

УДК 621.211

Н.Н. Сапига, Т.Н. Захарова

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## СХЕМА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТИ 0,4 КВ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЁННОЮ НЕЙТРАЛЬЮ

Предложена схема пассивного измерителя тока утечки на землю электрооборудования. Приведены расчёты числа витков вторичной обмотки дифференциального трансформатора тока. Проведённые исследования датчика дифференциального тока позволяют уточнить формулу для расчёта оптимального числа витков вторичной обмотки дифференциального трансформатора тока. По схеме электронного модуля устройства, на вход которого подаётся сигнал мощностью порядка 199 мкВт, предполагаемая подача заявки на патент.

**Ключевые слова:** электрооборудование, заземление, нейтраль, трансформатор, пассивный измеритель тока.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

В сетях с глухозаземлённой нейтралью контроль изоляции фаз относительно земли без использования источника оперативного тока осуществляют путём измерения тока нулевой последовательности

$$3 \cdot \dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

где  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  – комплексы токов утечки на землю через проводимости отдельных фаз сети  $Y_A, Y_B, Y_C$  и через проводимость нейтрали силового трансформатора  $Y_0$ ;

$$Y_K (Y_A, Y_B, Y_C) = g_K + j \cdot \omega C_K; \quad k = 1, 2, 3;$$

$g_K$  – активная проводимость фаз сети относительно земли;  $C_K$  – ёмкость фазы относительно земли;  $\omega$  – угловая частота.

Условия работоспособности сети при этом определяют исходя из необходимости обеспечить условия безопасности при прикосновении человека к заземлённому или занулённому корпусу в период замыкания на него фазы или при прикосновении к токоведущей части, находящейся под напряжением. В первом случае условия безопасности определяют уравнением:

$$U_{\text{пр.доп}} \geq I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2,$$

где  $U_{\text{пр.доп}}$  – предельно допустимое значение напряжения прикосновения,  $I_3$  – ток, стекающий на землю через сопротивление  $R_3$  заземлителя;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты прикосновения.

Во втором случае

$$U_{\text{пр.доп}} \geq I_h \cdot R_h.$$

Очевидно, что сеть с глухозаземлённой нейтралью теряет работоспособность при некотором

значении  $3\dot{I}_0$ , удовлетворяющем рассмотренные условия.

В работе [1] предложен метод контроля, связанный с использованием источника постоянного оперативного тока и позволяющий применить существующие приборы постоянного тока. Особенностью этого метода является включение разделительного конденсатора в нейтраль силового трансформатора, благодаря чему нейтраль изолируется относительно земли по постоянному току оперативного источника и остаётся заземлённой по переменному току системы электроснабжения электроприёмников.

Существуют другие решения по контролю изоляции, заключающиеся во включении в нейтраль силового трансформатора резонансного контура или трансформаторов тока и определении сопротивления изоляции фаз на постоянном (выпрямленном) токе или на токе непромышленной (инфранизкой) частоты. Основным недостатком методов с использованием оперативного источника тока является необходимость включения в нейтраль силового трансформатора дополнительных устройств, что понижает надёжность системы энергоснабжения (СЭС) и требует внесения изменений в правила устройств электроустановок (ПУЭ). На наш взгляд, перспективным направлением в измерении сопротивления изоляции является отказ от оперативного источника тока и использование дифференциального тока. Существующие устройства не позволяют визуально определить на включённой электроустановке уровень изоляции и отключение электроустановки (ЭУ) будет для потребителя внезапным.

**Цель статьи:** В настоящей статье предпринята попытка разработки устройства контроля изоляции (УКИ) с регистрацией и визуальным отображением слабого магнитного поля дифференциального тока  $I_\Delta$ .

### Основной материал

В настоящее время широкое применение получили схемы УКИ на основе трансформатора тока с оперативным питанием (рис.1), позволяющие в цифровой форме регистрировать переменный ток с 0,5...1,0 мА. На наш взгляд, наличие оперативного источника питания снижает надёжность УКИ, поэтому предпринята попытка разработки пассивного измерителя тока  $I_{\Delta}$ , т.е. без оперативного источника питания. Пассивный измеритель тока  $I_{\Delta}$  может быть реализован по структурной схеме, представленной на рис. 2.

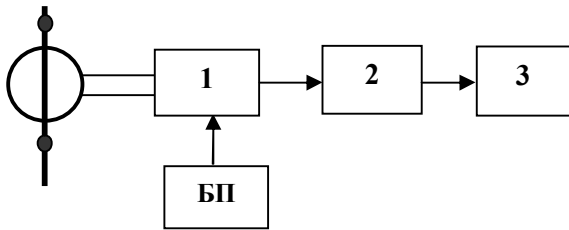


Рис. 1. Структурная схема активного измерителя тока  $I_{\Delta}$ :  
1 – блок формирования аналогового сигнала;  
2 – блок формирования цифрового сигнала;  
3 – дисплей; БП – блок питания

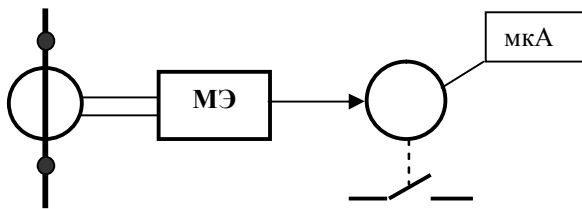


Рис. 2. Структурная схема пассивного измерителя тока  $I_{\Delta}$ :  
МЭ – модуль электронный; мкА – микроамперметр постоянного тока с вспомогательными контактами

На данном этапе разработки УКИ приводится выбор оптимального числа витков вторичной обмотки дифференциального трансформатора тока (ДТТ) для схемы рис. 2.

Число витков вторичной обмотки ДТТ  $w_2$  влияет не только на величину активного сопротивления обмотки  $r$ , но и на величину индуктивности  $L$ . Индуктивность обмотки изменяется пропорционально  $w_2^2$ , а активное сопротивление –  $w_2$ . При некотором  $w_2 < w_{2, \text{опт}}$  условие  $\omega L \gg r$  становится невыполнимым, что приводит к резкому снижению сигнала на выходе ДТТ. Из этого следует, что для оптимизации ДТТ необходимо выбирать такое число витков, чтобы выполнялось соотношение  $(\omega L / r) \gg 1$ . Для ДТТ с круглым сечением магнитопровода  $L$  и  $r$  определяют [2]:

$$L = \mu \mu_0 w_2^2 R_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - [(R_0 - R_1)/R_0]^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $R_0 = (R_1 + R_2) / 2$ ;  $r = 8\rho w_2 (R_0 - R_1) / d^2$ ;  $\rho$  – удельное сопротивление материала вторичной обмотки;  $d$  – диаметр провода вторичной обмотки;  $R_1$ ,  $R_2$  – внутренний и внешний диаметры тороидально-го магнитопровода ДТТ соответственно.

Первичной обмоткой в ДТТ являются три фазных провода сети ( $w_1 = 1$ ), пропущенные в окно сердечника. Для подтверждения теоретических расчётов (1) с целью оптимизации ДТТ были проведены исследования влияния числа витков вторичной обмотки и значения нагрузки ДТТ на величину выходного сигнала. Исследовался ДТТ тороидальной конструкции с сердечником из пермаллоя 79НМ. Для получения достаточно сильного сигнала было принято  $w_1 = 5$ , а число витков вторичной обмотки изменялось в процессе эксперимента. Согласно [2] выражение для  $w_{2, \text{опт}}$  имеет вид:

$$w_{2, \text{опт}} = K \cdot 16\rho / \mu \cdot \mu_0 d^2 \omega f_2(\zeta), \quad (2)$$

где  $K = \omega L / r$ ;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость сердечника ДТТ;  $f_2(\zeta) = \psi \cdot \ln(2\zeta - 1) / (\psi + \zeta - 1)$  – функция параметров сердечника;  $\zeta = R_0 / R_1$ ;  $\psi = h / R_1$ ;  $R_0 = (R_1 + R_2) / 2$ .

Используя (2) определяется  $w_{2, \text{опт}}$  для ДТТ с тороидальным сердечником (сплав 79НМ) квадратного сечения при следующих данных:  $\mu = 80000$ ;  $\zeta = 1,34$ ;  $\psi = 0,8$ ;  $d = 0,1 \text{ мм}$ ;  $K = 1000$  (при  $f = 50 \text{ Гц}$ ). В результате расчёта  $w_{2, \text{опт}} = 887$ .

Для экспериментальной проверки были сняты характеристики. Результаты эксперимента показывают, что число витков вторичной обмотки, необходимое для эффективной работы ДТТ, более чем в два раза отличаются от числа витков, полученных расчётным путем, и равно примерно 400 витков. При малом числе витков вторичной обмотки  $w_2 < 100$  сигнал на выходе не достигает максимально возможного значения. При завышении числа витков  $w_2 > 400$  сигнал на выходе также уменьшается, так как увеличивается активное сопротивление вторичной обмотки и индуктивность рассеяния, а, следовательно, возрастает и полное сопротивление вторичной обмотки ДТТ. Кроме того, необоснованное увеличение числа витков вторичной обмотки влечёт за собой увеличение веса меди и размеров окна сердечника. В конечном счёте, это может вызывать неустойчивость трансформатора к аварийным режимам.

Это явление нежелательно в связи с тем, что помимо требований к точности ТТ часто предъявляются ещё требования к устойчивости в отношении КЗ, так как ТТ находится на пути токов КЗ и через него включаются аппараты, отключающие установку в аварийном режиме. Следовательно, ТТ должен

выдерживать кратковременно ток КЗ и воздействовать на аппарат защиты, который отключит аварийный участок. Основным условием точной работы ТТ является соотношение

$$I_{01} \cdot w_1 \ll I_2 \cdot w_2 \quad (3)$$

где  $I_{01}$  – ток холостого хода первичной обмотки;

$I_2$  – ток вторичной обмотки.

Увеличивая сопротивление во вторичной цепи мы дальше отходим от условия (3). Обычно у ТТ указывается то наибольшее сопротивление, на которое можно замкнуть его вторичную обмотку не выходя за пределы допустимых погрешностей.

При анализе расчётов по (2) обращает внимание принятое достаточно высокое значение  $\mu = 80000$  для пермаллоя 79НМ, так как ДТТ работает в зоне слабых магнитных полей. Кроме того, недостаточно обосновано принятое значение  $K = 1000$ .

Величина  $K$  практически линейно зависит от числа витков  $w_2$  и  $\mu$ .

Для проверки фактических значений  $K$  был проведен эксперимент: на тороидальный сердечник с квадратным сечением:  $D = 48$  мм,  $d = 33$  мм,  $h = 20$  мм, выполненного путём намотки лентой 22 мкм сплава 79НМ, класса 1,  $\mu_{нач.} = 16000$  намотана вторичная обмотка  $w_2 = 800$  проводом ПЭТВ диаметром 0,13 мм (по меди). Расчётное значение  $r_2 = r_0 \cdot l_{cp} \cdot w_2 = 1,32 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 63$  Ом. Измененное значение  $r_2$  отличается от расчётного на 4%.

Расчётное значение

$$\omega L_2 = \mu \mu_0 f w_2^2 \cdot h \cdot \ln(D/d) = 70 \cdot 10^3 \cdot 12,56 \cdot 10^7 \cdot 50 \cdot 800^2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(48/33) = 23187 \text{ Ом};$$

$K = 23187/63 = 368$ , т.е. удовлетворяется условие оптимизации:  $K \gg 1$ . Если принять в (2)  $K = 400$ , то  $w_{2,опт} = 355$ , т.е. отличается от полученного экспериментального значения на  $\approx 12\%$ . Окончательное значение  $K$  для расчётов по (2) необходимо уточнить в процессе последующих экспериментов для различных материалов и конструкций сердечника трансформатора тока.

## Выводы

1. Предложена схема устройства непрерывного контроля изоляции без оперативного источника питания, позволяющее регистрировать снижение сопротивления изоляции и выдавать предупредительный или отключающий сигнал.

2. Проведённые исследования датчика дифференциального тока позволяют уточнить формулу для расчёта оптимального числа витков вторичной обмотки дифференциального трансформатора тока.

3. По схеме электронного модуля устройства, на вход которого подаётся сигнал мощностью порядка 199 мкВт, предполагаемая подача заявки на патент.

## Список литературы

1. В.М. Кутин и др. Диагностика электрических распределительных сетей. – К., 1993. – 116 с.
2. Ревякин А.И. Оптимизация трансформатора тока нулевой последовательности // Труды МЭИ. – 1976. – Вып. 414. – С. 15-18.

Поступила в редколлегию 26.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Ф. Артюх, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

## СХЕМА ПРИБОРОУ КОРТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ В МЕРЕЖІ 0,4 КВ З ГЛУХОЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЬЮ

М.М. Сапіга, Т.М. Захарова

*Запропонована схема пасивного вимірника струму витоків на землю електроустановки. Приведені розрахунки числа витків вторинної обмотки диференціального трансформатора струму. Проведені дослідження датчика диференціального струму дозволяють уточнити формулу для розрахунку оптимального числа витків вторинної обмотки диференціального трансформатора струму. По схемі електронного модуля пристрою, на вхід якого подається сигнал потужністю близько 199 мкВт, передбачувана подача заявки на патент.*

**Ключові слова:** електроустановки, заземлення, нейтраль, трансформатор, пасивний вимірник струму.

## CHART OF DEVICE OF CONTROL OF ISOLATION IN NETWORK 0,4 KV WITH GLUKHOZAZEMLENOYU NEYTRAL'YU

N.N. Sapiga, T.N. Zakharova

*The chart of passive measuring device of current of loss is offered on earth of electrical equipment. The calculations of number of coils of the second puttee of differential transformer of current are resulted. The conducted researches of sensor of differential current allow to specify a formula for the calculation of optimum number of coils of the second puttee of differential transformer of current. On the chart of the electronic module of device, on the entrance of which a signal is given by power about 199 мкВт, supposed filing of an application on a patent.*

**Keywords:** electrical equipment, grounding, Neutral, transformer, passive measuring device of current.