

УДК 621.316.1

**И. Ю. Смирных, А. П. Афанасьев****ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ 6—35 кВ**

В современном мире, на всех уровнях управления энергетикой большое внимание уделяется проблеме энергосбережения. Одной из актуальных тем в этой связи становится решение проблемы феррорезонансных явлений в сетях, содержащих измерительный трансформатор напряжения. Для того, чтобы снизить ущерб от феррорезонанса, выпускают различные антирезонансные трансформаторы напряжения. В данной статье рассматривается вопрос применения антирезонансных трансформаторов в сети 6—35 кВ, поскольку вид феррорезонанса напрямую связан с видом заземления нейтрали.

*Ключевые слова:* феррорезонансные явления, измерительный трансформатор напряжения, ферромагнитный элемент, трёхстержневой магнитопрод.

**Введение**

В 1907 году учёный Джозеф Бетено опубликовал статью «О резонансах в электромагнитных трансформаторах», где он однажды заострил внимание на таком явлении, как феррорезонанс.

Определение «феррорезонанс» через 13 лет использовал также французский учёный и преподаватель электротехники Пауль Бушере в своей статье 1920 года «Существование двух режимов феррорезонанса».

В цепях, имеющих катушку с сердечником из стали и конденсаторов, явления резонанса, связанные с нелинейным характером индуктивности, именуют феррорезонансными. Скачкообразное изменение тока сопровождается изменением на  $180^\circ$  фазы тока по отношению к напряжению (опрокидывание фаз).

Любое оборудование, имеющее катушку с ферромагнитным сердечником, называют ферромагнитным элементом. В электрических сетях к ним относятся: трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, реакторы, силовые трансформаторы тока, электродвигатели. Особенностью катушки с сердечником ферромагнитным является нелинейная зависимость тока от напряжения. Во время воздействия на ферромагнитный компонент, приводящего к насыщению сердечника, проис-

---

**Смирных Игорь Юрьевич** — магистрант 2 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан).

**Афанасьев Александр Петрович** — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

© Смирных И. Ю., Афанасьев А. П., 2018

ходит постепенное изменение индуктивности этого компонента, что даёт возможность образования резонанса между индуктивностью и ёмкостью. Каждый год в электросетях 6–35 кВ вследствие феррорезонансных явлений выходят из строя примерно 6–8 % трансформаторов напряжения из-за длительного протекания в первичной обмотке трансформатора напряжения токов, формат которых намного превышает максимально возможный по условию тепловой устойчивости изоляции обмотки.

Электроустановки 6–35 кВ в РФ обычно работают с изолированной нейтралью, при этом нейтраль трансформатора напряжения должна быть заземлена. Феррорезонансные явления в этих сетях могут развиваться только в нулевом канале, при этом одновременно резонирует полностью вся сеть. В случае с нарушением изоляции фаз сети возникает абсолютное или неполное замыкание фазы на землю и на соответствующих выводах трансформатора напряжения появляется напряжение контрольного показателя. Оно создаётся напряжениями нулевой последовательности  $U_0$ , возникающими в фазах трансформатора напряжения. Это напряжение вызывает ток нулевой последовательности, и он замыкается по заземляющему проводу трансформатора напряжения через ёмкости линейных проводов относительно земли и далее по обмоткам трансформатора напряжения. При определённых соотношениях параметров нелинейной индуктивности трансформатора напряжения и ёмкости линейных проводов в этом контуре возникает феррорезонанс, приводящий к многократному увеличению тока контура и фазных напряжений сети, при этом междуфазные напряжения остаются без изменений. Рассматриваемый процесс приводит к выходу из строя трансформатора, повреждению изоляции сети и возникновению аварий.

Высокая степень повреждаемости заземлённых трансформаторов напряжения обуславливает переход к антирезонансным трансформаторам напряжения, которые должны не только сохранить функциональность предшествующих трансформаторов, но и выполнять новые задачи и требования.

Антирезонансные трансформаторы напряжения, предназначенные для работы в сетях 6–35 кВ, должны отвечать следующим требованиям:

- не вызывать феррорезонанса;
- не выходить из строя при долгих замыканиях электросети на землю через перемежающуюся дугу;
- не выходить из строя при устойчивом феррорезонансе ёмкости сети с нелинейной индуктивностью остальных трансформаторов.

Конвейерный выпуск электромагнитных антирезонансных трансформаторов напряжения в РФ зародился примерно 20 лет назад с изобретением трёхфазного трансформатора напряжения с масляным охлаждением НАМИ-10-У2. С того момента выбор антирезонансных трансформаторов напряжения 3–35 кВ намного увеличился. На данный момент отечественная промышленность производит антирезонансные трансформаторы следующих типов:

---

- ЗНОЛ, ЗНОЛП;
- НАМИ, НТМИ;
- НАМИТ;
- НАЛИ-СЭЩ.

Нужные характеристики всех этих перечисленных трансформаторов напряжения появляются из-за подключения между нейтральной точкой соединения обмотки и земли ещё одного дополнительного трансформатора нулевой последовательности (ТНП) или большого активного сопротивления.

Для примера рассмотрим конструкцию антирезонансного трансформатора типа НАМИ и НТМИ. Оба типа имеют в одном корпусе два трансформатора – трёхфазный и однофазный. На рисунке 1 представлена схема соединения обмоток. Отличие от традиционных трансформаторов напряжения в том, что рассматриваемые трансформаторы включают в свою конструкцию трёхстержневой магнитопровод. Для измерения  $3U_0$  задействован ещё один трансформатор в нейтрали обмоток высокого напряжения, который превращается в разновидность балластного сопротивления. Кроме того, в трансформаторе имеется замкнутая коротко ещё одна компенсационная обмотка.

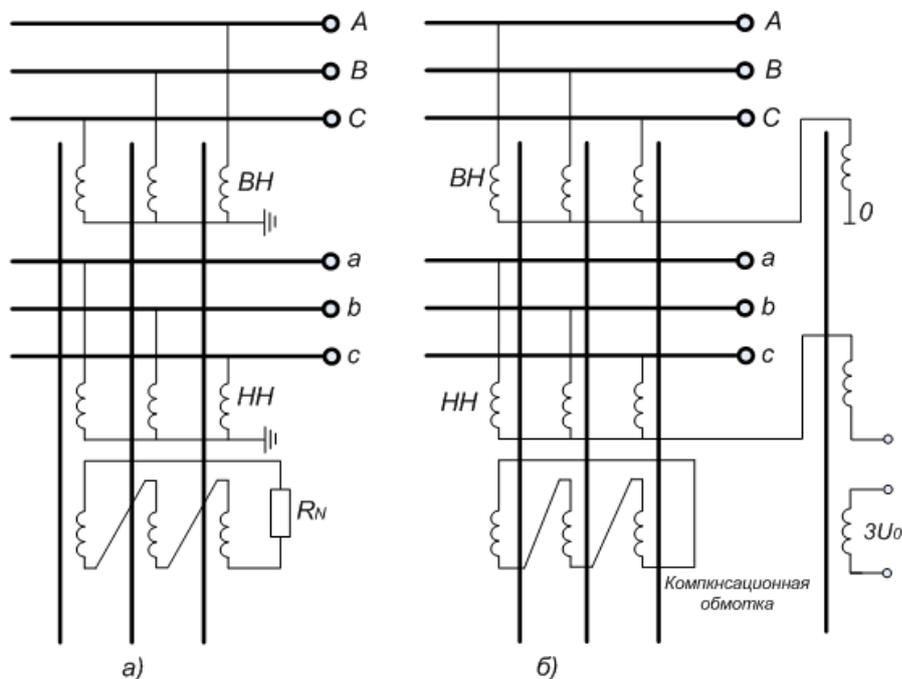


Рис. 1. Схемы соединения обмоток трансформатора напряжения типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Антирезонансные свойства трансформатора напряжения обусловлены трёхстержневой конструкцией магнитопровода, потому что магнитный поток нулевой последовательности должен замыкаться по воздуху и корпусу трансформатора напряжения. При этом индуктивность нулевой последовательности трансформатора напряжения очень маленькая и линейная. На рисунке 2 приведена схема контура нулевой последовательности электросети с трансформатором напряжения типа НАМИ.

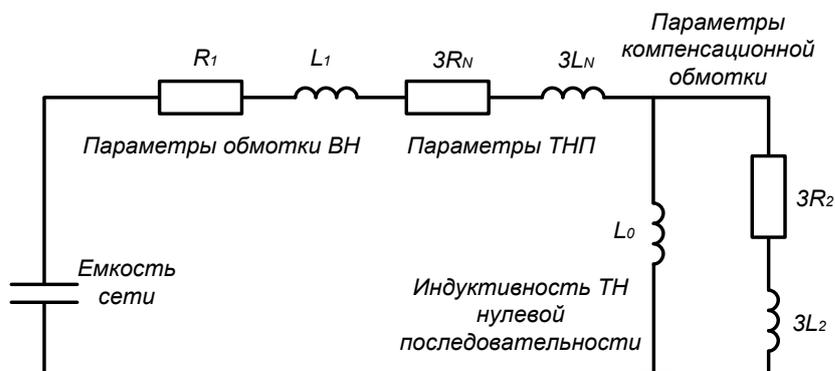


Рис. 2. Схема нулевой последовательности электросети с изолированной нейтралью и трансформатором напряжения типа НАМИ

Так как нелинейные элементы в контуре нулевой последовательности отсутствуют, невозможно возникновение в этом контуре устойчивого колебательного процесса — феррорезонанса.

В практике отмечается достаточно высокая степень устойчивости трансформатора напряжения типа НАМИ к перемежающимся дуговым замыканиям, это обуславливается свойствами дополнительного трансформатора нулевой последовательности, который имеет очень большое реактивное сопротивление (порядка 300...600 кОм) и практически линейную характеристику намагничивания. К полюсам трансформатора напряжения такого типа относится также абсолютная «пассивность» конструкции, т. е. отсутствие каких бы то ни было релейных устройств, нужных для работы антирезонансного трансформатора тока.

Конкретным примером также могут быть исследования процессов, сопровождающих ОДЗ на одной из секций сети собственных нужд 6 кВ ТЭЦ. На рисунке 3 приведены компьютерные осциллограммы токов в обмотке высокого напряжения трансформатора напряжения при установке на секции трансформатора типа НТМИ (а) и НАМИ (б). Из данных осциллограмм следует, что при установке на секции трансформатора напряжения типа НТМИ наблюдается установившийся феррорезонанс, причём токи в обмотке высокого напряжения трансформатора превышают нужный уровень. При установке же трансформатора на

пряжения типа НАМИ условия существования феррорезонанса не возникают из-за того, что компенсационная обмотка шунтирует нелинейную индуктивность трансформатора напряжения в контуре нулевой последовательности.

Из схемы нулевой последовательности (рисунок 2) видно, что нелинейная индуктивность шунтируется компенсационной обмоткой, которая обладает малым активным сопротивлением и индуктивностью. При появлении на ёмкости напряжения нулевой последовательности (при ОДЗ) ёмкость разряжается через компенсационную обмотку. При этом в фазах трансформатора возникает характерный затухающий колебательный процесс (рисунок 3 б). Токи в фазах трансформатора практически одинаковые, так как на токи его намагничивания накладывается большой ток нулевой последовательности. Увеличение числа трансформаторов напряжения типа НАМИ приведёт к увеличению мощности шунта намагничивания нулевой последовательности, но также уменьшится и эквивалентное сопротивление компенсационной обмотки. Таким образом, возникновение феррорезонанса в трансформаторах типа НАМИ полностью исключается даже при параллельной работе нескольких.

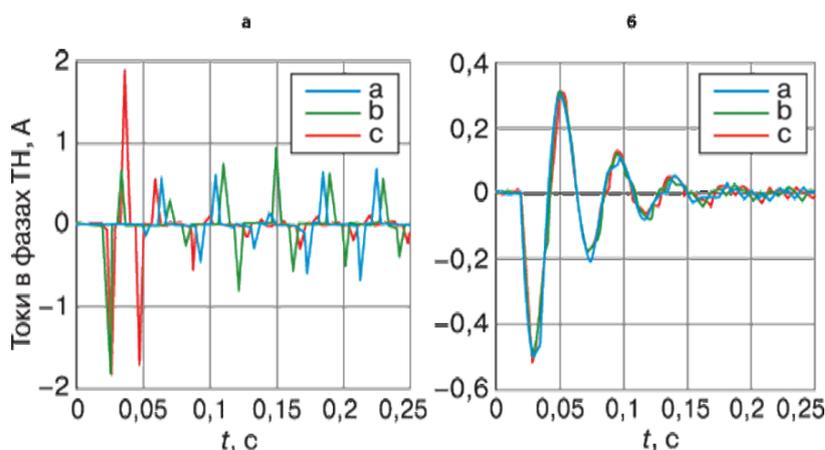


Рис. 3. Токи в фазах обмотки высокого напряжения трансформатора напряжения при ОДЗ на секции ССН 6 кВ ТЭЦ (3 Сф = 3 мкФ) типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Кроме масляных трансформаторов напряжения, отечественной промышленностью также производится литая трёхфазная группа трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ напряжением 6–10 кВ. Антирезонансные свойства приобретаются за счёт дополнительного резистора с сопротивлением 800–1000 Ом, в нейтрали первичной обмотки. Литая изоляция данных трансформаторов существенно меняет качество изделия в лучшую сторону, однако из-за несовершенства схемы соединения обмоток эти трансформаторы оказались недостаточно надёжными.

Однако в процессе эксплуатации были выявлены и недостатки рассматриваемых трансформаторов напряжения. Одним из них является то, что эти трансформаторы подвержены явлению «ложной земли» в сетях с очень малой ёмкостью на землю. Существенным недостатком трансформатора напряжения типа НАМИ также является укрытая в корпусе компенсационная обмотка, отсутствие доступа к ней не позволяет осуществлять контроль состояния её изоляции. К минусам можно также отнести масляную изоляцию трансформатора напряжения, что ограничивает область их применения.

### Заключение

Использование антирезонансных трансформаторов напряжения в электросетях с изолированной нейтралью позволяет существенно повысить энергоэффективность и уменьшить затраты, связанные с повреждаемостью обычных трансформаторов напряжения от феррорезонансных явлений. Но, к сожалению, решить проблему полностью, связанную с процессами в электромагнитных трансформаторах тока в этих сетях, пока не удаётся.

Нужно объединить все хорошие качества всех производимых антирезонансных трансформаторов тока в одну единую конструкцию и разработать пожаробезопасные цельнолитые антирезонансные трансформаторы напряжением 3–35 кВ. Изобретая новые трансформаторы напряжения, нужно получить длительную устойчивость всей их конструкции ко всем видам феррорезонанса, от которых повреждаются простые трансформаторы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянцеv Ю. А. Феррорезонансные процессы без замыкания на землю в электросетях 6–35 кВ [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. 2009. № 4 (58). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/07.php>
2. Зихерман М. Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Перспективы развития [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2 (44). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/14.php>
3. Кадомская К. П., Лаптеv О. И. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. 2006. № 6 (42). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/11.php>
4. Школа для электрика: сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://electricalschool.info/>

\* \* \*

**Smirnych Igor Y., Afanasyev Alexander P.**  
**EFFICIENCY OF APPLICATION OF ANTIRESONANT**  
**VOLTAGE TRANSFORMES IN THE 6—35 kV NETWORK**  
(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

In today's world, at all levels of energy management, much attention is paid to the problem of energy conservation. One of their actual topics, in this connection, is the solution of the problem of ferro-resonance phenomena in networks containing a voltage measuring transformer. In order to reduce the damage from ferro-resonance, various antiresonant TN are produced. This article

discusses the use of antiresonant TN in the 6—35 kV network, since the form of ferro-resonance is directly related to the type of grounding of the neutral.

*Keywords:* Ferro-resonance phenomena, measuring voltage transformer, ferromagnetic element, three-rod magnetic circuit.

#### REFERENCES

1. Emel'yantsev Yu. A. Ferro-resonance processes without earth fault in 6-35 kV electric networks [Ferrorezonansnye protsessy bez zamykaniya na zemlyu v elektrosetyakh 6—35 kV], *Novosti ElektroTekhniki*, 2009, no. 4 (58), Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/07.php>
2. Zikherman M. Kh. Antiresonant voltage transformers. Prospects of development [Antirezonansnye transformatory napryazheniya. Perspektivy razvitiya], *Novosti ElektroTekhniki*, 2007, no. 2 (44), Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/14.php>
3. Kadomskaya K. P., Laptev O. I. Anti-resonance voltage transformers. Efficiency of application [Antirezonansnye transformatory napryazheniya. Effektivnost' primeneniya], *Novosti ElektroTekhniki*, 2006, no. 6 (42), Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/11.php>
4. *Shkola dlya elektriika* (School for an electrician), Available at: <http://electricalschool.info/>

\* \* \*