

Чувствительная защита от замыканий на землю на трансформаторе тока нулевой последовательности

А.Н. НОВОЖИЛОВ, Д.А. КУДАБАЕВ

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова
Казахстан

К.И. НИКИТИН, Д.А., Т.А. НОВОЖИЛОВ

Омский государственный технический университет
Россия

novozhilova_on@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Защита от замыканий на землю, геркон, трансформатор нулевой последовательности, постоянный магнит.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно в качестве защиты от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях с изолированной нейтралью используют трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) типа ТЗЛ или ТЗРЛ и чувствительный реагирующий орган. Как правило, это специальное и довольно дорогое реле. Снизить цену защиты от ОЗЗ можно, если ТТНП с таким реле заменить на ТТНП с герконом [1,2].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конструкция ТТНП с герконом [2] приведена на рисунке 1. Ее основой является кольцеобразный ферромагнитный магнитопровод 1 с поперечным воздушным зазором 2, перпендикулярным ему тангенциальным сквозным отверстием 3 и радиальным несквозным отверстием 4, ось 5 вращения которого проходит вдоль середины поперечного зазора. В тангенциальном отверстии закрепляют геркон 6, так чтобы воздушный зазор его контактов совпадал с серединой поперечного зазора 2. В радиальном отверстии на винте 7 устанавливается постоянный магнит 8, который можно поворачивать на угол γ вокруг оси 5 на винте 7 и перемещать вдоль нее. Шкала 9 с делениями прикрепляется к стойке 10, а стрелка 11 – к винту 7. Эти элементы конструкции служат для оценки угла γ поворота постоянного магнита 5 по отношению к продольной оси геркона 6. Контакты геркона 4 подключают к цепи отключения выключателя.

В кабельной сети с изолированной нейтралью всегда

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_K,$$

где $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ - токи в проводниках фаз кабеля; $\dot{I}_K$ - ток ОЗЗ.

Для удобства рассмотрения работы такого устройства защиты три проводника фаз кабеля с токами $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ заменяются одним в центре окна ТТНП с током $\dot{I}_K$. В результате напряженность магнитного поля H_Γ в воздушном зазоре геркона будет складываться из напряженности магнитного поля H_K от проводника с током I_K и напряженности магнитного поля H_Π постоянного магнита. Причем в произвольный момент времени первая зависит от мгновенного значения I_K , а вторая в соответствии с рисунком 2 от угла γ поворота магнита. С учетом этого

$$H_\Gamma = H_K + H_\Pi = H_{mK} \sin \omega t + H_{m\Pi} \cos \gamma, \quad (1)$$

где H_{mk} - амплитудное значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре геркона от тока I_k ; H_{mm} - напряженность магнитного поля постоянного магнита на его продольной оси.

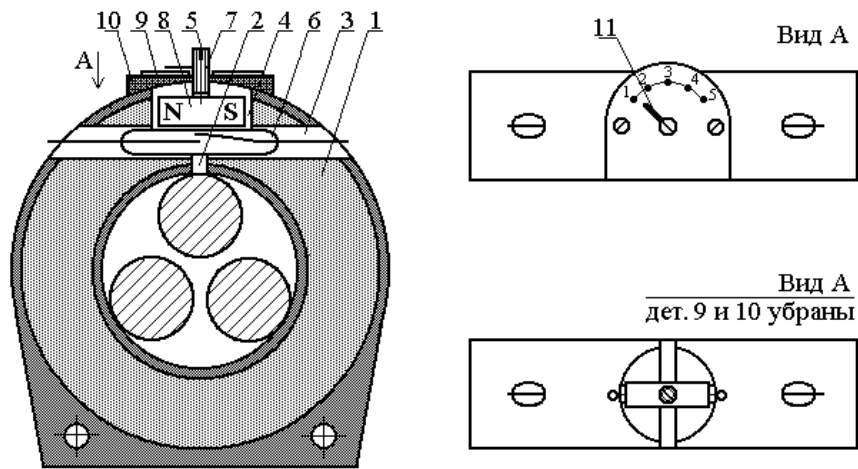


Рис.1: Устройство защиты от ОЗЗ на трансформаторе тока ТЗЛ-10 с герконом.

Известно, что напряженность магнитного поля срабатывания H_{cp} и возврата $H_{воз}$ герконов даже в одной выпускаемой партии колеблется в довольно широких пределах. При реализации устройства защиты эти параметры контролируются по токам I_{cp} и $I_{воз}$ в катушке геркона с числом витков $w_{кг}$, диаметром $d_{кг}$ и длиной $h_{кг}$ в момент замыкания и размыкания контактов геркона. По этим данным с учетом рисунка 3 и [3,4] на оси катушки напряженность магнитного поля срабатывания геркона

$$H_{cp} = \frac{I_{cp} w_{кг}}{2h_{кг}} \left(\frac{x}{r_1} + \frac{h_{кг} - x}{r_2} \right), \quad (2)$$

где с учетом рисунка 3 $r_1 = \sqrt{(d_{кг}/2)^2 + x^2}$ и $r_2 = \sqrt{(d_{кг}/2)^2 + (h_{кг} - x)^2}$.

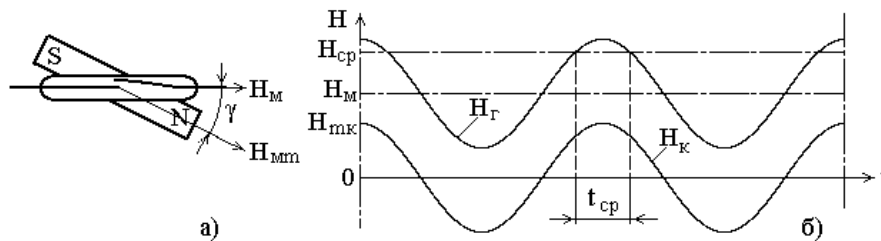


Рис.2: Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре геркона

Так как воздушный зазор геркона приходится на середину катушки, а этому соответствует $x = h_{кг}/2$ и $r_1 = r_2 = \sqrt{(d_{кг}/2)^2 + (h_{кг}/2)^2}$, то напряженность магнитного поля срабатывания и возврата геркона

$$H_{cp} \approx I_{cp} w_{кг} / r_1 \text{ и } H_{воз} \approx I_{воз} w_{кг} / r_1. \quad (3)$$

При этом коэффициент возврата геркона

$$k_{воз} = H_{воз} / H_{cp} = I_{воз} / I_{cp}.$$

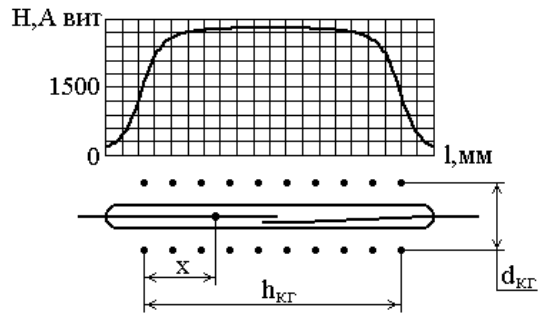


Рис.3: Распределение напряженности магнитного поля катушки вдоль оси геркона КЭМ-5

Для определения параметров герконов защиты использовалась катушка, у которой $w_{\text{кг}} = 66$ вит, $h_{\text{кг}} = 0,062$ м и $d_{\text{кг}} = 0,01$ м. В процессе экспериментов выяснилось, что контакты используемого в защите геркона КЭМ-5 замыкались и размыкались при токах 2,7 А и 1,76 А. Что соответствует напряженности магнитного поля 2838 А/м и 1847 А/м. Распределение напряженности магнитного поля катушки вдоль магнитной системы в момент замыкания этого геркона приведено на рисунке 3. При этом коэффициент возврата $k_{\text{воз}} = 0,65$.

Для КЭМ-2 при той же катушке и токе $I_{\text{кг}} = 1,289$ А напряженность магнитного поля срабатывания составила $H_{\text{ср}} = 1355$ А/м при коэффициенте возврата $k_{\text{воз}} = 0,54$.

В соответствии с законом полного тока по [4,5] для кольцеобразного ферромагнитного сердечника с воздушным зазором величиной δ напряженность $H_{\text{к}}$ магнитного поля в этом зазоре от тока $I_{\text{к}}$ определяется из уравнения

$$I_{\text{к}} = H_{\text{к}}\delta + H_{\text{кс}}l_{\text{с}}, \quad (4)$$

где $l_{\text{с}} = 2\pi R_{\text{ср}} - \delta$; $H_{\text{кс}}$ - напряженность магнитного поля в магнитопроводе; $R_{\text{ср}}$ - радиус среднего листа кольцеобразного сердечника.

С учетом принципа неразрывности магнитного потока в замкнутой магнитной цепи соотношение напряженности магнитного поля в сердечнике и зазоре может быть представлено как $H_{\text{кс}} = H_{\text{к}} / \mu_{\text{с}}$. В результате

$$I_{\text{к}} = H_{\text{к}}\delta + H_{\text{к}}l_{\text{с}} / \mu_{\text{с}} = H_{\text{к}}(\delta + l_{\text{с}} / \mu_{\text{с}}),$$

где $\mu_{\text{с}}$ - магнитная проницаемость стали.

Так как для изготовления сердечников трансформаторов тока идет трансформаторная сталь с высоким значением $\mu_{\text{с}}$, то вторым слагаемым в (4) можно пренебречь. Поэтому при наличии поперечного воздушного зазора

$$I_{\text{к}} = H_{\text{к}}\delta \text{ или } H_{\text{к}} = I_{\text{к}} / \delta. \quad (5)$$

Однако воздушный зазор в сердечнике защиты от ОЗК не является равномерным из-за наличия радиального несквозного отверстия и постоянного магнита в нем. Рассчитать эквивалентную величину такого воздушного зазора достаточно сложно. Проще его определить экспериментально. Для этого постоянный магнит устанавливается на угол $\gamma = 90^\circ$ и в проводнике, имитирующем ток ОЗЗ, определяется ток $I_{\text{к,ср}}$, при котором контакты геркона замкнутся. Тогда по (5)

$$\delta_{\text{эkv}} = I_{\text{к,ср}} / H_{\text{ср}}, \text{ а } H_{\text{mk}} = I_{\text{ср}} / \delta_{\text{эkv}}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка устройства защиты на герконе КЭМ-2 и КЭМ-5 при $\gamma = 90^\circ$ показала, что их ток $I_{\text{ср}}$ составляет 23,4А и 49А. Следовательно, эквивалентный зазор кольцеобразного сердечника защиты будет равен $\delta_{\text{экв}} = 0,01727 \text{ м}$.

Напряженность $H_{\text{мм}}$ магнитного поля постоянного магнита для раз работанного устройства подбирается и устанавливается опытным путем. Она должна быть такой, чтобы в устройстве защиты срабатывание геркона происходило только при $\gamma = 0^\circ$ и $I_{\text{к}} = 0 \text{ А}$. Так как параметры используемых герконов различны, то этого можно добиться увеличением расстояния между герконом и постоянным магнитом с помощью регулировочных прокладок.

Чувствительность устройства защиты от ОЗЗ определяется величиной тока $I_{\text{к}}$, который приведет к срабатыванию защиты. Ее при фиксированном положении постоянного магнита, находят по графикам на рисунке 4. Эти графики строят следующим образом. По условиям подбора элементов устройства защиты при $\gamma = 0^\circ$ и ток $I_{\text{к}}$ должен равняться нулю. Эта точка на графиках обозначена А. При $\gamma = 90^\circ$ ток определенный экспериментально $I_{\text{к}}$ для герконов КЭМ-2 и КЭМ-5 составляет 23,4А и 49А. Эта точка на графиках обозначена В. Так как по (1) принято, что, $H_{\text{к}} = H_{\text{мм}} \cos \gamma$, то теоретическая зависимость $I_{\text{ср}} = f(\gamma)$ должна соответствовать утолщенной линии на этих рисунках. Точками на них показаны результаты эксперимента. Как считают авторы расхождение между экспериментальными и полученными расчетным путем значениями тока $I_{\text{к}}$ вызвано в основном изменением эквивалентного зазора кольцеобразного сердечника защиты при повороте магнита. Его можно значительно уменьшить за счет использования постоянного магнита круглой формы.

Предлагаемое устройство защиты способно обеспечить достаточно высокую чувствительность к ОЗЗ. Так по рисунку 4,а при установке $\gamma_{\text{ср}}$ равного примерно 9° на ТТНП с герконом КЭМ-2 ток срабатывания защиты $I_{\text{к,ср}}$ составит около одного ампера.

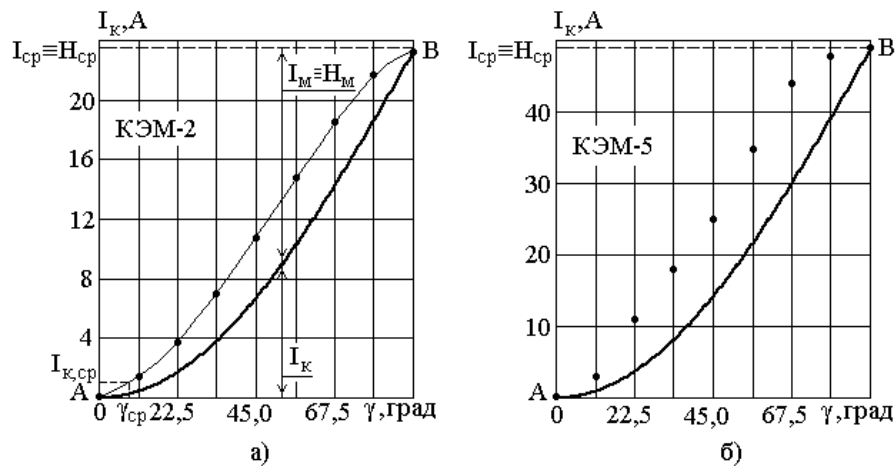


Рис.4: Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре геркона

Такая конструкция ТТНП с герконом позволяет для практически любого заданного значения тока ОЗЗ отстроить защиту так, чтобы контакты геркона после ОЗЗ могли вернуться в исходное положение или остались замкнутыми. В последнем случае не требуется дополнительных устройств в виде расширителя импульсов, а возврат контактов геркона в исходное положение осуществляется поворотом магнита в сторону увеличения угла γ .

Действительно, если при настройке устройства установить

$$H_{\text{воз}} > H_{\text{м}},$$

то контакты геркона вернуться в исходное положение после отключения ОЗЗ. Однако для обеспечения надежной его работы потребуется расширитель импульсов. Что, несомненно, приведет к удорожанию конструкции защиты.

Если же при настройке устройства выставить

$$H_{\text{воз}} < H_{\text{м}} < H_{\text{ср}},$$

то контакты геркона после отключения ОЗЗ останутся замкнутыми.

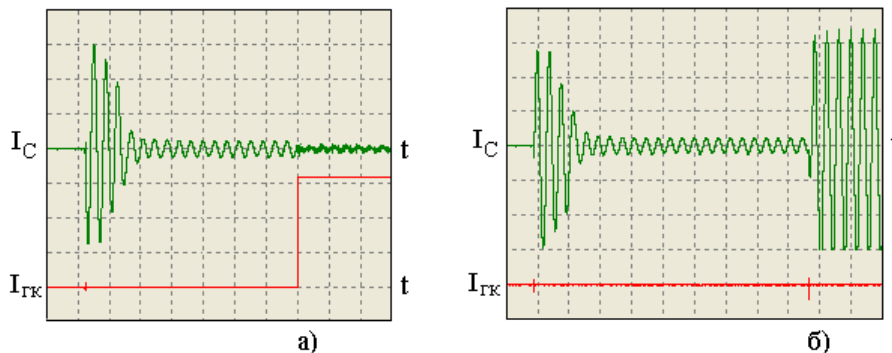


Рис.5: Осциллограммы режимов работы защиты при ОЗК и КЗ

Результаты экспериментальных исследований ТТНП с герконом КЭМ-5 представлены на рисунке 5 в виде осциллограмм тока $I_{ГК}$ в цепи контактов геркона и тока I_C фазы С асинхронного двигателя в сети с изолированной нейтралью и током ОЗЗ $I_{\text{к}} = 1,6\text{А}$. Из рисунка 5,а видно, что при пуске, нагрузке и ОЗЗ путем замыкания вывода обмотки фазы С статора асинхронного двигателя АО-31-4 устройство защиты работает правильно. На рисунке 5,б показаны режимы пуска, нагрузки АО-31-4 и междуфазного замыкания на его выводах через ограничительное сопротивление. Устройство защиты также работает верно.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал опыт эксплуатации устройства защиты на ТТНП с герконом в лабораторных условиях, основным недостатком этого устройства является сложность выставления порога срабатывания при малых углах γ . Это вызвано неточностью изготовления отверстий в слоеном магнитопроводе и, как следствие, возникновением люфта в механизме крепления и поворота постоянного магнита. При этом устройство надежно срабатывало при токах ОЗЗ порядка 0,5-0,7А. Изготовление ТТНП с герконом на производстве и замена в нем постоянного магнита прямоугольной формы на круглую несомненно приведет к улучшению характеристик этого устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов А.Н., Кудабаяев Д.А., Колесников Е.Н, Черных В.А.. Инновационный патент №25699 KZ, H02H 7/06; 7/08, Оpubл. 16.04.2012, бюл.№12. Устройство защиты электроустановки от однофазного замыкания.
2. Новожилов А.Н., Колесников Е.Н., Кудабаяев Д.А. Инновационный патент №25897 KZ, H02H 7/06; 7/08, Оpubл. 16.07.2012, бюл.№7. Устройство защиты электроустановки от однофазного замыкания.
3. Новожилов А.Н. Применение герконов для защиты асинхронных двигателей от витковых замыканий // Электричество.- 1990.- №2.- С.50÷55
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. -М.: Высшая школа, 1967.- 775с.
5. Андреев Ю.А., Абрамзон Г.В. Преобразователи тока для измерений без разрыва цепи. – Л.: Энергия, 1979.-143с.