

УДК 621.316.9.019

## ОСОБЕННОСТИ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ВИШТИБЕЕВ А.В., ГАВРИЛКО А.И.\*

*Новосибирский Государственный Технический Университет, \*Калининская АЭС*

В статье рассматриваются особенности феррорезонансных процессов в электрических сетях, их негативное влияние на электрооборудование. Анализируются способы предотвращения феррорезонансных процессов.

### **Постановка задачи**

В сетях 6-35 кВ постоянно происходят процессы, которые отрицательно отражаются на работе трансформаторов напряжения (ТН) вне зависимости от вида их изоляции. По этой причине по данным [1] средний срок службы ТН типов НТМИ-6, НТМИ-10, ЗНОМ-20, ЗНОМ-35, ЗНОЛ.06-10, ЗНОЛЭ-35 и ЗНОЛ-35 часто не превышает 3-5 лет.

К основным процессам, отрицательно влияющим на работу электрооборудования, относятся феррорезонансные процессы, приводящие к появлению недопустимых токов в обмотке высшего напряжения ТН, и как следствие, выходу их из строя. Экономический ущерб от феррорезонансных процессов составляет сотни миллионов рублей. В некоторых ситуациях феррорезонансные процессы могут привести к ложным срабатываниям защиты от замыкания на землю. Эти процессы характерны для некомпенсированных сетей с изолированной нейтралью, хотя в некоторых случаях они возможны и при других режимах нейтрали электрической сети. Так как найти универсальный способ защиты ТН от возможных повреждений не удалось, был разработан антирезонансный трансформатор напряжения типа НАМИ, более устойчивый к дуговым замыканиям и феррорезонансным процессам. Опыт эксплуатации ТН типа НАМИ в действующих сетях подтвердил их более высокую надежность, однако, случаи повреждения имеются.

Не будем рассматривать физическую сущность феррорезонансных процессов, так как они достаточно подробно описаны во многих публикациях, например [2, 3]. Остановимся на некоторых особенностях феррорезонансных процессов.

### **Особенности феррорезонансных процессов**

Наибольшие кратности перенапряжений в распределительных сетях с изолированной нейтралью возникают в процессе однофазных дуговых замыканий на землю (ОДЗ). Поэтому опасные феррорезонансные колебания чаще всего сопровождают именно этот процесс, обусловленный смещением нейтрали сети. Условия существования опасных феррорезонансных колебаний чаще соблюдаются в сетях, имеющих небольшую протяженность, из-за относительно небольшой емкости этих сетей и большей вероятности возникновения резонансных условий в контурах, содержащих емкости сети и индуктивности намагничивания фаз ТН. В табл. 1 приведены максимальные токи в обмотках высшего напряжения ТН типа НТМИ при исследовании процесса, сопровождающего первое погасание дуги ( $R_N$  – сопротивление нейтрали сети,  $R_H$  – сопротивление резистора в открытом треугольнике ТН).

Вычислительные осциллограммы, иллюстрирующие устойчивый феррорезонанс и так называемый переходный феррорезонанс, при котором выполняются условия

возникновения феррорезонансных колебаний, но не выполняются условия их существования в стационарном режиме, приведены на рис. 1.

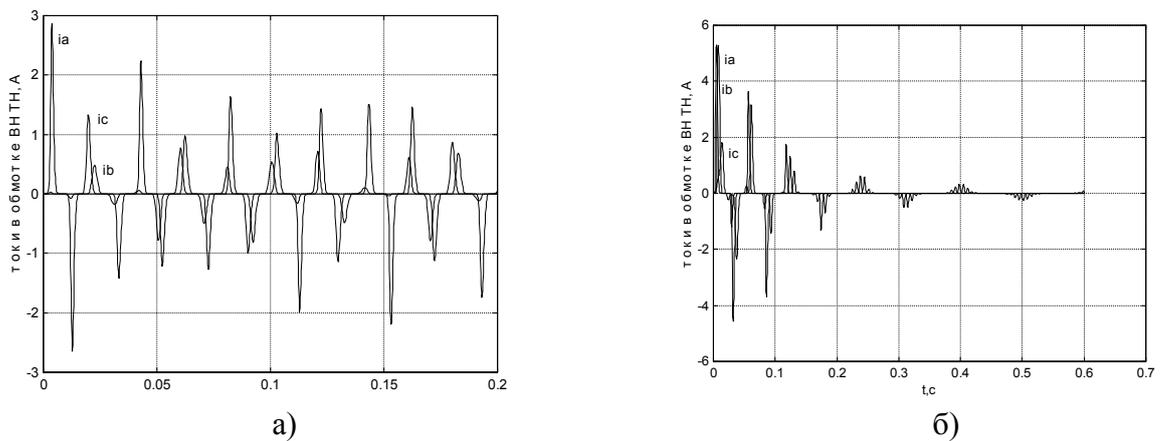


Рис. 1. Токи в обмотках ВН ТН типа НТМИ при изолированной нейтрали сети;  
а –  $C_\phi=0.1 \text{ мкФ}$ , б -  $C_\phi=1.7 \text{ мкФ}$ .

Таблица 1

Максимальные токи в обмотке ВН ТН типа НТМИ при первом погасании дуги в процессе ОДЗ в сетях 6 кВ

$l_{\text{ВЛ}}$ , км	$L_{\text{КЛ}}$ , км	$C_\Sigma=3C_\phi$ , мкФ	$I_{\text{ТНmax}}$ , А			
			$R_N \rightarrow \infty$ $R_H \rightarrow \infty$	$R_N \rightarrow \infty$ $R_H=25 \text{ Ом}$	$R_N=1/\omega C_\Sigma$ $R_H \rightarrow \infty$	$R_N=1/\omega C_\Sigma$ $R_H=25 \text{ Ом}$
8	0.1	0.1	<b>1.51</b>	0.25	0.33	0.04
24	0.3	0.3	<b>2.86</b>	1.62	0.51	0.20
40	0.5	0.5	3.66	2.60	0.58	0.32
80	1.0	1.0	4.28	3.93	0.66	0.46
240	3.0	3.0	5.07	4.78	0.96	0.85
400	5.0	5.0	5.29	5.18	1.11	1.01

Примечания:

1. Средние значения погонных фазных емкостей воздушных и кабельных линий приняты равными 0.004 и 0.32 мкФ/км, соответственно.

2. Выделены расчетные случаи, отвечающие устойчивому феррорезонансу

Из таблицы следует, что установившийся феррорезонанс наблюдается лишь при суммарной емкости трех фаз сети, не превосходящей величины порядка 0.3 мкФ. Кроме того, видно, что при резистивном заземлении нейтрали сети устойчивого феррорезонанса не наблюдается, при этом, чем больше емкость сети, тем менее эффективно (с точки зрения максимума тока в обмотке ВН ТН) оснащение дополнительной обмотки ТН резистором.

### Случай ложного срабатывания релейной защиты

1. При включении блока электрической станции со стороны обмотки высшего напряжения силового трансформатора, при отключенных генераторном выключателе и выключателях со стороны 6 кВ трансформатора собственных нужд (ТСН), срабатывало реле земляной защиты, включенное в рассечку обмотки трансформатора напряжения ТН типа ЗНОЛ-15, соединенной в открытый треугольник. После включения выключателей 6 кВ ТСН сигнал исчезал. Это было обусловлено появлением «ложной земли», которая сопоставлялась с феррорезонансными процессами, обусловленными насыщением магнитопроводов фаз ТН при включении ненагруженного силового трансформатора. Достаточно четко показаны вышеупомянутые явления на реальных

осциллограммах (рис.2), которые были зафиксированы на одной из атомных станций России в ремонтном режиме энергоблока 1000 МВт.

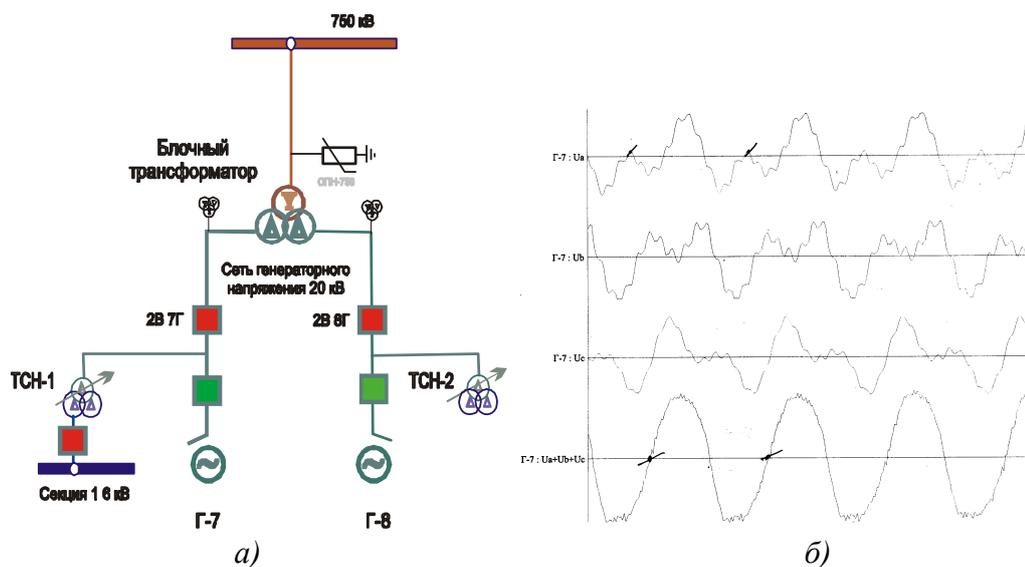


Рис.2 Схема сети (а) и осциллограммы напряжений в режиме подачи напряжения с секции 1 6 кВ через ТСН 1 и блочный трансформатор на ТСН 2 (б)

2. Несимметрия результирующих проводимостей фаз сети относительно земли, атмосферные явления, передача смещения нейтрали через емкости между обмотками понижающих трансформаторов могут быть причиной самопроизвольного смещения нейтрали фазных напряжений. В условиях самопроизвольного возрастающего смещения нейтрали токи в фазах ТН достигают больших значений, в десятки раз превышающих номинальные, что приводит к перегоранию предохранителей ТН или сгоранию их первичных обмоток. В этой связи сейчас проектными организациями часто практикуется к использованию решения, в которых ТН включаются на шины без защищающих их первичные обмотки предохранителей. **На наш взгляд, такие технические решения недопустимы, потому как в значительной степени уменьшают надежность энергоснабжения основных технологических потребителей любой электрической станции.**

Вследствие нелинейности индуктивностей намагничивания ТН токи намагничивания имеют сильно искаженную форму (рис. 2б). Поэтому иногда явления феррорезонанса наступают на половинной, двойной или тройной частоте. Скорость протекания феррорезонансных явлений и вероятность их появления в неповрежденных сетях с изолированной нейтралью *исключают возможность предотвращения этих опасных процессов с помощью средств релейной защиты.*

3. При возникновении однофазного замыкания (ОЗЗ) после его отключения в сеть генерируется ток нулевой последовательности, приводящий к ложному срабатыванию направленных защит от ОЗЗ.

### **Применение антирезонансных трансформаторов типа НАМИ**

В начале 80-х гг. был разработан и запущен в серийное производство антирезонансный трансформатор напряжения не вступающий в резонанс с емкостью сети [4 - 7]. В настоящее время такие трансформаторы изготавливаются, согласно [4], на классы напряжений 6, 10, 35, 110, 220 и 330 кВ.

На рис. 3 приведены вычислительные осциллограммы токов в обмотках ВН ТН типа НАМИ при малой емкости сети.

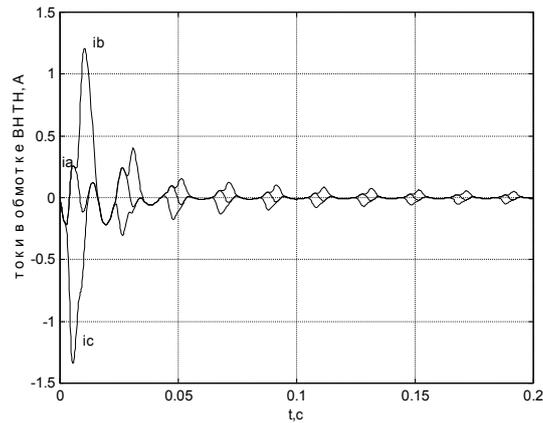


Рис. 3. Токи в обмотках ВН ТН типа НАМИ при изолированной нейтрали сети;  
 $C_{\phi}=0.1$  мкФ

Вычислительная осциллограмма процесса при оснащении сети генераторного напряжения антирезонансными трансформаторами типа НАМИ-15 при существенной несимметрии кривых намагничивания по фазам трехфазного трансформатора, входящего в состав НАМИ-15, приведена на рис. 4.

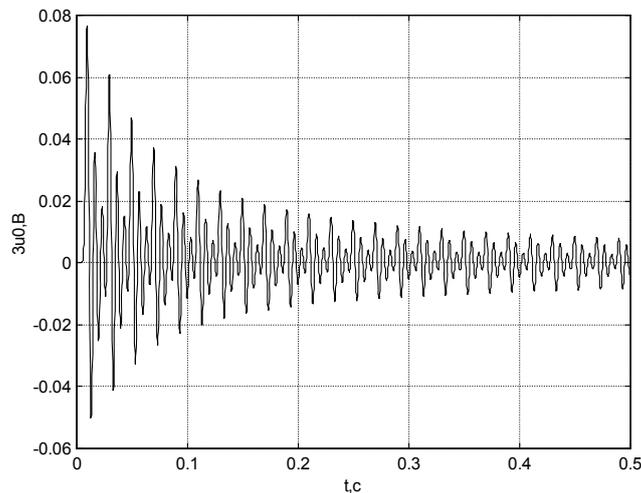


Рис. 4. Вычислительная осциллограмма процесса при включении блока, оснащенного ТН типа НАМИ, выключателем ВН

Из рис. 4 видно, что напряжение  $3U_0$  в этом случае существенно меньше уставки реле земляной защиты (15 В). Следовательно, при оснащении сети генераторного напряжения блоками трансформаторами типа НАМИ исключаются ложные срабатывания земляной защиты в рассматриваемой коммутации.

К сожалению, применение ТН типа НАМИ полностью не решает проблему, опасных последствий феррорезонансных процессов, поскольку [8, 9]:

- переходные процессы в сети с изолированной нейтралью, содержащей трансформаторы НАМИ-10, могут приводить к глубокому насыщению сердечника фазного ТН;
- ТН типа НАМИ не способен подавлять феррорезонансные колебания, вызванные резонансом емкости сети с нелинейной индуктивностью ТН ЗНОМ-35, установленной в той же сети, хотя и выдерживает без ограничения длительности такие подобные воздействия;
- наиболее тяжелым режимом для НАМИ при дуговых замыканиях является режим однополярной дуги, когда зажигание дуги происходит один раз в период промышленной частоты;

• причинами повреждения трансформаторов НАМИ-10 при длительных дуговых замыканиях в сети с изолированной нейтралью из-за нагрева первичной обмотки фазного трансформатора могут быть:

1. Разные напряжения зажигания дуги в положительную и отрицательную полуволну приложенного напряжения.
2. Возникновение режима горения дуги с гашением ее во втором периоде вынужденной составляющей тока замыкания на землю в сети с токами замыкания 5 А и более.

• в сетях с ТН типа НАМИ после отключения ОЗЗ также возникают феррорезонансные процессы, имеющие апериодический характер. При этом в сеть генерируется значительный ток нулевой последовательности, содержащий как промышленную, так и низкочастотную составляющую, что приводит к ложному срабатыванию устройств релейной защиты.

Следовательно, на сегодняшний день ТН типа НАМИ не способен полностью предотвратить опасные феррорезонансные процессы. Наиболее радикальным способом исключения феррорезонансных процессов является применение резистивного заземления нейтрали сети [10].

### ***Заключение***

1. Феррорезонансные процессы приводят к выходу из строя ТН, ложным срабатываниям устройств релейной защиты. Экономический ущерб от феррорезонансных процессов составляет сотни миллионов рублей.
2. Скорость протекания феррорезонансных процессов и вероятность их появления в неповрежденных сетях с изолированной нейтралью *исключают возможность предотвращения этих опасных процессов с помощью средств релейной защиты.*
3. Антирезонансные трансформаторы напряжения типа НАМИ могут повреждаться при феррорезонансных процессах.
4. Наиболее эффективным способом исключения феррорезонансных процессов является заземление нейтрали сети через не отключаемый резистор оптимальной величины сопротивления.

- 
1. *Нагорный П.Д., Назаров В.В.* Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6-35 кВ. Промышленная энергетика, 2002, №3, с.22-23.
  2. *Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А.* Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ. Новосибирск, Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та. – 1993.
  3. *Виштитбеев А.В., Кадомская К.П., Хныков В.А.* Повышение надежности эксплуатации сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ // Электрические станции, № 3, 2002. – С. 47-51.
  4. *Зихерман М.Х., Львов М.Ю.* Об антирезонансных индуктивных и емкостных трансформаторах напряжения // Энергетик. – 2002. - №9. С.25.
  5. *Зихерман М.Х., Несвижский Е.И., Рассолова И.Б., Федотов С.П.* Трансформатор напряжения повышенной надежности для сетей 6–10 кВ // Электрические станции. – 1990. – №6. – С. 64–71.
  6. *Левковский А.И.* Исследование переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в электрической сети 10 кВ с трансформатором напряжения НАМИ–10 // Электрические станции. – 1990. – № 10. – С. 79–81.
  7. *Зихерман М.Х., Левковский А.И.* Резонансные процессы в сетях 35 кВ с трансформаторами напряжения // Электрические станции. – 1996. – № 5. – С. 54–56.

8. *Богдан А.В., Калмыков В.В., Сафарбаков А.А.* Переходные процессы в электрической сети 10 кВ с трансформаторами НАМИ-10 // Электрические станции, №10, 1993. – С. 46-49.
9. *Сафарбаков А.А., Олейник С.И.* Узел блокировки срабатывания направленных защит от замыканий на землю при феррорезонансных процессах // Электрические станции, №2, 2001. – С. 64-66.
10. *Виштитбеев А.В.* Системный подход к заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения // Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». Тематичний випуск. VII Міжнародна конференція «Проблеми сучасної електротехніки», 7-10 червня 2004 р., Київ, Україна. У 7 частинах. Частина 4, с. 38-42.

## **ELEKTRİK ŞƏBƏKƏLƏRİNDƏ FERROREZONANS HADİSƏLƏRİNİN XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

**VİŞTİBEYEV A.V., QAVRILKO A.İ.**

Məqalədə elektrik şəbəkələrində ferrorezonans hadisələrinin xüsusiyyətlərinə və onun elektrik avadanlıqlarına mənfi təsirlərinə baxılmışdır. Ferrorrezonans proseslərindən mühafizə üsulları araşdırılmışdır.

## **FEATURES OF THE FERRORESONANT PHENOMENA IN ELECTRIC NETWORKS**

**WISHTIBEEVA.V., GAVRILKO A.I.**

In article features of ferroresonant phenomena in electric networks, their negative influence on power electric equipment are considered. Methods of prevention of ferroresonant phenomena are analyzed.