

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.011

## СПОСОБ МОНИТОРИНГА ГЕОИНДУЦИРОВАННОГО ТОКА И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина\*, А.Н. Черненко, Д.А. Кретов, О.В. Федяй, Р.Н. Пудовинников

*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

\*E-mail: [VVVahkina@yandex.ru](mailto:VVVahkina@yandex.ru)

**Аннотация.** Разработан способ мониторинга геоиндуцированного тока (ГИТ) в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления через параллельно соединенные токоограничивающий резистор и тиристорный ключ с двухпозиционным гистерезисным управлением состояний «включен-выключен», который обеспечивает исходное состояние «включен» тиристорного ключа подачей управляющих импульсов, контролирует ток нейтрали датчиком тока на эффекте Холла, фиксирует появление геоиндуцированного тока фильтром нижних частот, шестой гармоники тока намагничивания полосовым фильтром и прекращает подачу управляющих импульсов, переводя тиристорный ключ в состояние «выключен». Предложены количественные критерии, позволяющие выбирать сопротивление заземляющего резистора, обеспечивающее ограничение ГИТ до безопасного для силового трансформатора уровня, не вызывающее насыщение магнитной системы. Показано, что фототиристоры с интегрированной в кремниевую структуру внутренней самозащитой от пробоя при прямых перенапряжениях и силовые кремниевые резисторы в качестве силовых компонентов позволяют реализовать разработанный способ мониторинга геоиндуцированного тока в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления без дополнительного электрооборудования. Определен ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной системы мониторинга ГИТ.

### Введение

Эффективно защитить электроэнергетические системы (ЭЭС) от повышенной геомагнитной активности возможно предотвратив протекание геоиндуцированных токов через нейтрали силовых трансформаторов, в первую очередь блочных трансформаторов электростанций и трансформаторов тупиковых подстанций. Для этого, например, за рубежом используются так называемые «блокираторы», которые на время повышенной геомагнитной активности разземляют нейтрали силовых трансформаторов [1]. В нашей стране включение резистора (5 – 10) Ом в нейтраль силовых трансформаторов (СТ) практикуют для ограничения токов однофазных коротких замыканий (КЗ) [2]. Допускается даже частичное разземление нейтралей силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и 220 кВ, но с обязательным требованием защиты разземленной нейтрали ограничителем перенапряжения с допустимым рабочим напряжением частоты 50 Гц не более 0,6 фазного напряжения [3]. В любом случае не должно нарушаться условие эффективности заземления нейтрали, которое определяется величиной коэффициента заземления

$$K_3 = \frac{U_{\text{ф.з.}}}{U_{\text{ном}}} \leq 0,8, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ф.з.}}$  – напряжение на неповрежденной фазе при однофазном КЗ;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение электрической сети.

Соотношение (1) показывает, что включение заземляющего резистора не нарушает эффективности заземления нейтрали, если напряжение на неповрежденной фазе при однофазном КЗ на землю не превышает 80% линейного (или 1,4 фазного) номинального напряжения. Повышение напряжения на неповрежденной фазе обусловлено скачком напряжения на нейтрал силового трансформатора

$$U_N = k_{\text{уд}} \cdot (R + r_{\text{з}}) \cdot I_{\text{КЗ}}^{(1)},$$

величина которого максимальна при «близком» КЗ

$$U_{Nmax} = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{уд} \cdot U_{ном} \cdot (R + r_{зз})}{x_T}, \quad (2)$$

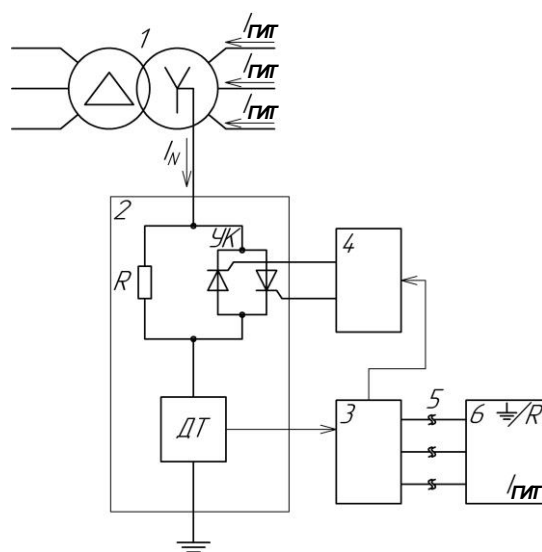
где  $I_{кз}^{(1)}$  – периодическая составляющая тока однофазного КЗ;  $k_{уд}$  – ударный коэффициент тока короткого замыкания;  $x_T$  – индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания СТ;  $r_{зз}$  – сопротивление заземляющего устройства.

Сопротивление заземляющего устройства  $r_{зз}$  не должно превышать 0,5 Ом в любое время года [4], а напряжение на заземляющем устройстве при стекании тока КЗ на землю не должно, как правило, превышать 10 кВ. Напряжение выше 10 кВ допускается на заземляющих устройствах, с которых исключен вынос потенциалов за пределы зданий и внешних ограждений электроустановок [5].

В данной статье рассматривается разработанный в Тольяттинском государственном университете способ мониторинга ГИТ и управления режимом заземления нейтрали силового трансформатора, который учитывает указанные выше ограничения и может быть рекомендован к практическому использованию на силовых трансформаторах номинальной мощностью свыше (80-100) МВА электростанций и подстанций ЭЭС, расположенных в районах с повышенной геомагнитной активностью [6]. В разработанном способе фиксируется появление ГИТ фильтром низких частот, а также ведется идентификация текущего состояния магнитной системы силового трансформатора по 6-й гармонике тока намагничивания полосовым фильтром и по интерфейсам «токовая петля» осуществляется передача в диспетчерский пункт логического сигнала о режиме заземления нейтрали СТ.

### Блок-схема и принцип работы разработанного устройства

На рисунке 1 изображена блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ.



**Рисунок 1.** Блок-схема разработанного способа мониторинга геоиндуцированного тока и управления режимом заземления нейтрали силового трансформатора. 1 – силовой трансформатор, 2 – силовой блок, 3 – канал мониторинга тока в нейтрали, 4 – блок управления режимом заземления нейтрали, 5 – линии интерфейсов «токовая петля», 6 – диспетчерский пункт.

В нейтраль обмоток высокого напряжения силового трансформатора 1 включен силовой блок 2, в состав которого входят токоограничивающий резистор  $R$  и управляемый ключ УК, соединённые между собой параллельно. Управляемый ключ УК образован встречно-параллельно соединёнными силовыми тиристорами. В нейтрали силового трансформатора 1 для мониторинга ГИТ установлен датчик тока ДТ на эффекте Холла. Сигнал тока нейтрали, получаемый от ДТ, после обработки в канале мониторинга тока нейтрали 3 поступает на вход блока управления режимом заземления нейтрали 4. Проводные линии интерфейсов «токовая петля» 5 служат для связи канала мониторинга 3 с диспетчерским пунктом 6.

В исходном состоянии, когда в нейтрали силового трансформатора 1 отсутствует ГИТ, силовой блок 2 обеспечивает режим глухозаземленной нейтрали силового трансформатора 1. При появлении ГИТ в нейтрали силового трансформатора и при выполнении условия

$$I_{\text{ГИТ}(\perp)} > I_{\text{уст.ср.}} \quad (3)$$

когда магнитная система силового трансформатора 1 будет находиться в состоянии насыщения, блок управления режимом заземления нейтрали 4 подает сигнал на выключение УК, который прекращает шунтирование токоограничивающего резистора  $R$ , и силовой блок 2 переводится в режим резистивного заземления нейтрали силового трансформатора 1. В выражении (3)  $I_{\text{уст.ср.}}$  – уставка срабатывания устройства, которая выбирается из условия:

$$I_{\text{уст.ср.}} = \sqrt{2} \cdot I_x \quad (4)$$

где  $I_x$  – действующее значение паспортного тока силового трансформатора 1, выраженное в именованных единицах.

Выбор условия (4) связан с тем, что для силовых трансформаторов с броневой и бронестержневой магнитной системой при воздействии ГИТ, удовлетворяющего условию (3), т.е. при превышении амплитудного значения тока холостого хода, характеристика намагничивания холоднокатанной электротехнической стали будет смещаться в область технического насыщения.

Наиболее характерным индикатором насыщения магнитной системы СТ служат четные гармоники тока, из которых наиболее значимыми являются 2, 4 и 6. Однако 2 и 4 гармоники тока намагничивания в нейтрали силового трансформатора 2 не протекают. В нейтрали силового трансформатора 1 протекают гармоники нулевой последовательности. В результате в периоды геомагнитных возмущений и при одностороннем насыщении магнитной системы в нейтрали СТ 1 протекает ток:

$$I_{(N)} = 3 \cdot (I_{\text{ГИТ}(\perp)} + \sum_{n=3k}^{\infty} I_{\mu(n)}), \quad (5)$$

где  $I_{\mu(n)}$  – амплитуда гармоник тока нулевой последовательности ( $k=1,2,3,\dots$ ).

Формирование сигнала «Пуск» на выключение УК – перевода силового блока 2 переводится в режим резистивного заземления нейтрали силового трансформатора 1 осуществляется по совпадению условий – увеличению до заданных значений  $I_{\text{ГИТ}(\perp)}$  и  $I_{\mu(6)}$ .

### Оценка величины сопротивления заземляющего резистора

Показателем эффективности резистивного заземления нейтрали в части ограничения ГИТ является отношение

$$\frac{I_{\text{ГИТ}(R)}}{I_{\text{ГИТ}(\perp)}} = \frac{r_{\Sigma}}{r_{\Sigma} + R} = \frac{1}{1 + R^*}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{ГИТ}(R)}$  – величина ГИТ при резистивном заземлении нейтрали силового трансформатора 1;  $I_{\text{ГИТ}(\perp)}$  – величина ГИТ при глухозаземленной нейтрали силового трансформатора 1;  $R$  – сопротивление заземляющего резистора;  $r_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление обмоток высокого напряжения силового трансформатора 1, фазных проводов примыкающих ЛЭП, заземляющего устройства;  $R^* = R/r_{\Sigma}$  – относительная величина сопротивления заземляющего резистора.

В общем случае, как следует из (6), уже при  $R^* \geq (3 - 4)$  достигается вполне приемлемый эффект ограничения ГИТ с помощью резистивного заземления нейтрали – более 80%. Величина ГИТ в режиме резистивного заземления нейтрали должна уменьшаться заземляющим резистором  $R$  до значения, близкого к амплитуде паспортного тока холостого хода силового трансформатора 1 и определяемого соотношением

$$I_{\text{ГИТ}(R)} \cong \sqrt{2} \cdot I_x = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot \frac{I_{x\%}}{100}, \quad (7)$$

где  $I_{x\%}$  – паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора 1, выраженное в процентах.

### Силовые компоненты и сервисные функции устройства

В составе управляемого ключа УК наиболее удобно использовать фототиристоры типа ТФ производства ОАО «Электровыпрямитель» [7], а в составе заземляющего резистора силовые кремниевые резисторы типа РК [8], основные параметры которых представлены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Выбранные приборы имеют таблеточную конструкцию, наиболее удобную для изготовления высоковольтных конструкций на любое необходимое напряжение, определяемое выражением (2), путем последовательного соединения нескольких приборов. Основная особенность фототиристоров типа ТФ заключается в том, что в кремниевую структуру интегрирована защита от пробоя при прямых

перенапряжениях, которая формирует внутренний сигнал управления и включает фототиристор при увеличении прямого напряжения до уровня 6500 В (таблица 1). Если в составе управляемого ключа используются по одному встречно-параллельно соединенному фототиристорам, то амплитуда напряжения на заземляющем резисторе и нейтрали силового трансформатора не превысит 6,5 кВ.

**Таблица 1.** Основные характеристики фототиристоров [7].

Параметр	Значение		
	ТФ353-600	ТФ173-1000	ТФ183-2000
Напряжение переключения, В	6500	6500	6500
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	7000	7000	7000
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса 70°C, А	773	1406	2268
Ударный ток в открытом состоянии, кА	12	24	40
Оптическая мощность управления, мВт	40	40	40

**Таблица 2.** Основные характеристики силовых кремниевых резисторов [8].

Параметр	Значение		
	РК143	РК173	РК273
Диаметр корпуса, мм	58	105	105
Диапазон номинальных сопротивлений, Ом	0,39-24	0,15-56	0,22-1,6
Отклонение от номинального сопротивления, %	±5	±5	±5
Номинальная мощность рассеяния, Вт	1000	4000	6000
Тип воздушного охладителя	0143-150	0173-150	0173-150

Кроме того, ударный ток в открытом состоянии фототиристоров значительно превышает амплитуду периодической составляющей тока «близких» КЗ, которая находится в диапазоне (1,42 – 25,4) кА для широкой номенклатуры силовых трансформаторов номинальной мощностью (40 – 1250) МВА и номинальным напряжением (110 – 500) кВ. Учитывая, что через каждый фототиристор будут протекать полуволны тока КЗ только одной полярности, управляемый ключ УК при выборе конкретного типа фототиристоров с учетом номинальной мощности силового трансформатора вполне способен выдержать протекание тока однофазного КЗ в течение (4 – 5) периодов.

В разработанном способе мониторинга ГИТ в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления для удобства работы персонала предусмотрена дополнительная визуальная индикация «светофорного» вида: «зеленый» – ГИТ в нейтрали защищаемого трансформатора отсутствует, «желтый» – ГИТ недостаточно большой для насыщения магнитной системы; «красный» – ГИТ вызывает насыщение магнитной системы силового трансформатора.

### **Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной системы мониторинга ГИТ**

Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанного устройства по предварительной оценке, например, при единичном использовании в случае предотвращения катастрофических повреждений от воздействия ГИТ, требующих замены силового трансформатора, определяется стоимостью работ по замене силового трансформатора, стоимостью силового трансформатора и стоимостью средств, потерянных из-за недоотпуска электрической энергии (определяется типом трансформатора и, например, для силового трансформатора типа ТДЦ-125000/220 составит примерно (1682,46 – 4740,55) млн. руб., срок изготовления

силового трансформатора составляет примерно 11 месяцев); в случае проведения ремонтных работ – определяется стоимостью работ по ремонту силового трансформатора (например, при повреждении обмоток силового трансформатора типа ТДЦ-125000/220 составит  $\approx 3,27$  млн. руб.).

### **Заключение**

В разработанном способе мониторинга геоиндуцированного тока в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления фиксируется появление ГИТ, а также ведется идентификация текущего состояния магнитной системы силового трансформатора по 6-й гармонике тока и по интерфейсам «токовая петля» осуществляется передача в диспетчерский пункт логического сигнала о режиме заземления нейтрали силового трансформатора.

Применение заземляющего резистора позволит ограничивать величину ГИТ до безопасного для силового трансформатора уровня, определяемого паспортным значением тока холостого хода силового трансформатора, а управляемого тиристорного ключа – автоматический переход в режим резистивного заземления при насыщении магнитной системы под воздействием ГИТ и возврат в режим глухозаземленной нейтрали при снижении геомагнитной активности и обеспечивать выполнение требования эффективности заземления при однофазных коротких замыканиях.

Использование в составе шунтирующего тиристорного ключа мощных фототиристоры с интегрированной в кремниевую структуру внутренней самозащитой от пробоя при прямых перенапряжениях, а в составе заземляющего резистора силовых кремниевых резисторов позволят реализовать силовой блок устройства в едином конструктиве, с единой системой воздушного охлаждения и без дополнительного электрооборудования.

### **Список литературы**

1. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Зюзин М.О. Сравнительный анализ способов защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения от воздействия геоиндуцированных токов // Промышленная энергетика. – 2014. – №8. – С.30-35.
2. Мозгалев К.В., Неклепаев Б.Н., Шунтов А.В. Об эффективности заземления нейтралей автотрансформаторов через реактор или резистор // Электричество. – 2004. – №1. – С. 32-39.
3. СТО 56947007-29.240.01.221-2016 Руководство по защите электрических сетей напряжением 110-750 кВ от грозных и внутренних перенапряжений. ПАО «ФСК ЕЭС», 2016.
4. Правила устройства электроустановок. С.Пб.: Энергоатомиздат, 2003.
5. ГОСТ Р 58882-2020 Заземляющие устройства. Системы выравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. Технические требования.
6. Патент РФ 2660481 МКИ Н02Н 9/08 Способ управления режимом заземления нейтрали силового трансформатора // А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко. – Заявлено 26.07.2017. Оpubл. 06.07.2018. Бюл. №19.
7. Конохов А.В., Веселова И.М., Мартыненко В.А., Халугин А.А., Гришанин А.В. Отечественные высоковольтные мощные фототиристоры с интегрированной самозащитой от пробоя // Электричество. – 2011. – №10. – С.5-11.
8. Куландин Р., Новотный С. Электронные компоненты для силовой электроники от ХКОАО «НЭВЗ-Союз» // Силовая электроника. – 2009. – №2. – С.20-21.