

**Д.И.ИВАНЧЕНКО**, аспирант, [dan87332@mail.ru](mailto:dan87332@mail.ru)  
**О.Б.ШОНИН**, д-р техн. наук, профессор, [ninosh\\_eltech@mail.ru](mailto:ninosh_eltech@mail.ru)  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**D.I.IVANCHENKO**, post-graduate student, [dan87332@mail.ru](mailto:dan87332@mail.ru)  
**O.B.SHONIN**, Dr. in eng. sc., professor, [ninosh\\_eltech@mail.ru](mailto:ninosh_eltech@mail.ru)  
Saint Petersburg State Mining University

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУДНО- ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Статья посвящена проблеме обнаружения межвитковых коротких замыканий силовых трансформаторов цифровой дифференциальной защитой. Рассмотрены алгоритмы, позволяющие надежно отличать межвитковые замыкания от внешних коротких замыканий и переходных процессов при включении трансформатора.

*Ключевые слова:* межвитковое замыкание, цифровая дифференциальная защита, силовой трансформатор.

## **IDENTIFICATION OF TURN TO TURN FAULTS IN POWER TRANSFORMERS BY MEANS OF THE AMPLITUDE-PHASE ANALYSIS OF NEGATIVE SEQUENCE CURRENTS**

The paper is dedicated to analyzing identification of turn to turn faults by digital differential protection relay of power transformers. Reliable algorithms of finding turn to turn faults from external faults and transformer inrush are described.

*Key words:* winding fault, digital differential protection, power transformer.

Силовые трансформаторы главных понижающих подстанций являются важным звеном систем электроснабжения горных предприятий, в значительной мере определяющим надежность и непрерывность технологического процесса. В случае отказа одного из трансформаторов, питаемых от независимых высоковольтных линий, вся сеть горного предприятия подключается ко второму трансформатору, который из-за ограниченной пропускной способности может обеспечить электроснабжение предприятия лишь в определенный промежуток времени.

Согласно статистике, причиной 70-80 % аварий являются межвитковые замыкания, возникающие из-за деградации изоляции вследствие тепловых, химических и механи-

ческих воздействий, например, пондеромоторных сил токов внешних коротких замыканий. Восстановление поврежденного трансформатора или его замена является продолжительной и дорогостоящей операцией. Поэтому раннее обнаружение межвитковых замыканий и своевременное отключение трансформатора при развитии аварии является важной задачей систем диагностики и релейной защиты. Роль этих систем возрастает в условиях ограниченного объема электродинамических испытаний выпускаемых трансформаторов [2], когда невыявленные дефекты конструкции начинают проявляться в ходе их эксплуатации, приводя к росту числа аварийных ситуаций.

Согласно ПУЭ, для защиты от внутренних повреждений трансформаторов мощно-

стью 6,3 МВ·А применяется продольная дифференциальная токовая защита без выдержки времени (рис. 1).

Работа защиты основана на сравнении сигналов  $i_1 = [i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}]^T$  и  $i_2 = [i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}]^T$  датчиков тока ДТ1 и ДТ2, установленных на входе и выходе защищаемого объекта:  $i_d = i_1 - i'_2$ , где  $i'_2$  – приведенный ток ДТ2, полученный из условия  $I_d \approx 0$  при работе трансформатора в номинальном режиме,  $I_d = \sqrt{I_{dA}^2 + I_{dB}^2 + I_{dC}^2}$  – модуль вектора  $i_d$ . В устройствах релейной защиты условие срабатывания определяется сравнением модуля дифференциального тока  $I_d$  с уставкой  $I_s = f(I_R)$ , которая зависит от так называемого тормозного тока  $I_R = |i_R|$ , где  $i_R = i_1 + i'_2$ .

Уставка образует кривую срабатывания, представляемую выражением

$$I_s = f(I_R) = I_{S\min} + K_1(I_R - I_{R1}) \times \delta_1(I_R - I_{R1}) + K_2(I_R - I_{R2}) \delta_1(I_R - I_{R2}), \quad (1)$$

где  $I_{R1}$ ,  $I_{R2}$  – точки излома процентной характеристики;  $K_1$  и  $K_2$  – угловые коэффициенты, учитывающие степень насыщения ДТ;  $\delta_1$  – единичная ступенчатая функция [2].

Характеристика срабатывания (рис. 2) нормируется относительно номинального тока трансформатора.

Для отстройки реле от токов включения используются дополнительные условия срабатывания, основанные на сравнении относительных значений четных гармоник тока для различного вида коммутаций, способных вызвать сигнал дифференциальной защиты.

Зона нечувствительности реле  $I_d < I_{s\min}$  обусловлена несовершенством ДТ, токами небаланса и другими факторами [3]. Этой зоне соответствует начальная стадия развития межвитковых замыканий, ток которых не оказывает заметного влияния на контролируемый ток  $I_d$  вследствие автотрансформаторного эффекта. Поэтому, несмотря на большой ток короткозамкнутых витков, аварийный процесс не фиксируется и не блокируется. Для обнаружения начальной стадии аварийного режима используются средства

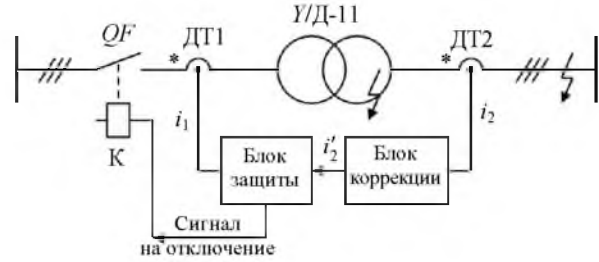


Рис. 1. Схема формирования дифференциальной защиты

диагностики, например, аппаратура контроля частичных разрядов. Перспективным направлением в этой области является использование современных методов обработки информации, направленных на выделение аварийных составляющих тока по различным признакам, вытекающим из представлений о процессах, полученных на 2D-, 3D-моделях магнитопровода и ВЧ-моделях электрической цепи трансформатора в терминах теории длинных линий. Для определения аварийного режима используются сложные алгоритмы временного и частотного анализа систем и сигналов. В работе рассматривается относительно простой способ обнаружения внутренних замыканий, основанный на анализе симметричных составляющих прямой  $I_+$ , обратной  $I_-$  и нулевой  $I_0$  последовательностей токов.

Исследование дифференциальной релейной защиты проводилось с помощью модели сети (см. рис. 1), построенной в среде SimPowerSystems Simulink Matlab. В модели использовались параметры трансформатора 35/6 кВ мощностью  $S = 5,6$  МВ·А, включенного по схеме Y/D-11. Эквивалентная нагрузка

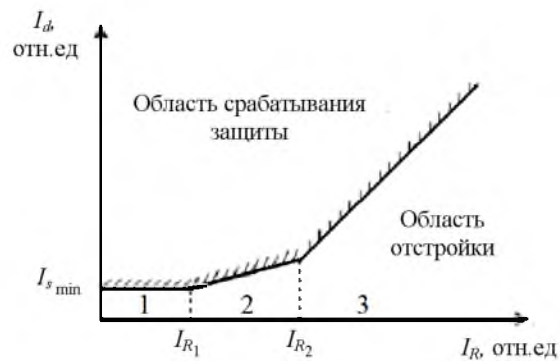


Рис. 2. Кривая срабатывания дифференциальной защиты с торможением

соответствовала номинальному режиму трансформатора. Коррекция тока  $i_2$  проводилась по формулам

$$\begin{aligned} i'_{A_2} &= \frac{k_{\text{ТТ}_2}}{k_{\text{ТТ}_1}} \frac{U_2}{U_1} \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{A_2} - i_{C_2}), \\ i'_{B_2} &= \frac{k_{\text{ТТ}_2}}{k_{\text{ТТ}_1}} \frac{U_2}{U_1} \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B_2} - i_{A_2}), \\ i'_{C_2} &= \frac{k_{\text{ТТ}_2}}{k_{\text{ТТ}_1}} \frac{U_2}{U_1} \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{C_2} - i_{B_2}), \end{aligned}$$

где  $k_{\text{ТТ}_1}$ ,  $k_{\text{ТТ}_2}$  – коэффициенты трансформации трансформаторов тока;  $U_1$ ,  $U_2$  – номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток.

Установлено, что границе чувствительности  $I_{\text{сmin}}$  дифференциальной защиты с процентной характеристикой (1) соответствует 10 % короткозамкнутых витков вторичной обмотки трансформатора. Поэтому моделирование работы защиты в зоне нечувствительности осуществлялось замыканием 6 % витков. Для выявления признаков межвитковых замыканий производился анализ симметричных составляющих как дифференциального тока, так и токов первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$\begin{aligned} I_+ &= \frac{1}{3} (I_A + aI_B + a^2I_C); \\ I_- &= \frac{1}{3} (I_A + a^2I_B + aI_C); \\ I_0 &= \frac{1}{3} (I_A + I_B + I_C), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a = e^{j120^\circ}$ .

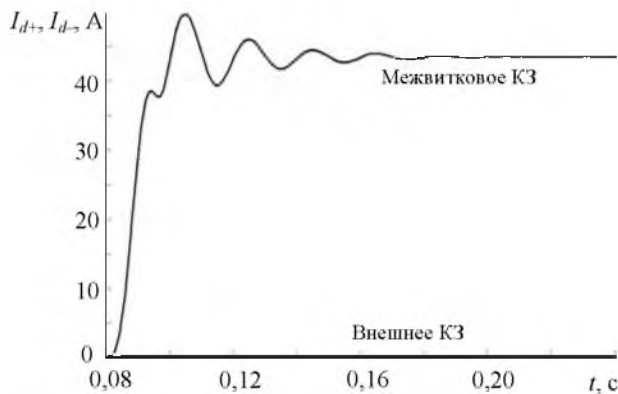


Рис.3. Прямая и обратная последовательности дифференциального тока при межвитковом замыкании и внешнем двухполюсном замыкании

Из полученных результатов (рис.3) видно, что при внутренних коротких замыканиях амплитуды прямой и обратной последовательностей дифференциального тока отличаются незначительно, в то время как при внешних коротких замыканиях и номинальном режиме работы трансформатора эти составляющие дифференциального тока малы. Амплитудный критерий обнаружения межвитковых замыканий запишем в виде

$$K_1 = \frac{I_{d+}^2 - I_{d-}^2}{I_{d+}^2 + I_{d-}^2}, \quad (3)$$

где  $I_{d+}$  – дифференциальный ток прямой последовательности;  $I_{d-}$  – дифференциальный ток обратной последовательности.

Динамика поведения амплитудного критерия при различных режимах исследуемой сети показана на рис.4. В случае внутреннего короткого замыкания критерий  $K(t)$  принимает значения, близкие к нулю. В случае нормального режима работы, внешних коротких замыканий и переходных токов включения трансформатора значение критерия  $K(t)$  близко к единице.

Анализ симметричных составляющих токов датчиков ДТ1 и ДТ2, установленных на входе и выходе трансформатора, показал, что при межвитковом замыкании обратные последовательности токов первичной и вторичной обмоток находятся в противофазе, в то время как при внешнем коротком замыкании фазовый сдвиг между ними близок к нулю (рис.5). Полученные соотношения по-

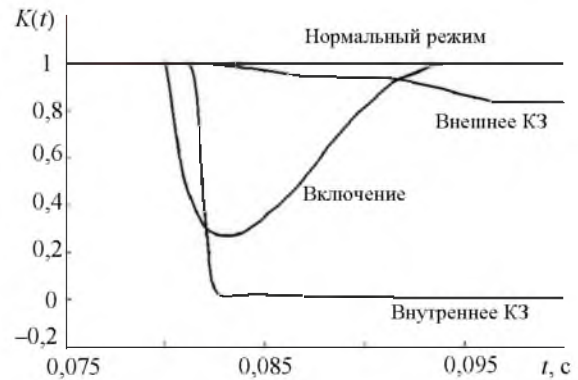


Рис.4. Поведение амплитудного критерия обнаружения межвитковых замыканий при различных режимах сети

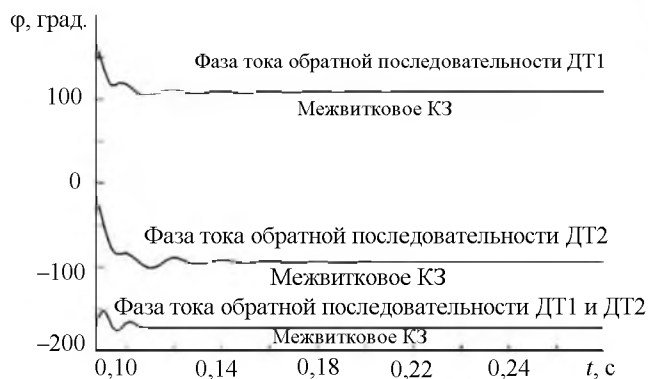


Рис. 5. Фазы токов обратной последовательности первичной и вторичной обмоток силового трансформатора

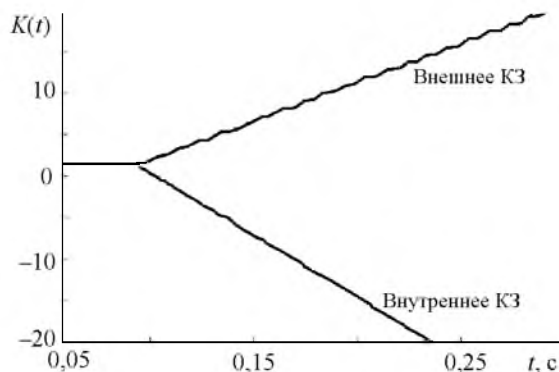


Рис. 6. Графики фазового критерия обнаружения межвитковых замыканий при внешнем и межвитковом замыкании

зволяют предложить фазовый критерий обнаружения межвитковых замыканий, подобный критерию, который использован в устройстве защиты от однофазных замыканий на землю [1]:

$$K_2(t) = \int_0^t i_1(t)i_2(t) dt, \quad (4)$$

где  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  – токи обратной последовательности на входе и выходе защищаемого объекта соответственно.

Поведение фазового критерия при моделировании различных режимов работы трансформатора представлено на рис. 6, из которого следует, что для идентификации вида повреждения сети достаточно знания знака контролируемого критерия  $K(t)$ .

Построение защиты на основе предложенных критериев позволяет достичь большей чувствительности и надежности срабатывания по сравнению с традиционными видами дифференциальных защит. Наиболее помехоустойчивым является алгоритм, построенный на базе фазового критерия, поскольку в этом случае не требуется сравнения токов по амплитуде, а достаточно фиксировать лишь знак параметра  $K(t)$ . Предложенные алгоритмы могут быть ис-

пользованы самостоятельно или в качестве расширения алгоритмов цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора на основе тормозной характеристики (1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 2410812 РФ, МПК H02H3/16. Устройство быстродействующей селективной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с возможностью безаварийного ввода резерва / О.Б.Шонин, П.А.Рогов. Опубл. 27.01.2011
2. Хренников А. Силовые трансформаторы. Проблемы электродинамической стойкости // Новости электротехники. 2008. № 6 (54).
3. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения. М., 2005.
4. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М., 2007.

#### REFERENCES

1. Patent CA 2410812 RF, IPC H02H3/16. High speed selective ground fault protection device for distribution lines allowing fail-safe load transfer. Publ. 27.01.2011.
2. Khrennikov A. Power transformers. Problems of electrodynamic durability // News of electrical engineering. 2008. N 6 (54).
3. Ziegler G. Numerical differential protection: principles and applications. Moscow, 2005
4. Shmeerson E.M. Numerical protection. Moscow, 2007.