

Защита однофазного трансформатора от электрических и механических повреждений на магнитном трансформаторе тока

НОВОЖИЛОВ Т.А.

Предложен способ защиты однофазного трансформатора, по которому его электрические и механические повреждения выявляются по возникновению несимметрии магнитного поля рассеяния. На основе этого способа разработано устройство защиты с измерительным преобразователем в виде магнитного трансформатора тока с двумя обмотками, который располагается на плоскости симметрии защищаемого трансформатора. Для реализации устройств защиты предложена схема токовых цепей и цепей оперативного тока, обоснован выбор времени и тока срабатывания, а также осуществлена оценка чувствительности разработанной защиты.

Ключевые слова: *однофазный трансформатор, короткие замыкания, механическое повреждение, трансформатор тока, защита, чувствительность*

Обычно однофазные трансформаторы используются в виде группы мощных трансформаторов связи на электрических станциях и в энергосистемах, а также в виде печных трансформаторов на ферросплавном производстве и в металлургии. Из-за конструктивных особенностей междуфазные короткие замыкания (КЗ) в группе однофазных трансформаторов невозможны. Поэтому практически все электрические повреждения обмоток происходят на витковые замыкания (ВЗ) и однофазные на корпус (ОЗК) [1–3]. Кроме того, достаточно часто под воздействием электромагнитных сил при токах КЗ за трансформатором происходит деформация его обмоток. В результате дальнейшая эксплуатация такого трансформатора достаточно быстро приводит к ВЗ или ОЗК из-за повреждения изоляции под воздействием вибрации в местах соприкосновения сместившихся витков и корпуса.

При этом максимальные токовые и дифференциальные защиты трансформатора обладают недостаточной чувствительностью как к ВЗ, так и к ОЗК, а газовая защита имеет большое время срабатывания [4] при замыкании малого числа витков, особенно в зимнее время. Кроме того, ее невозможно использовать для защиты «сухих» трансформаторов. Поэтому поврежденный трансформатор отключается не в момент возникновения замыкания, а тогда, когда повреждения достигнут такого размера, при котором он будет отключен этими защитами. В результате размеры повреждения обмотки увеличиваются с нескольких витков до 15–50% обмотки. Иногда трансформатор полностью выходит из строя. При этом защиты от смещения обмоток не используются вообще.

Более чувствительны к электрическим повреждениям в обмотках трансформатора защиты на магнитных трансформаторах тока (МТТ) [4–10]. Однако практически все они либо имеют зону нечувствительности к ВЗ в обмотке у середины стержня сердечника трансформатора, либо сложны в установке и эксплуатации. Кроме того, нет сведений об их использовании для выявления ОЗК и деформации обмоток трансформатора. Решить эти проблемы предлагается следующим образом.

Способ защиты. Основные элементы конструкции однофазного трансформатора *1* приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что его обмотки выполняются в виде двух одинаковых катушек *2* и *3*, которые располагаются на стержнях *4* и *5* магнитопровода. При сборке трансформатора части первичной и вторичной обмоток на разных стержнях соединяют последовательно. Поэтому в любом режиме работы неповрежденного трансформатора токи в этих частях обмоток равны по значению, а их магнитные поля рассеяния симметричны относительно плоскости *Q*. В связи с этим составляющая индукции B_y магнитного поля рассеяния на этой плоскости будет равна нулю.

В то же время [10] при ВЗ или ОЗК, а также при деформации витков катушек трансформатора эта симметрия нарушается. Это вызвано тем, что в замкнувшихся витках *7* и части витков *8* в катушке при ОЗК в точке *9* ток значительно отличается от тока в остальной части обмотки, а деформированные витки *10* изменяют свое место расположения.

Устройство защиты. В устройстве защиты используется МТТ с двумя обмотками *6*, который располагается на плоскости *Q* (см. рис. 1). Таким

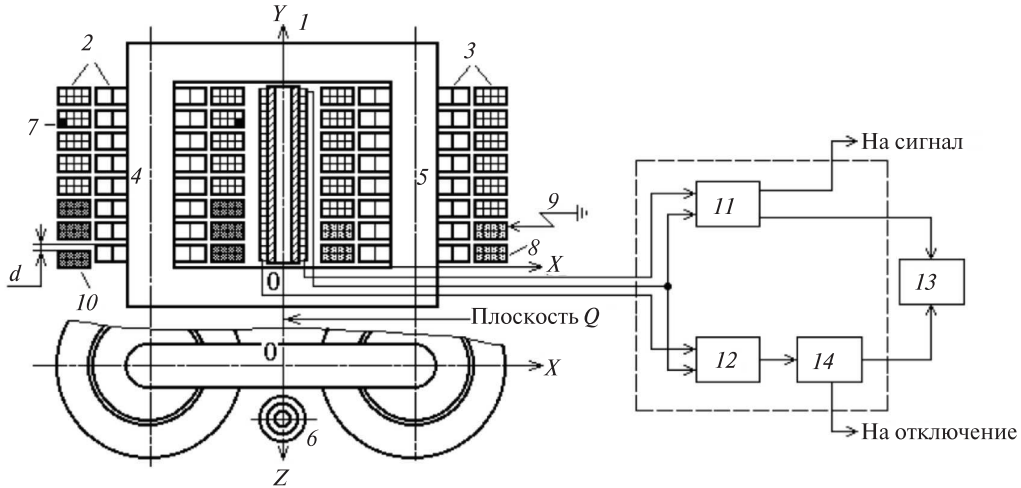


Рис. 1. Структурная схема защиты однофазного трансформатора

образом, если трансформатор не поврежден, то ЭДС, индуктированные в обмотках МТТ 6, будут равны нулю. Однако неточное изготовление и установка катушек обмоток 2 и 3 трансформатора 1, а также МТТ приводят к возникновению в обмотках МТТ ЭДС небаланса $E_{Н61}$ и $E_{Н62}$, которые в произвольном эксплуатационном режиме работы трансформатора 1 пропорциональны токам в обмотках катушек 2 и 3 (замкнутые 7 и смещенные 10 витки поврежденного трансформатора на рис. 1 выделены более темным цветом). Ток ОЗК протекает по виткам 8.

Обмотки МТТ присоединены к входам первого и второго пороговых элементов 11 и 12, которые могут выполняться в виде реле тока $KA1$ и $KA2$. Схема коммутации этих реле приведена на рис. 2,а. Порог срабатывания реле тока $KA1$ выбирается так, чтобы оно не сработало при $E_{Н61}$, возникающей в первой обмотке МТТ при включении трансформатора в сеть и при трехфазном замыкании за трансформатором. В свою очередь, порог срабатывания реле $KA2$ должен быть таким, чтобы оно не сработало от $E_{Н62}$, возникающей во второй обмотке

МТТ в любых эксплуатационных режимах, за исключением режимов включения трансформатора в сеть и трехфазного замыкания за трансформатором.

Формирование сигнала с первого порогового элемента 11 о наличии ВЗ или ОЗК в обмотке трансформатора осуществляется промежуточным реле $KL1$. С помощью контакта $KL1.1$ оно удерживается в сработавшем состоянии, а с помощью контакта $KL1.2$ подается сигнал на светодиод $VD1$ блока индикации 13. Возврат этого промежуточного реле в исходное положение после устранения аварии осуществляется с помощью кнопки $SX1$. Ток в светодиоде $VD1$ ограничивается резистором $R1$.

Формирование сигнала со второго порогового элемента 12 (см. рис. 1) о наличии смещенных витков 10 в обмотке 2 осуществляется с помощью реле времени $KT1$ (блок 14), а также промежуточного реле $KL2$, которое удерживается в сработавшем состоянии контактом $KL2.1$, а с помощью контакта $KL2.2$ подает сигнал на светодиод $VD2$ блока индикации 13. Возврат $KL2$ в исходное положение по-

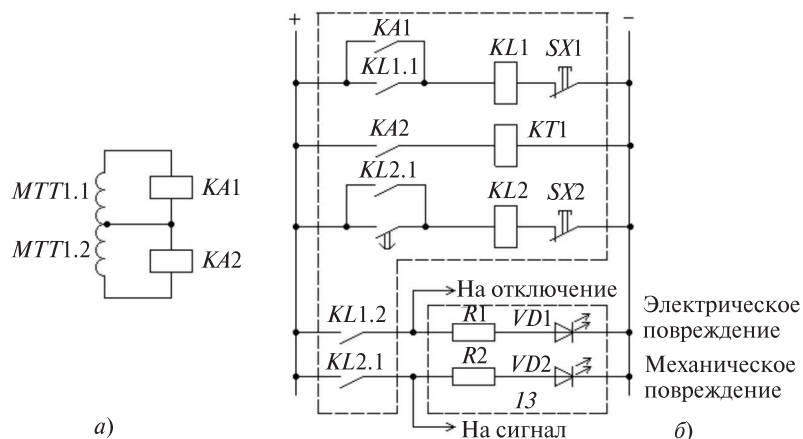


Рис. 2. Токковые цепи (а) и цепи оперативного тока (б) защиты трансформатора на магнитном трансформаторе

сле устранения аварии осуществляется с помощью кнопки *SX2*. Ток в светодиоде *VD2* ограничивается резистором *R2*. Время задержки реле времени *KT1* принимается равным $t_{пер}$. Оно должно превышать время переходного процесса в виде броска тока намагничивания при включении трансформатора в сеть.

В произвольном эксплуатационном режиме работы неповрежденного однофазного трансформатора ЭДС в первой обмотке МТТ меньше электродвижущей силы $E_{нб1}$. Поэтому первый пороговый элемент *I1* не срабатывает. Контакты *KA1* реле тока остаются разомкнутыми, и промежуточное реле *KL1* не срабатывает. В результате формирования сигнала о наличии замкнувшихся витков *7* не происходит.

Реле *KA2* второго порогового элемента *I2* в этих режимах срабатывает только при бросках тока намагничивания или сверхтоках при трехфазном замыкании за трансформатором. При этом его контакты *KA2.1* запускают реле времени *KT1*, контакты *KT1.1* которого замыкаются только через время

$$t_{ср} = k_{отс} t_{бтн}, \tag{1}$$

где $t_{бтн}$ — время затухания броска тока намагничивания, возникающего при включении трансформатора в сеть; $k_{отс}$ — коэффициент отстройки, т.е. во время затухания броска тока намагничивания контакты *KT1.1* остаются разомкнутыми и сигнал о наличии смещения витков *10* не формируется.

При замкнувшихся витках ЭДС $E_{МТТ}$ на выходе первой обмотки МТТ и ток в реле *KA1* резко возрастают. И если значение этого тока превысит значение тока срабатывания $I_{ср1}$ этого реле, то *KA1* сработает и его контакты *KA1.1* замкнутся. Это вызывает срабатывание промежуточного реле *KL1* и замыкание контактов *KL1.1* и *KL1.2*. При этом контакты *KL1.1* удерживают реле *KL1* в сработанном состоянии даже после размыкания контактов *KA1* при отключении трансформатора от сети, а контакт *KL1.2* формирует сигнал на отключение трансформатора и в блок индикации *I3*. Светодиод *VD1* начинает светиться, сигнализируя «*Электрическое повреждение*».

При смещении витков *10*, например в обмотке *2*, ЭДС $E_{МТТ}$ на выходе второй обмотки МТТ и ток в реле *KA2* также резко возрастают. И если значение этого тока превысит ток срабатывания $I_{ср2}$ этого реле, то *KA2* сработает и его контакты *KA2.1* замкнутся и вызовут срабатывание реле времени *KT1*. Однако контакты *KT1.1* этого реле замкнутся только через время $t_{ср}$, что дает возможность отстроить устройство защиты от броска тока намагничивания при включении трансформатора в сеть. Замыкание контактов *KT1.1* вызывает срабатывание промежуточного реле *KL2*, а следовательно замыкание его контактов *KL2.1* и *KL2.2*. При этом контакт *KL2.1* удерживает реле *KL2* в сработанном состоянии даже после размыкания контактов *KA2* при отключении трансформатора от сети, а контакт *KL2.2* включает, например, звуковой сигнал и сигнал для блока индикации *I3*. В результате светодиод *VD2* начинает светиться, сигнализируя «*Механическое повреждение*».

Особенности реализации защиты. Обычно МТТ выполняют в виде многовитковой катушки, намотанной в два провода на текстолитовый корпус в виде трубы или рейки, и располагают так, как показано на рис. 3,а. Крепление МТТ осуществляется с помощью немагнитных кронштейнов к элементам конструкции трансформатора, например к ярмовым балкам. Естественно, что конструкция такого крепления определена конструкцией трансформатора.

Такому взаимному расположению обмоток трансформатора и МТТ соответствует распределение индукции магнитного поля витка обмотки трансформатора B_{Vi} с координатой y_{Vi} вдоль продольной оси МТТ, приведенное на рис. 3,б. В свою очередь, распределение индукции магнитного поля обмотки трансформатора вдоль продольной оси МТТ определяется как

$$B_{обм}(y) = \sum_{i=1}^{w_1} B_{Vi}, \tag{2}$$

где w_1 — число витков обмотки трансформатора.

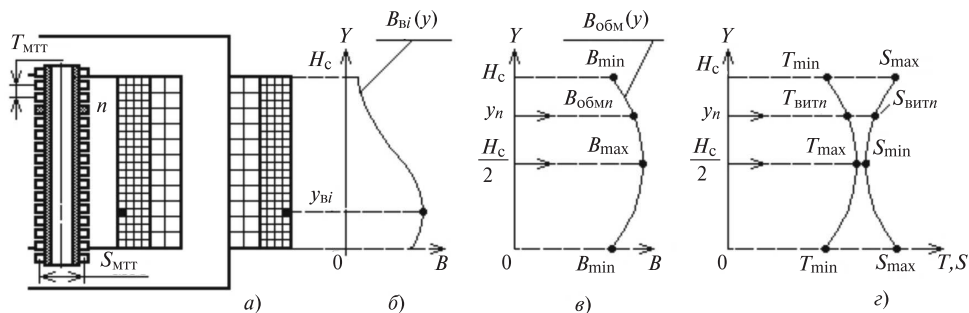


Рис. 3. Обмотки МТТ (а), зависимость ЭДС от положения замкнувшихся витков (б), шаг или площадь витка обмотки МТТ для обеспечения постоянного значения ЭДС (в, г)

Распределение $B_{обм}$ вдоль продольной оси МТТ приведено на рис. 3,в. Однако следует добавить, что зависимость $B_{обм}(y)$ для каждого типа однофазного трансформатора получают расчетным путем или экспериментально.

При таком распределении $B_{обм}(y)$ замыкание одного и того же числа витков в разных частях обмотки индуцирует в МТТ с постоянным шагом $T_{МТТ}$ и площадью витка $S_{МТТ}$ ЭДС различного значения. На практике это приводит к тому, что чувствительность защиты будет зависеть от места расположения замкнувшихся витков. От этого можно избавиться, если $T_{МТТ}$ или $S_{МТТ}$ сделать зависимыми от координаты y . Таким образом, если принять магнитный поток $\Phi_{вит} = B_{мин} S_{макс}$ через произвольный виток обмотки МТТ величиной постоянной, то тогда при постоянном шаге обмотки МТТ площадь его n -го витка с координатой y_n и его диаметр с учетом рис. 3,г определяются как

$$S_{витn} = \Phi_{вит} / B_{обмn} \text{ и } d_{витn} = \sqrt{4S_{витn} / \pi}, \quad (3)$$

где $S_{макс} = \pi d_{макс}^2 / 4$ – максимальное значение площади витка МТТ, задаваемое при его проектировании максимальным значением $d_{макс}$ диаметра этого витка, располагающегося у одного из торцов МТТ.

Такое изготовление обмоток МТТ позволит обеспечить постоянное значение его ЭДС при любом расположении сместившихся или замкнувшихся витков на стержне трансформатора.

Если принять диаметр $d_{витn}$ в МТТ постоянным, то в этом случае шаг n -го витка его обмотки с координатой y_n и с учетом рис. 3,г будет определяться из соотношения

$$T_{витn} = T_{мин} B_{обмn} / B_{мин}. \quad (4)$$

При реализации защиты в качестве $КА1$ и $КА2$ можно использовать широко известное реле тока типа РТ-40/0,2 [1,2]. Если мощность МТТ недостаточна, то его следует заменить на реле РТЗ-51 или

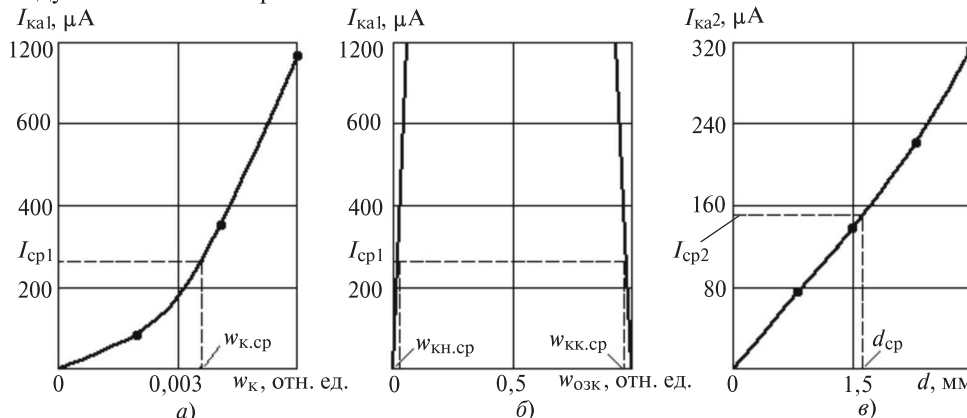


Рис. 4. Экспериментальная зависимость при ВЗ и ОЗК в однофазном трансформаторе ТТ-6

РН1-П/0,15 УХЛ-4 [11,12] с минимальным напряжением и током срабатывания 0,9 В и 0,15 мА. В дальнейшем предусматривается реализация такой защиты на микропроцессорной базе.

Так как обмотки МТТ одинаковы, то выбор порога срабатывания $КА1$ и $КА2$ осуществляется следующим образом. При значении ЭДС небаланса $E_{нб1}$ и $E_{нб2}$ по обмоткам $КА1$ и $КА2$ протекают токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{нб1} &= \dot{E}_{нб1} / (2Z_p + Z_{МТТ}); \\ \dot{I}_{нб2} &= \dot{E}_{нб2} / (2Z_p + Z_{МТТ}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z_{МТТ}$ и Z_p – полное сопротивление обмотки МТТ и токового реле.

Как и у максимальной токовой защиты [1,2], так и у предлагаемой ток срабатывания РО должен быть таким, чтобы защита не работала при максимальном токе, который может проходить через неповрежденный трансформатор. В результате ток срабатывания токового реле $КА1$

$$I_{сп1} = k_H I_{нб1.к}, \quad (6)$$

где $I_{нб1.к}$ – максимальный ток в $КА1$ при КЗ за защищаемым трансформатором; k_H – коэффициент надежности отстройки, равный 1,3–1,6.

Однако на ферросплавном производстве трансформаторы работают в режиме КЗ. В этом случае ток срабатывания токового реле $КА1$

$$I_{сп1} = k_H I_{нб1.нам}, \quad (7)$$

где $I_{нб1.нам}$ – максимальный ток в реле $КА1$ при броске тока намагничивания защищаемого трансформатора.

В связи с тем, что смещение катушек трансформатора после КЗ за трансформатором не требует немедленного отключения этого трансформатора, ток срабатывания токового реле $КА2$

$$I_{сп2} = k_H I_{нб2.ном},$$

где $I_{нб2.ном}$ — ток в токовом реле $KA2$ при номинальной нагрузке трансформатора.

Чувствительность защиты к ВЗ, ОЗК и перемещению витков определяется по зависимостям $I_{ка1}(w_k)$, $I_{ка1}(w_{озк})$ и $I_{ка2}(d)$, а также по токам срабатывания $I_{ср1}$ и $I_{ср2}$, как это показано на рис. 4. Эти зависимости получены экспериментально при ВЗ и ОЗК в обмотке высокого напряжения трансформатора ТТ-6 с числом витков в первичной обмотке $w_1 = 504$, а также при смещении первичной обмотки вдоль оси Y . В результате при токе срабатывания реле тока $KA1$ $I_{ср1} = 286 \mu A$ по рис. 4,а защита надежно отключает замыкание двух и более витков в первичной обмотке. При этом отношение w_k / w_1 составляет порядка $0,002 \div 0,004$.

Чувствительность защиты к ОЗК определяется аналогично. Как видно из рис. 4,б, при ОЗК защита имеет незначительные зоны нечувствительности в начале и в конце обмотки. Ширина этих зон в основном определена значением тока замыкания на землю. Как показали эксперименты, защита на МТТ трансформатора ТТ-6 в сети с током замыкания на землю в 2,3 А способна надежно защитить около 96–98% обмотки.

Оценить чувствительность защиты к смещению витков обмотки достаточно сложно в связи с тем, что это смещение зависит от тока КЗ, конструкции обмотки и мощности трансформатора. Поэтому в качестве такой оценки в данном случае принято смещение всей обмотки вдоль стержня на доступное значение d . В трансформаторе ТТ-6 $d = 3,1$ мм. Зависимость тока в реле $KA2$ в результате такого перемещения приведена на рис. 4,в. При этом срабатывание $KA2$ происходит при смещении примерно на 1,5 мм.

Выводы. 1. Способ защиты однофазного трансформатора от электрических повреждений, основанный на измерении несимметрии магнитных полей рассеяния обмоток позволяет разработать устройство защиты, которое не имеет зоны нечувствительности к витковым замыканиям и срабатывает при замыкании 0,2–0,4% обмотки независимо от места расположения замкнувшихся витков.

2. При однофазных замыканиях на корпус в зависимости от значения тока замыкания на землю это устройство способно надежно защитить около 96–98% обмотки.

3. Эффективность работы защиты от механических повреждений зависит от значения токов при КЗ за трансформатором, конструкции обмотки и мощности трансформатора, а также времени его эксплуатации.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Государственный контракт № 14.577.21.0097 от 22.08.2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чернобровов Н.В.** Релейная защита. 4-е изд. — М.: Энергия, 1974, 680 с.
2. **Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А.** Основы техники релейных защит. — М.: Энергоатомиздат 1984, 232 с.
3. **Шабад М.А.** Защита трансформаторов распределительных сетей. — Л.: Энергоиздат, 1981, 136 с.
4. **Засыпкин А.С.** Релейная защита трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1989, 240 с.
5. **Казанский В.Е.** Измерительные преобразователи тока в релейной защите. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 240 с.
6. **А.с. № 678582 (СССР).** Устройство для защиты электроустановки с магнитопроводом от витковых замыканий/А.Ф. Гаген. Опубл. 05.08.79.
7. **Гаген А.Ф.** Устройство защиты трансформаторов от витковых замыканий. — Изв. вузов. Электромеханика, 1978, № 9, с. 1015–1016.
8. **А.с. № 866639 (СССР).** Устройство для защиты от витковых замыканий в обмотках статических машин и аппаратов/А.Ф. Гаген, А.А. Пястолов. Опубл. 23.09.81.
9. **А.с. № 740170 (СССР).** Способ обнаружения короткого замыкания обмотки трансформатора/Синичи Кудзе, Тосио Такаги. Опубл. 05.06.80.
10. **Инновационный патент РК. № 19884.** Устройство защиты трансформатора от витковых замыканий/А.Н. Новожилов, К.П. Крюковский, Т.А. Новожилов, И.Ю. Крылов. — БИ, 2008, № 8, 3 с.
11. **Воликова М.П.** Разработка защит фазного ротора асинхронного двигателя от витковых замыканий: Дис. ... канд. техн. наук: защищена 1.12.06: утв. 15.05.07, 130 с.
12. **Новожилов Т.А.** Развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от витковых замыканий: Дис. ... канд. техн. наук: Алматы (Казахстан); защищена 20.11.15: утв. 15.03.2016, 147 с.

[26.09.2016]

Автор: Новожилов Тимофей Александрович окончил Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова в 2010 г. В 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от витковых замыканий» в Омском государственном техническом университете (ОмГТУ). Ассистент кафедры в ОмГТУ.

Magnetic Current Transformer-Based Protection of a Single-Phase Transformer from Electrical and Mechanical Failures

NOVOZHILOV Timofei A. (Omsk State Technical University, Omsk, Russia) – Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)

A method for protecting a single-phase transformer is proposed, according to which its electrical and mechanical failures are detected from the occurrence of asymmetry in the magnetic leakage field. A protection device is developed based on this method, which uses a measuring transducer in the form of a two-winding magnetic current transformer placed on the protected transformer's symmetry plane. For implementing protection devices, the configuration of current and control power supply circuits is proposed, the selection of actuation time delay and current is substantiated, and the selectivity of the developed protection is estimated.

Key words: *single-phase transformer, turn-to-turn fault, single-phase fault on the body, actuation threshold, selectivity*

REFERENCES

1. **Chernobrovov N.V.** *Releynaya zashchita. 4-ye izd.* (Relay protection. 4th edit.) Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 680 p.
2. **Berkovich M.A., Molchanov V.V., Semenov V.A.** *Osnovy tekhniki releinykh zashchit* (Basics of relay protection technology). Moscow, Energoatomizdat, 1984, 232 p.
3. **Shabad M.A.** *Zashchita transformatorov raspredelitel'nykh setei* (Protection of distribution network transformers). Moscow, Energoizdat, 1981, 136 p.
4. **Zasyplin A.S.** *Releynaya zashchita transformatorov* (Transformers relay protection). Moscow, Energoatomizdat, 1989, 240 p.
5. **Kazanskii V.Ye.** *Izmeritel'nye preobrazovateli toka v releinoi zashchite* (Measuring converters for current in relay protection). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 240 p.
6. **A.s. No. 678582 (SSSR).** *Ustroistvo dlya zashchity elektroustanovki s magnitoprovodom ot vitkovykh zamykanii* (C.a. No. 678582 (USSR). Device for protection of electrical installation with magnetic circuit from the winding fault) / A.F. Gagen. Publ. 05.08.1979.
7. **Gagen A.F.** *Izvestiya vuzov. Electromekhanika – in Russ.* (News of Higher Education Institutions. Electromechanics), 1978, No. 9, pp. 1015–1016.
8. **A.s. No. 866639 (SSSR).** *Ustroistvo dlya zashchity ot vitkovykh zamykanii v obmotkakh staticheskikh mashin i apparatov* (C.a. No. 866639 (USSR). Device for protection against winding fault in winding of static machines and apparatuses)/A.F. Gagen, A.A. Pyastolov. Publ. 23.09.1981.
9. **A.s. No. 740170 (SSSR).** *Sposob obnaruzheniya korotkogo zamykaniya obmotki transformatora ot vitkovykh zamykanii* (C.a. No. 740170 (USSR). Method for detecting a short-circuit of the transformer from the winding faults)/Sinichi Kudze, Tosio Takagi. Publ. 05.06.1980.
10. **Innovatsionnyi patent RK No. 19884.** *Ustroistvo zashchity transformatora ot zamykanii* (Innovative patent RK No. 19884. Transformer protection device against short circuit)/A.N. Novozhilov, K.P. Krylov. Bulletin of inventions, 2008, No. 8, 3 p.
11. **Volikova M.P.** *Razrabotka zashchit faznogo rotora asinkhronnogo dvigatelya ot vitkovykh zamykanii* (Development of phase rotor protections for an asynchronous motor against winding faults): Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Alma-Ata (Kazakhstan), 2007, 130 p.
12. **Novozhilov T.A.** *Razvitiye teorii postroyeniya zashchit odnofaznykh transformatorov ot vitkovykh zamykanii* (The development of the theory of constructing the protections of single-phase transformers from winding fault): Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.) Alma-Ata (Kazakhstan), 2015, 147 p.

[26.09.2016]