

# Об эффективности применения современных антирезонансных трансформаторов напряжения в сетях 6-35 кВ

Лаптев О.И.

(НГТУ, кафедра ТЭВН, г. Новосибирск)

## Введение

Основным недостатком трансформаторов напряжения для контроля изоляции (ТНКИ) в сетях 6-35 кВ является нарушение их нормальной работы или повреждения из-за возникновения феррорезонансных процессов [1-3]. Можно выделить три характерных аварийных режима [3]:

- Устойчивый режим феррорезонанса, обусловленный однофазными дуговыми замыканиями (ОДЗ) или отключением однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Сопровождается значительным увеличением токов в обмотках ВН трансформаторов напряжения (ТН).
- Перемежающиеся дуговые замыкания, при которых в периоды погасания дуги ёмкость сети разряжается через ТН. При этом в ТН рассеивается довольно значительная энергия, что может привести к его перегреву и повреждению.
- Явление «ложной земли», возникающее при очень малой ёмкости сети, когда ёмкостной ток фазы сети компенсируется током намагничивания ТН. В этом режиме происходит искажение напряжений на фазах сети и появление напряжения  $3U_0$  на обмотке контроля изоляции ТН.

Создание ТН, устойчивого к рассмотренным выше процессам, является весьма актуальной задачей. В ГОСТ 1983-2001 даже вводится особый термин «антирезонансный трансформатор напряжения». В последние годы появляется всё больше различных конструкций антирезонансных ТН для сетей 6-35 кВ. В частности, можно выделить ТН следующих типов:

- НАМИ, выпускаемые на Раменском электротехническом заводе «Энергия»;
- НАМИТ, выпускаемые ОАО «Самарский трансформатор»;
- ЗНОЛ.06, ЗНОЛП, выпускаемые ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока»;
- НАЛИ-СЭЩ, выпускаемые ООО «Русский трансформатор».

Антирезонансные свойства некоторых из приведенных ТН исследовались на кафедре ТЭВН НГТУ. В целом, конструкция антирезонансных ТН близка к конструкции традиционных ТН, например типа НТМИ. Принципиальная схема соединения обмоток ТН типа НТМИ приведена на рис.1, а. У рассмотренных антирезонансных ТН необходимые свойства обеспечиваются путём включения между нейтральной точкой соединения обмоток и землёй дополнительного трансформатора нулевой последовательности (ТНП), или большого активного сопротивления.

## Антирезонансные ТН типа НАМИ

Принципиальная схема соединения обмоток ТН типа НАМИ-10-95 приведена на рис.1, б. ТН типа НАМИ имеет трёхстержневой магнитопровод, в отличие от традиционных ТНКИ. Для измерения  $3U_0$  используется дополнительный трансформатор в нейтрали обмоток ВН. ТН также имеет замкнутую накоротко дополнительную компенсационную обмотку.

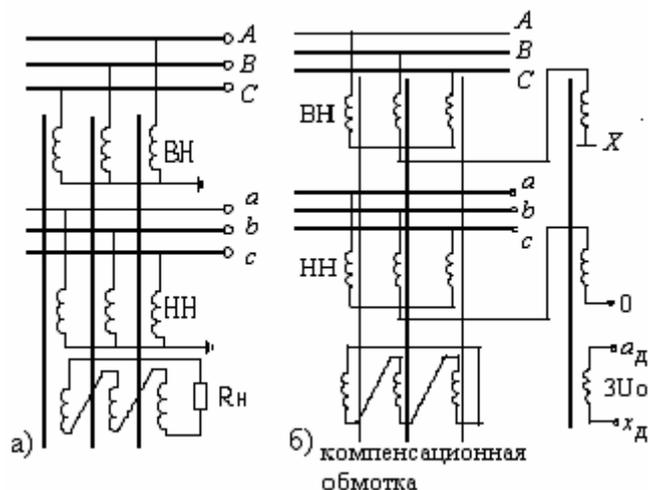


Рис. 1. Принципиальные схемы соединения обмоток ТН типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Антирезонансные свойства ТН обусловлены трёхстержневой конструкцией магнитопровода. При этом магнитный поток нулевой последовательности вынужден замыкаться по воздуху и корпусу ТН. При этом индуктивность нулевой последовательности ТН очень мала и линейна. Контур нулевой последовательности сети с ТН типа НАМИ приведен на рис.2.

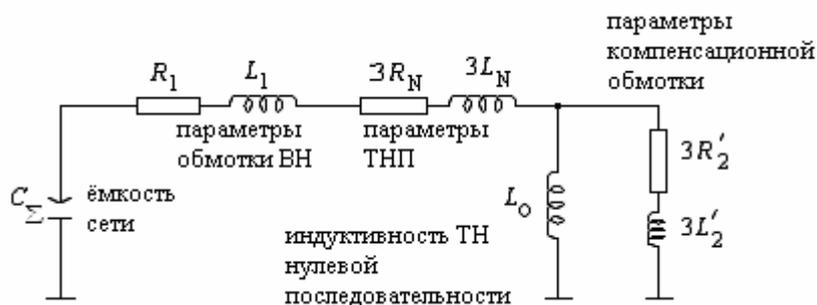


Рис.2. Эквивалентная схема нулевой последовательности сети с изолированной нейтралью и ТН типа НАМИ.

Поскольку нелинейные элементы в контуре нулевой последовательности отсутствуют, невозможно существование в этом контуре устойчивого колебательного процесса (т.е. феррорезонанса). При ОДЗ или отключении ОЗЗ в нулевой последовательности сети возникает затухающий колебательный процесс с частотой, обусловленной параметрами контура [4].

ТН типа НАМИ весьма устойчив к перемежающимся дуговым замыканиям, это объясняется свойствами дополнительного трансформатора: ТНП имеет очень большое реактивное сопротивление (300...600 кОм) и практически линейную характеристику намагничивания. К плюсам ТН этого типа относится также полная «пассивность» конструкции, т.е. отсутствие каких бы то ни было релейных устройств, необходимых для работы антирезонансного ТН.

Однако было установлено, что эти ТН подвержены явлению «ложной земли» в сетях с очень малой ёмкостью на землю, что также подтверждается эксплуатацией [5]. Существенным недостатком ТН типа НАМИ является укрытая в корпусе компенсационная обмотка, отсутствие доступа к ней является нарушением ГОСТ 1983-2001, в частности не позволяет осуществлять контроль состояния её изоляции. К минусам можно также отнести масляную изоляцию ТН, что ограничивает область их применения.

### Трёхфазная антирезонансная группа ТН типа ЗНОЛ.06(ЗНОЛП)

В конструкции этих трёхфазных групп, для придания им антирезонансных свойств, используется дополнительное сопротивление величиной 800-1000Ом, включаемое в нейтраль обмоток ВН (рис.3, а). Конструкция однофазных ТН типа ЗНОЛ.06 и ЗНОЛП отличается только наличием в цепи обмотки ВН у ТН типа ЗНОЛП плавкого предохранителя. Контур нулевой последовательности сети с рассматриваемыми ТН приведен на рис.3, б.

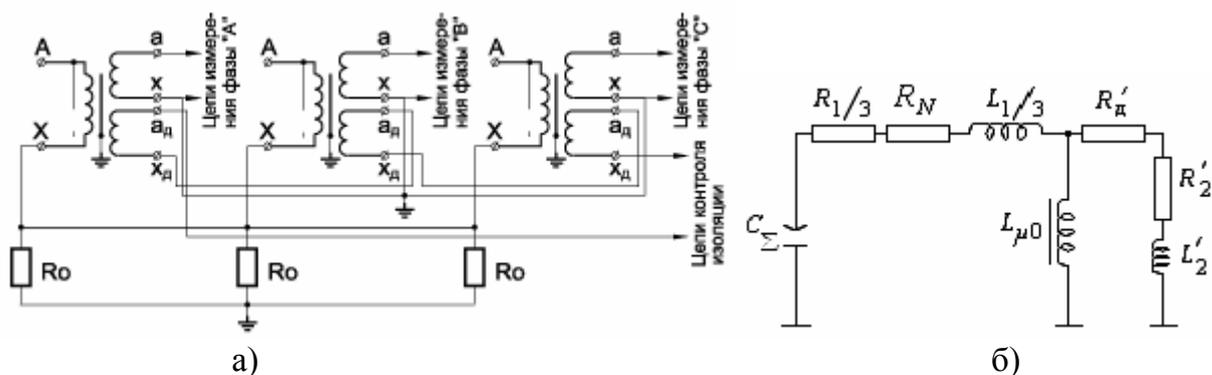


Рис. 3. Схема соединения обмоток трёхфазной антирезонансной группы ТН типа ЗНОЛ.06 (ЗНОЛП)(а), контур нулевой последовательности сети с этой группой ТН (б).

На рис.3,б сопротивление  $R_N$  - это сопротивление резистора, включённого в нейтральную точку соединения обмоток ВН группы ТН. Принцип действия этого сопротивления следующий: сопротивление  $R_N$  образует делитель напряжения с активным и индуктивным сопротивлением нулевой последовательности ТН. В нормальном режиме индуктивное сопротивление ТН очень велико и падение напряжения на сопротивлении  $R_N$  незначительно. При насыщении индуктивность ТН резко снижается, ток в обмотках ТН значительно увеличивается, но при этом увеличивается и падение напряжения на добавочном резисторе, приводя к демпфированию резонансных колебаний. На напряжении 6 кВ в нейтраль включается резистор величиной 1000Ом, на напряжении 10 кВ – 800Ом.

Поскольку в контуре нулевой последовательности сохраняется нелинейная индуктивность  $L_{\mu 0}$ , феррорезонанс в сети с ТН типа ЗНОЛ.06 (ЗНОЛП) может иметь место. В результате компьютерных расчётов эта возможность нашла подтверждение и были получены области существования феррорезонанса в сетях с рассматриваемыми ТН. На рис.4, а приведена зависимость действующего тока в установившемся после ОДЗ режиме от ёмкости сети (при наличии в сети двух антирезонансных групп ТН типа ЗНОЛ.06). На рис.4, б приведены области существования устойчивого феррорезонанса при ОДЗ или отключении ОЗЗ, в зависимости от ёмкости сети и количества ТН (групп ТН), для ТН типа НТМИ-6 и трёхфазной группы ТН типа ЗНОЛ.06-6. Из рис.4 в целом видно, что при определённой ёмкости сети устойчивый феррорезонанс в ТН типа ЗНОЛ.06(ЗНОЛП) возможен, токи при этом составляют 0.2-0.3А. Однако, области существования феррорезонанса в этих ТН по сравнению с традиционными ТН существенно меньше.

Дополнительное применение активного сопротивления 250Ом, включаемого во вторичную обмотку антирезонансной группы, позволит полностью предотвратить существование устойчивого феррорезонанса.

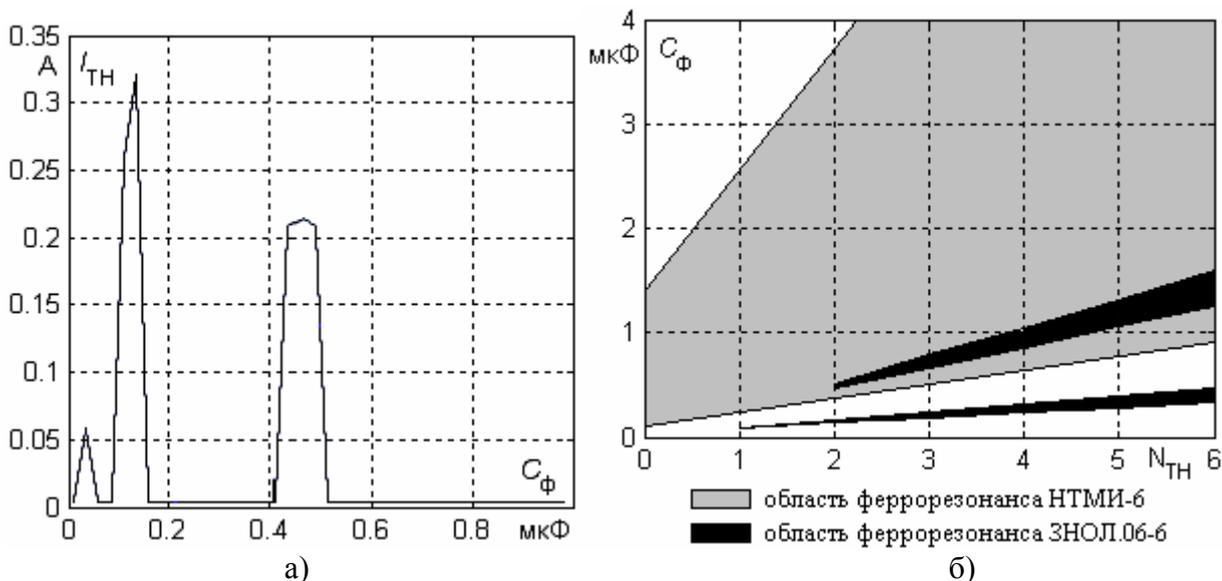


Рис.4. Зависимость действующего тока в установившемся после ОДЗ режиме от ёмкости сети с ТН типа ЗНОЛ.06-6 (а) и сравнение областей существования феррорезонанса ТН типов НТМИ-6 и ЗНОЛ.06-6 (б)

В результате компьютерных расчётов также было установлено, что группа ТН типа ЗНОЛ.06 (ЗНОЛП) подвержена явлению «ложной земли» в сетях с малой ёмкостью на землю. Применение дополнительного сопротивления 250 Ом позволяет предотвратить это явление.

Перебегающие дуговые замыкания могут привести к перегреву ТН этого типа, для существенного ограничения тока, протекающего в обмотках ВН ТН при разряде через ТН ёмкости сети требуется очень большое сопротивление, порядка 300 кОм в нейтрали обмотки ВН.

Наличие области устойчивого феррорезонанса, очевидно, является главным недостатком рассмотренной трёхфазной антирезонансной группы. Включение сопротивления 250 Ом во вторичную обмотку ТН не всегда допустима по условиям эксплуатации ТН. Альтернативной мерой могло бы быть увеличение сопротивления, включаемого в нейтраль обмотки ВН до 4-7 кОм, но это недопустимо по условию изоляции заземляемого вывода обмотки ТН (ТН типа ЗНОЛ). Включение дополнительных активных сопротивлений последовательно с обмоток ВН (так же как и увеличение сопротивления обмотки ВН) также неэффективно, т.к. в этом случае величины сопротивлений должны составлять 12-21 кОм (втрое больше, чем в нейтрали), что отрицательно скажется на метрологических характеристиках ТН. Наличие плавких предохранителей в обмотке ВН делает ТН типа ЗНОЛП весьма чувствительными к броскам токов намагничивания при переходных процессах.

Безусловным плюсом рассмотренной группы ТН является литая изоляция, что существенно расширяет область её применения (например, в шахтных сетях, сетях собственных нужд атомных электростанций). Отсутствие релейных устройств, необходимых для работы антирезонансной группы ТН также является положительным моментом.

### **Трёхфазная антирезонансная группа ТН типа НАЛИ-СЭЩ**

Антирезонансная группа ТН типа НАЛИ-СЭЩ была разработана на основе уже существующей конструкции антирезонансного ТН типа НАМИТ [5]. Принципиальная схема соединения обмоток ТН типа НАЛИ-СЭЩ приведены на рис.5. Антирезонансные свойства как ТН типа НАМИТ, так и ТН типа НАЛИ достигаются путём включения дополнительного трансформатора (ТНП) в нейтраль обмотки ВН. При этом, в нормальном

режиме работы вторичная обмотка ТНП замкнута, и он имеет относительно небольшое реактивное сопротивление. При появлении напряжения  $3U_0$  вторичная обмотка ТНП размыкается, и его реактивное сопротивление возрастает до 300 кОм. Очевидно, что для работы ТН требуется наличие определённых релейных схем.

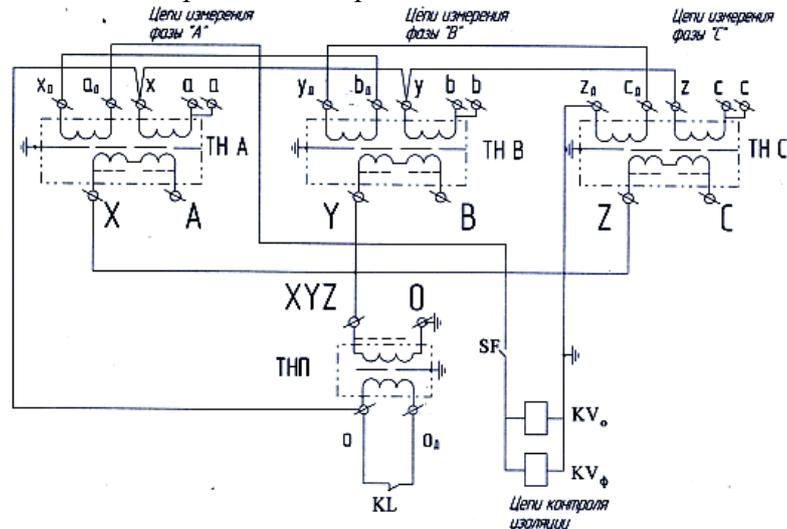


Рис.5. Схема соединения обмоток группы ТН типа НАЛИ-СЭЩ-6(10)

ТН типа НАЛИ-СЭЩ – это трёхфазная группа однофазных ТН типа НОЛ-СЭЩ с литой изоляцией. ТН типа НОЛ имеют два вывода обмотки ВН изолированных на полное напряжение (в отличие от ТН типа ЗНОЛ), что позволяет установить в нейтрали обмотки ВН дополнительный трансформатор.

Схема нулевой последовательности сети с ТН типа НАЛИ близка к схеме, приведенной на рис.2, т.к. конструкции ТН типа НАМИ и НАЛИ во многом схожи. Отличие заключается лишь в параметрах вторичной обмотки, соединённой в треугольник, и в параметрах индуктивности ТН по нулевой последовательности. При разомкнутой вторичной обмотке ТНП его активное сопротивление и индуктивность существенно увеличиваются, и колебания в контуре нулевой последовательности демпфируются.

Применение ТН типа НАЛИ-СЭЩ позволяет полностью предотвратить феррорезонансные процессы при ОДЗ или отключении ОЗЗ. Однако эти ТН также подвержены явлению «ложной земли». На рис.6 приведена компьютерная осциллограмма напряжения на вторичной обмотке НАЛИ-СЭЩ, соединённой в треугольник, при подачи напряжения на сеть с ёмкостью фазы 10нФ и одним ТН типа НАЛИ. При этом также моделировалось размыкание через 0.1с вторичной обмотки ТНП.

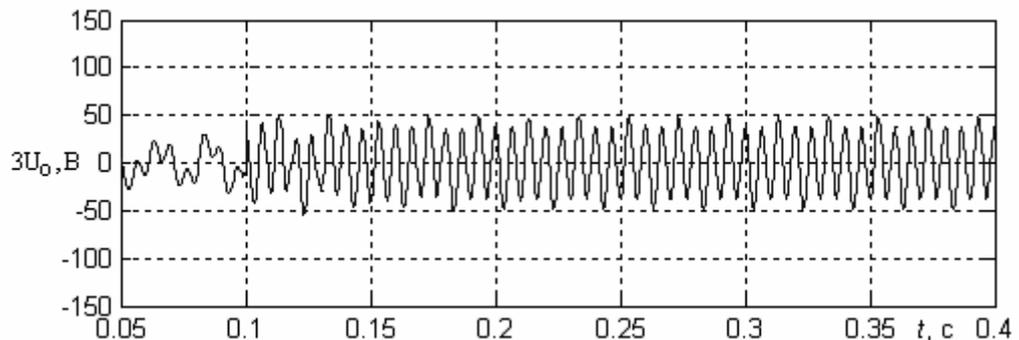


Рис.6. Компьютерная осциллограмма «ложного» напряжения  $3U_0$  на вторичной обмотке ТН типа НАЛИ-СЭЩ

Путём применения дополнительных активных сопротивлений можно решить проблему существования явления «ложной земли» в сетях с ТН типа НАЛИ.

При горении перемежающейся дуги в обмотках ВН ТН типа НАЛИ могут возникнуть недопустимые токи, это связано с тем, что в отличие от ТН типа НАМИ, ТНП и нелинейная индуктивность нулевой последовательности НАЛИ – насыщающиеся, и могут существенно снижаться с увеличением тока нулевой последовательности.

Наличие дополнительных релейных цепей усложняет эксплуатацию ТН типа НАЛИ, т.к. для питания реле необходим источник оперативного тока. Возможность отказа реле снижает надёжность всей антирезонансной группы. Всё это можно отнести к недостаткам этого типа ТН. Однако несомненным плюсом является литая изоляция, а также невозможность возникновения устойчивых режимов феррорезонанса при возмущениях в сети. В настоящее время разрабатываются варианты конструкции ТН типа НАЛИ, позволяющие обойтись без релейной защиты («пассивные» схемы) для обеспечения антирезонансных свойств.

### ***Заключение***

Рассмотренные конструкции антирезонансных ТН достаточно эффективны в предотвращении устойчивых феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью. Однако полностью решить все проблемы, связанные с процессами в электромагнитных ТН в этих сетях пока не удаётся. Наиболее сложным является обеспечение стойкости к перемежающимся дуговым замыканиям.

Требования к современному антирезонансному трансформатору для сетей 6-35 кВ были сформулированы в [6] М.Х.Зихерманом: литая изоляция, предотвращение феррорезонанса и стойкость к перемежающимся дуговым замыканиям и к явлению «ложной земли». Можно предположить, что создание такого трансформатора и будет следующим этапом развития рассмотренных выше конструкций.

### ***Список использованных источников***

- [1]. **Зихерман М.Х.** Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю // Электрические станции.- 1978.- №11.-С.65-67.
- [2]. **Алексеев В.Г.** Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ / Алексеев В.Г., Зихерман М.Х. // Электрические станции.-1979.-№1.-С.63-65.
- [3]. **Зихерман М.Х.** Трансформаторы напряжения для сетей 6-10 кВ. Причины повреждаемости // Новости электротехники.-2003.- №1(25).
- [4]. **Кадомская К.П.** Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью / Кадомская К.П., Лаптев О.И. // Научный вестник НГТУ.-2006.-№4(25).-С.167-175.
- [5]. **Овчинников А.Г.** Трансформаторы напряжения контроля изоляции 6-10 кВ. Сравнительный анализ моделей / Овчинников А.Г., Степанов Ю.А. // Новости электротехники.-2003.-№6(24).
- [6]. **Зихерман М.Х.** Антирезонансные трансформаторы напряжения. Достижения и перспективы // Новости электротехники.-2007.-№2(44).