй секции шин 35 кВ фазы «В». На момент повреждения трансформаторов на подстанции «Кант» секционный выключатель был отключен.

Причиной повреждения трансформаторов напряжения 35 кВ на подстанции «Аламедин» явилось наличие в сети 35 кВ однофазного замыкания на землю, которое могло сопровождаться наличием перемежающейся дуги в месте замыкания. Повреждение трансформаторов напряжения на подстанции «Кант» было следствием перевода нагрузки на данную подстанцию по стороне 35 кВ с подстанции «Аламедин» при наличии однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ.

В настоящее время на подстанции «Аламедин» в нейтрале 35 кВ силового трансформатора установлено высокоомное сопротивление ЗАС-35. На второй секции шин 35 кВ повреждений трансформаторов напряжения 28.05.07 не наблюдалось.

Повреждение трансформаторов напряжения на подстанции «Тюп» сопровождалось однофазным замыканием на землю. При отключенном секционном выключателе 35 кВ создаётся повышенная вероятность возникновения феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях на землю на подстанции «Тюп» [6]. На момент повреждения трансформаторов напряжения секции шин 35 кВ работали раздельно.

Массовые повреждения трансформаторов напряжения в электрических сетях 6-35 кВ стимулировали теоретические и экспериментальные исследования в действующих электроустановках. В Союзтехэнерго (ОРГЭС) определены ёмкостные токи замыкания на землю на каждый трансформатор напряжения в сети, при которых феррорезонансные процессы могли сопровождаться перенапряжениями, опасными для изоляции электрооборудования или весьма опасными токами в обмотках высокого напряжения трансформатора напряжения.

Мероприятия по установке активных резисторов в обмотки $3U_0$ или в нейтрали обмотки высокого напряжения трансформаторов напряжения хотя и привело к снижению повреждаемости ТН, но полностью проблемы защиты от феррорезонансных процессов не решила [1, 11].

В электрических сетях 6-10кВ в 1979-1980 г. была внедрена система мероприятий, включающая в себя:

- ✓ реконструкцию трансформаторов напряжения типа НТМИ с разземлением нейтрали обмотки высокого напряжения и усилением изоляции нулевых выводов обмотки;

✓ оснащение сетей специальными устройствами контроля изоляции УКИ-10.

Опыт работы реконструированных трансформаторов напряжения в комплекте с устройствами УКИ, установленных на подстанциях с емкостным током замыкания на землю 5-10 А, показал их достаточную эффективность. Разземление нейтрали обмотки высокого напряжения исключает повреждения ТН от перегрузки бросками токов и феррорезонансных процессов при дуговых замыканиях. Недостатком применения данных мероприятий является невозможность измерения напряжения сети относительно земли [11].

Эффективной мерой повышения надежности электроснабжения и безопасности эксплуатации в распределительных сетях 6-35 кВ является включение в нейтраль сети высокоомного резистора оптимальной величины [5, 6]. Создание активного тока замыкания на землю в пределах (0,5-1,0) от емкостного ведет к снижению кратности перенапряжений при дуговых и металлических однофазных замыканиях на землю, полностью исключает возможность феррорезонансных процессов, создает условия для обеспечения надежной и селективной работы защит от однофазных замыканий и ограничения напряжения прикосновения и шага при дуговых замыканиях на землю. Эта мера обеспечивает защиту от повреждений трансформаторов напряжения при феррорезонансных процессах, а также всего высоковольтного оборудования от перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю.

В ряде публикаций по результатам исследования резонансных процессов в электрических сетях 6-35 кВ [12, 13] указывается на необходимость разработки новых конструкций трансформаторов напряжения, устойчивых ко всем процессам, происходящим в сети. В настоящее время разработан и выпускается Раменским электротехническим заводом «Энергия» трехфазный антирезонансный трансформатор напряжения НАМИ, который удовлетворяет следующим требованиям [3]:

- ✓ не вступает в резонанс с емкостью ненагруженных шин 35кВ;
- ✓ не вступает в феррорезонанс с емкостью линий любой протяженности;
- ✓ выдерживает без ограничения длительности любые виды однофазных замыканий на землю, в том числе через перемежающуюся дугу;
- ✓ выдерживает без ограничения повышения напряжение, вызванное феррорезонансом емкости сети с индуктивностью других

трансформаторов напряжения (например, ЗНОМ-35).

Трансформаторы напряжения типа НАМИ имеют специальную схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию. В баке антирезонансного трансформатора размещаются два трансформатора (трехфазный и однофазный), имеющие отдельные магнитопроводы. В нейтраль высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора, имеющего вторичную (компенсационную) обмотку, соединенную треугольником, включен однофазный трансформатор, который измеряет напряжение нулевой последовательности. Предотвращению феррорезонанса способствует то, что в контур нулевой последовательности входит только одна индуктивность намагничивания однофазного трансформатора, и этот феррорезонансный контур лишен источника ЭДС.

Выводы

1. Анализ условий появления феррорезонансных перенапряжений, связанных с трансформаторами напряжения, показывает, что в электрических сетях 6-35 кВ Кыргызстана всегда есть возможность появления режимов, которые являются благоприятными для возникновения феррорезонансных процессов.
2. Для уменьшения числа повреждений трансформаторов напряжения в электрических сетях 6-35 кВ Кыргызстана необходимо использовать следующие мероприятия:
 - В сетях 6-10 кВ эффективным способом является модернизация существующих трансформаторов напряжения – оснащение устройствами контроля УКИ-10.
 - Самым эффективным способом борьбы с феррорезонансными перенапряжениями, как в сетях 35 кВ, так и в сетях 6-10 кВ, является применение в нейтрале сети высокоомного сопротивления.
3. В настоящее время существуют разработки новых конструкций трансформаторов напряжения, устойчивых к феррорезонансным процессам, происходящим в сети. Плановая и поэтапная замена трансформаторов напряжения типа НТМИ, ЗНОМ на НАМИ является эффективным мероприятием по защите от феррорезонансных перенапряжений.

Литература:

1. Алексеев В. Г., Дунайцев С. Г., Зихерман М. Х., Ильин В. П. Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6 – 10 кВ. // Электрические станции. 1980. №1.
2. Зихерман М. Х. Повреждения трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю в

- сетях 6 – 10 кВ. //Электрические станции. 1978. №11.
3. *Зихерман М.Х., Левковский А.И.* Резонансные процессы в сетях 35кВ с трансформаторами напряжения. // Электрические станции. 1996. №5.
 4. *Поляков В.С.* Феррорезонанс в сетях с изолированной нейтралью.// Материалы Международной научно-технической конференции. Выпуск 1. – Санкт-Петербург, 2003.
 5. *Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Таджибаев А.И.* Защита сетей 6-35кВ от перенапряжений. – Санкт-Петербург, 2002.
 6. *Мавлянбеков Ш.У., Мезгин В.А., Симаков Ю.П.* Анализ повреждаемости трансформаторов напряжения 35кВ и опытная проверка эффективности резистивного устройства ЗАС-35 с целью повышения надежности сетей 35кВ при однофазных замыканиях на землю.//Кыргызский научно-технический центр по энергетике (КНТЦ «Энергия»), - Бишкек, 2000.
 7. *Евдокунин Г.А., Титенков С.С.* Внутренние перенапряжения в сетях 6-35 кВ. Санкт-Петербург, 2004.
 8. *Пасанюк Д.И., Фортунь Б.М., Миронов Г.А., Жислина А.А.* Мероприятия по защите ТНКИ 6-10кВ при дуговых замыканиях на землю. – Электрические станции, 1982, № 12.
 9. *Желтиков Е.А. Дынкин В.Б., Бунин В.Ш.* Об опыте предупреждения повреждений трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6-10 кВ. – Электрические станции, 1982, №9.
 10. *Катсон В.Д., Осотов В.Н.* О путях повышения эффективности защиты от перенапряжений распределительных сетей 6-10 кВ. – Электрические станции, 1982, №2.
 11. *Панасюк Д.И., Фортунь Б.М., Миронов Г.А., Жислина А.А.* Мероприятия по защите ТНКИ 6-10 при дуговых замыканиях на землю. // Электрические станции. 1982.
 12. *Виштибеев А.В., Кадомская К.П., Хныков В.А.* Повышение надежности электрических сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ // Электрические станции. 2002. №3.
 13. *Зихерман М.Х., Львов Ю.Н., Львов М.Ю.* Об антирезонансных трансформаторах напряжения 6-35кВ. // Энергетик. 2003г. №10.