

УДК 621.316.925.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПониЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА*Докт. техн. наук, проф. РОМАНИУК Ф. А.¹⁾, магистр техн. наук ЛОМАН М. С.²⁾*¹⁾*Белорусский национальный технический университет,*²⁾*РУП «Белэлектромонтажналадка»*

E-mail: faromanuk@bntu.by

INVESTIGATION OF MICROPROCESSOR DIFFERENTIAL PROTECTION OF POWER REDUCING TRANSFORMER*ROMANIUK F. A.¹⁾, LOMAN M. S.²⁾*¹⁾*Belarusian National Technical University,*²⁾*JSC Belektromontazhnaladka*

Представлено исследование функционирования дифференциальной защиты понижающего трансформатора 110 кВ при внутренних повреждениях методом вычислительного эксперимента. Рассмотрены режимы внутренних одно-, двух-, двухфазного на землю и трехфазного коротких замыканий, в том числе повреждений, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока.

Ключевые слова: дифференциальная защита трансформатора, математическая модель.

Ил. 7. Библиогр.: 3 назв.

The paper presents investigations on functioning of a differential protection of 110 kV reducing transformer with internal faults using computer simulation. Internal single-, double-, double-phase-to-ground and three-phase faults including faults accompanied with saturation of current transformers have been considered in the paper.

Keywords: transformer differential protection, mathematical model.

Fig. 7. Ref.: 3 titles.

Дифференциальная токовая ступень относится к основным защитах силовых трансформаторов. Разработка устройства дифференциальной защиты понижающего трансформатора ставит задачи выбора аналоговых и цифровых фильтров, вида тормозной характеристики, способов отстройки от бросков тока намагничивания (БТН), от перевозбуждения железа трансформатора, а также отстройки от внешних повреждений, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока (ТТ) [1]. Важным этапом разработки устройства дифференциальной защиты является комплексная проверка алгоритмов ТТ в широком диапазоне режимов его работы.

В статье представлено исследование функционирования дифференциальной защиты понижающего трансформатора 110 кВ при внутренних повреждениях методом вычислительного эксперимента с применением математических моделей дифференциальной защиты и силового трансформатора. Математическое моделирование позволяет провести исследование работы дифференциальной защиты во всем объеме

возможных режимов. Достоверность математической модели дифференциальной защиты трансформатора была проверена на основе сравнения с результатами, полученными при натурных испытаниях терминала дифференциальной защиты трансформатора МР801 [2].

Математическая модель выработки входных сигналов дифференциальной защиты трансформатора базируется на комплексных математических моделях энергообъекта, содержащего силовой трансформатор с его источниками питания, нагрузками, ТТ. Входные сигналы защиты вырабатываются для всех видов короткого замыкания (КЗ) на выводах трансформатора и внешних КЗ, режимов включения трансформатора и отключения внешних КЗ, с возможностью учета переходного сопротивления в месте КЗ. Математическая модель содержит системы дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих переходные процессы в электрических контурах расчетных схем энергообъекта. Дифференциальные уравнения решаются методом Рунге – Кутты второго порядка с определением величин, входящих в

правые части, на втором такте – путем линейной экстраполяции. Нелинейные системы алгебраических уравнений на каждом шаге решаются один раз методом итераций с обеспечением сходимости по формуле Вегстейна.

Математическая модель дифференциальной защиты включает в себя модель аналогового фильтра второго порядка с частотой среза 1 кГц, модель цифрового фильтра ортогональных составляющих (первой, второй и пятой гармоник тока) на основе алгоритма Гёрцеля [3], приведение токов по фазе и амплитуде, тормозную характеристику, блокировку от БТН на основе оценки второй гармоники, блокировку от перевозбуждения трансформатора на основе оценки пятой гармоники, алгоритм определения внешнего повреждения.

Расчет действующих значений токов осуществляется в 10-миллисекундном цикле на основе 20 выборок с частотой дискретизации 1 кГц. Модель реализует функции дифференциальной ступени с торможением и дифференциальной отсечки без торможения. Расчетная схема, реализованная в математической модели выработки входных сигналов дифференциальной защиты трансформатора, представлена на рис. 1. Для исследования были выбраны режимы КЗ в начале и конце защищаемой зоны – на выводах 110 и 10 кВ понижающего трансформатора мощностью 6,3 МВ · А.

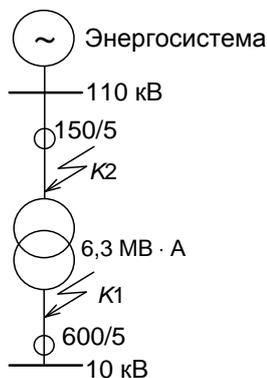


Рис. 1. Однолинейная схема моделируемой сети

Тормозная характеристика моделируемой дифференциальной защиты показана на рис. 2, тормозной и дифференциальный токи приведены к номинальному току трансформатора. Первый горизонтальный участок характеристики задается уставкой $I_{d>}$, равной 0,34 о. е. Характеристика имеет два наклонных участка: первый с наклоном 14° предназначен для отстройки от токов небаланса, возникающих при рабочих токах нагрузки и нормальной перегрузки,

второй с наклоном 20° – для отстройки от токов небаланса, возникающих при токах КЗ. Заданы уставки блокировки по второй гармонике – 14 %, блокировки по пятой гармонике – 40 %. Второй горизонтальный участок характеристики определяется уставкой дифференциальной отсечки без торможения $I_{d>>}$, равной 9,17 о. е. Дифференциальная отсечка срабатывает при превышении дифференциальным током уставки $I_{d>>}$ и не имеет блокировок по второй и пятой гармоникам.

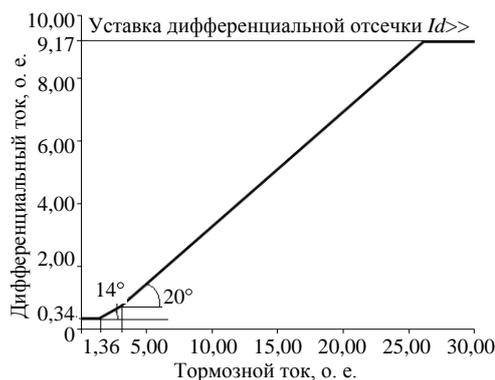


Рис. 2. Тормозная характеристика

На осциллограммах аварийных процессов, полученных с помощью математического моделирования, показаны вторичные токи ТТ трех фаз стороны 110 кВ (I_1) трансформатора, блокировки по второй гармонике $Block G2$ по трем фазам, блокировки по пятой гармонике $Block G5$ по трем фазам, сигналы работы определителя внешних повреждений EXT , сигналы срабатывания измерительных органов MU по трем фазам, срабатывания дифференциальной ступени с торможением $Trip Id>$ по трем фазам, срабатывания дифференциальной отсечки $Trip Id>>$ по трем фазам. При всех видах КЗ в точках $K1$ и $K2$ понижающего трансформатора (рис. 1) токи КЗ протекают только через ТТ стороны 110 кВ, при этом токи через ТТ стороны 10 кВ равны 0 и не показаны на осциллограммах аварийных процессов.

Осциллограммы внутреннего однофазного КЗ в точке $K2$, полученные с помощью математического моделирования, представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, ТТ в фазе A работает в режиме насыщения, при этом ток в фазе A имеет характерные искажения и содержит в значительном количестве вторую гармонику. Глубокое насыщение ТТ в фазе A приводит к срабатыванию блокировки по второй гармонике (сигнал $Block G2_a$) и запрету работы дифференциальной ступени с торможением по фазе A .

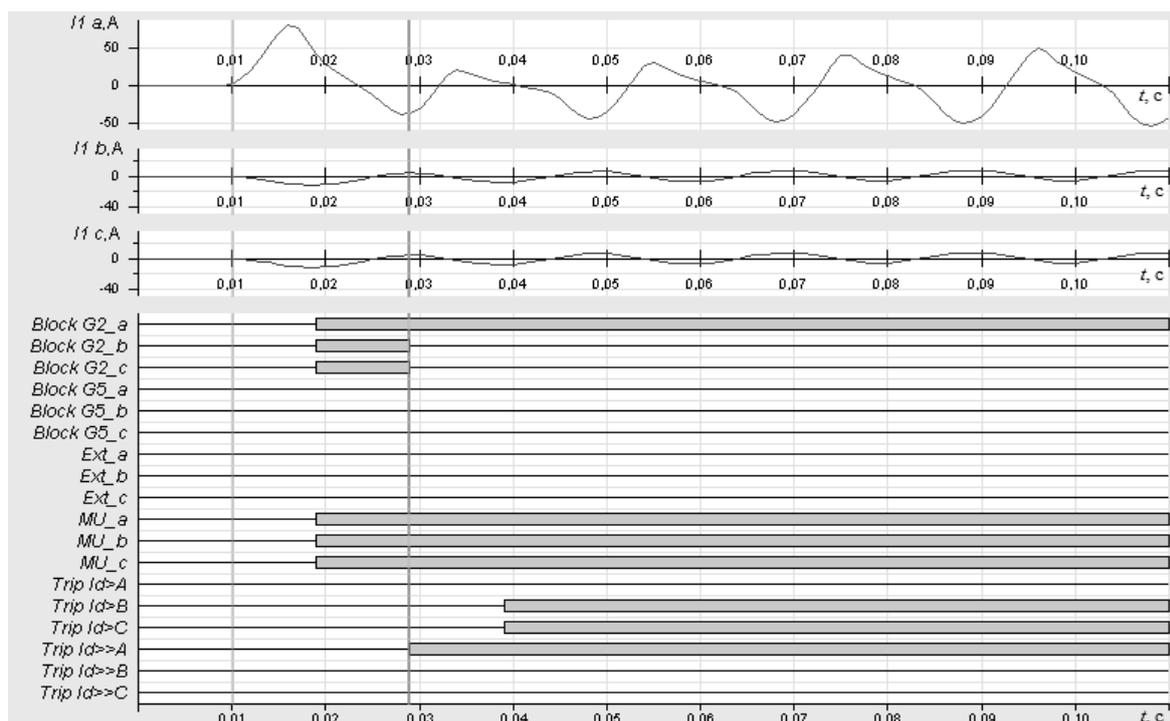


Рис. 3. Осциллограммы внутреннего однофазного КЗ в точке К2

Однако срабатывает дифференциальная отсечка без торможения в фазе *A* (сигнал *Trip Id>>A*) и формируется команда на отключение трансформатора. Собственное время работы дифференциальной защиты составляет 19 мс.

Токи фаз *B* и *C* подпитывают точку КЗ через заземленную нейтраль трансформатора и имеют достаточную величину, чтобы привести к срабатыванию дифференциальной ступени с торможением по данным фазам (сигналы *Trip Id>B* и *Trip Id>C*). Наличие блокировок по второй гармонике в фазах *B* и *C* (*Block G2_b* и *Block G2_c*) в начальный момент КЗ обусловлено реализацией цифрового фильтра [3]. Для расчета цифрового фильтра используется окно шириной 20 мс. В первый период режима КЗ окно расчета включает в себя как предаварийный режим, так и аварийный, что приводит к определению наличия второй гармоники тока.

Осциллограммы внутреннего двухфазного КЗ на землю в точке *K2* представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, токи в фазах *A* и *B* имеют характерные для режима насыщения искажения, при этом ток в фазе *A* искажен в большей степени, что обусловлено действием апериодической составляющей. Глубокое насыщение ТТ в фазе *A* приводит к срабатыванию блокировки по второй гармонике (*Block G2_a*) и запрету работы дифференциальной ступени с торможением по фазе *A*. При этом величина тока в фа-

зах *A* и *B* достаточна для срабатывания дифференциальной отсечки в фазах *A* и *B* (*Trip Id>>A*, *Trip Id>>B*). Собственное время работы дифференциальной защиты составляет 19 мс.

Наличие блокировок по второй гармонике в фазах *B* и *C* (*Block G2_b* и *Block G2_c*) в начальный момент КЗ обусловлено переходным режимом. Через 10 мс после появления сигналы *Block G2_b* и *Block G2_c* сбрасываются.

Форма тока в фазе *B* близка к синусоидальной, содержание второй гармоники недостаточно для длительного существования сигнала *Block G2_b*, работа дифференциальной ступени с торможением разрешается, и формируется сигнал *Trip Id>B*. Ток фазы *C* подпитывает точку КЗ через заземленную нейтраль трансформатора и имеет достаточную величину для срабатывания дифференциальной ступени с торможением (сигнал *Trip Id>C*).

Осциллограммы внутреннего двухфазного КЗ в точке *K1* представлены на рис. 5. При повреждении на выводах 10 кВ в точке *K1* сопротивление трансформатора ограничивает токи КЗ, при этом ТТ работают в линейной части характеристики намагничивания и вторичные токи ТТ имеют синусоидальную форму (рис. 5). Наличие токов КЗ во всех трех фазах на стороне 110 кВ обусловлено распределением линейных токов двух замкнувшихся фаз в фазных обмотках треугольника стороны 10 кВ.

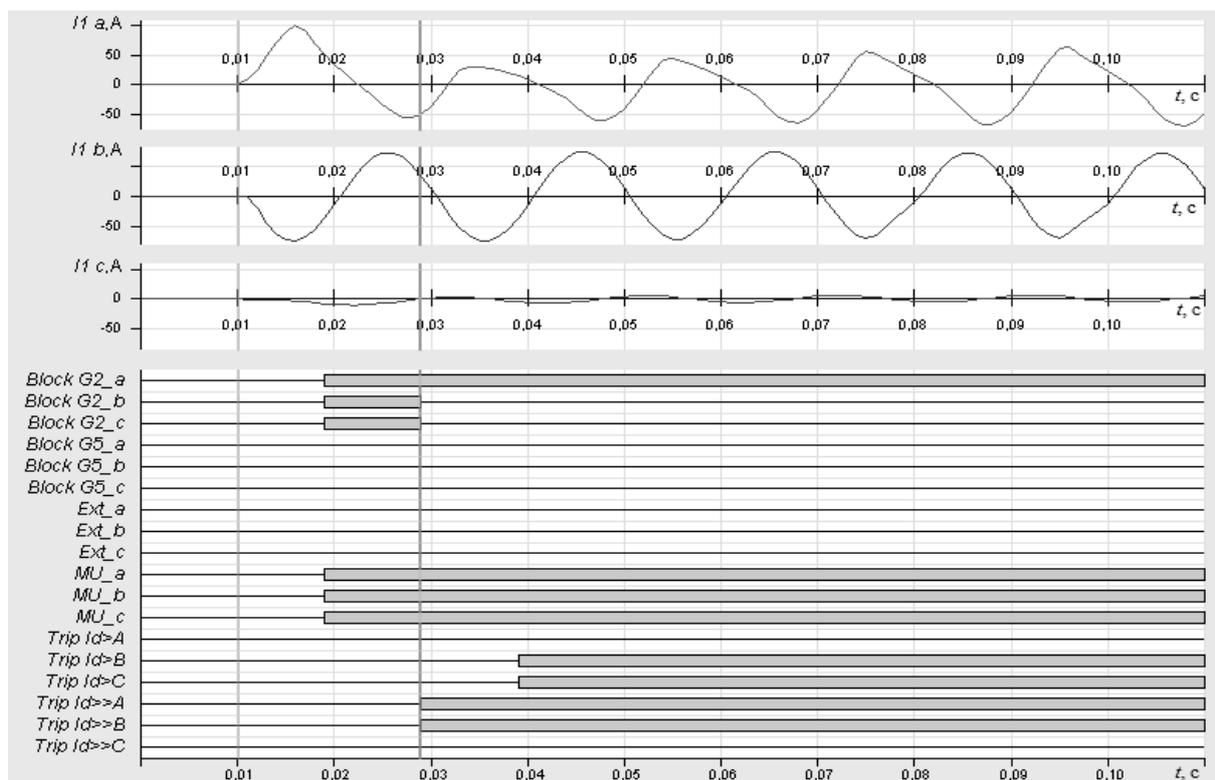


Рис. 4. Осциллограммы внутреннего двухфазного КЗ на землю в точке K2

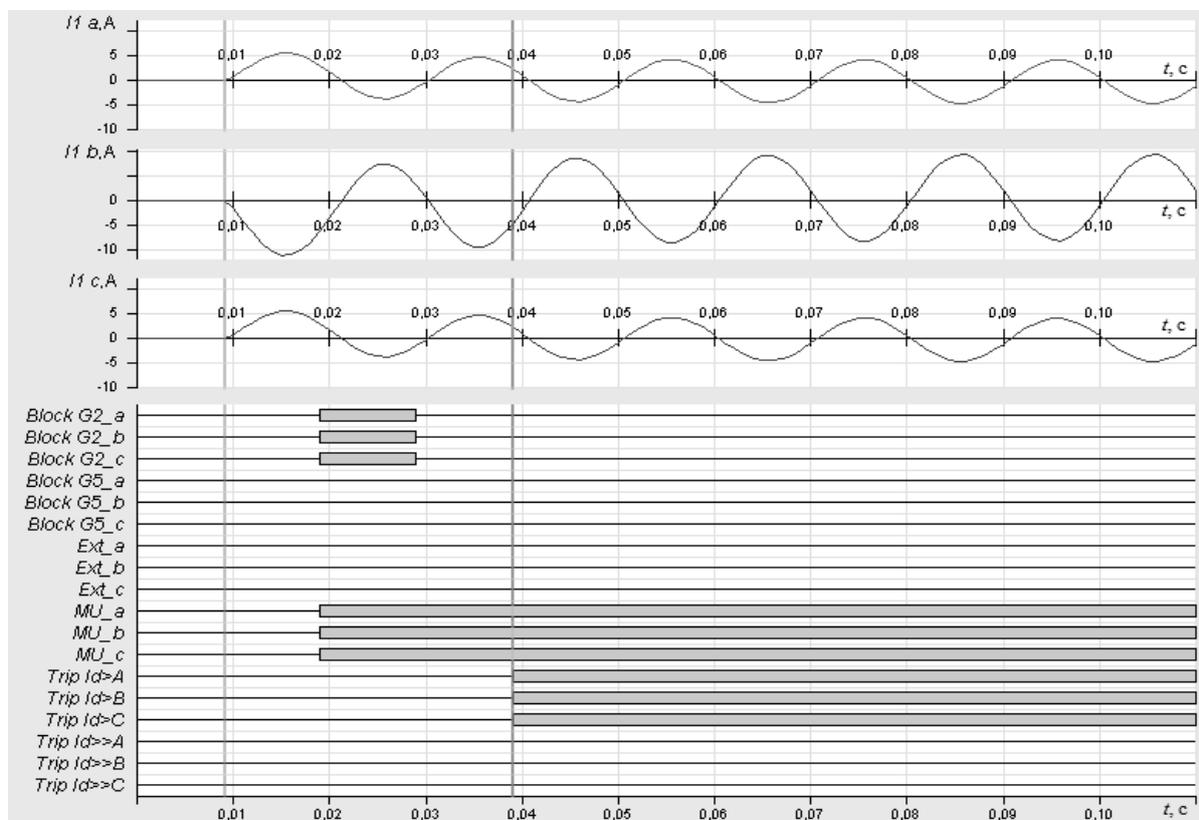


Рис. 5. Осциллограммы внутреннего двухфазного КЗ в точке K1

Как видно из рис. 5, в начальный момент КЗ формируются сигналы блокировки по второй гармонике в фазах *A*, *B* и *C* (*Block G2_a*, *Block G2_b* и *Block G2_c*). Одновременно с блокировками появляется сигнал срабатывания измерительных органов в трех фазах дифференциальной ступени с торможением (*MU_a*, *MU_b*, *MU_c*). Через 10 мс после пропадания сигналов блокировки срабатывает дифференциальная ступень с торможением в трех фазах (сигналы *Trip Id>A*, *Trip Id>B* и *Trip Id>C*) с действием на отключение трансформатора. Собственное время работы дифференциальной защиты составляет 30 мс.

Осциллограммы внутреннего трехфазного КЗ в точке *K2* представлены на рис. 6. Как видно, форма токов в фазах *A* и *C* искажена, что обусловлено действием апериодической составляющей и насыщением ТТ. В фазах *A* и *C* срабатывают блокировки по второй гармонике (*Block G2_a* и *Block G2_c*) и запрещают работу дифференциальной ступени с торможением в данных фазах. Большая величина тока КЗ приводит к срабатыванию дифференциальной от-

сечки без торможения в трех фазах (*Trip Id>>A*, *Trip Id>>B* и *Trip Id>>C*) с действием на отключение трансформатора. Собственное время работы дифференциальной отсечки составило 20 мс. Через 10 мс срабатывает дифференциальная ступень с торможением в фазе *B* (*Trip Id>B*), в начальный период КЗ заблокирована сигналом *Block G2_b*.

Осциллограммы внутреннего трехфазного КЗ в точке *K1* представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что в начальный момент КЗ формируются сигналы блокировки по второй гармонике в фазах *A*, *B* и *C* (*Block G2_a*, *Block G2_b* и *Block G2_c*). Это обусловлено переходным режимом. Одновременно с блокировками появляется сигнал срабатывания измерительных органов в трех фазах дифференциальной ступени с торможением (*MU_a*, *MU_b*, *MU_c*). Через 10 мс после пропадания сигналов блокировки срабатывает дифференциальная ступень с торможением в трех фазах (сигналы *Trip Id>A*, *Trip Id>B* и *Trip Id>C*) с действием на отключение трансформатора. Собственное время работы дифференциальной защиты составляет 30 мс.

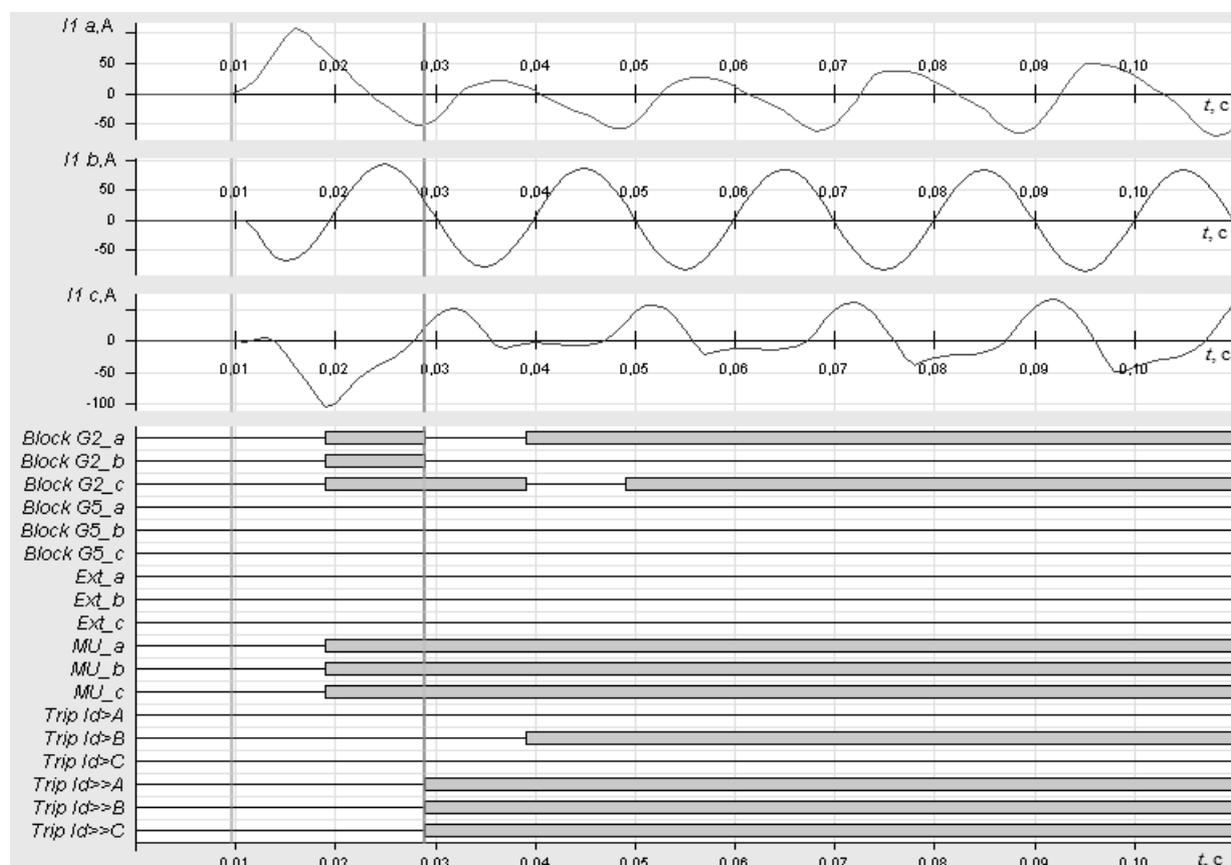


Рис. 6. Осциллограммы внутреннего трехфазного КЗ в точке *K2*

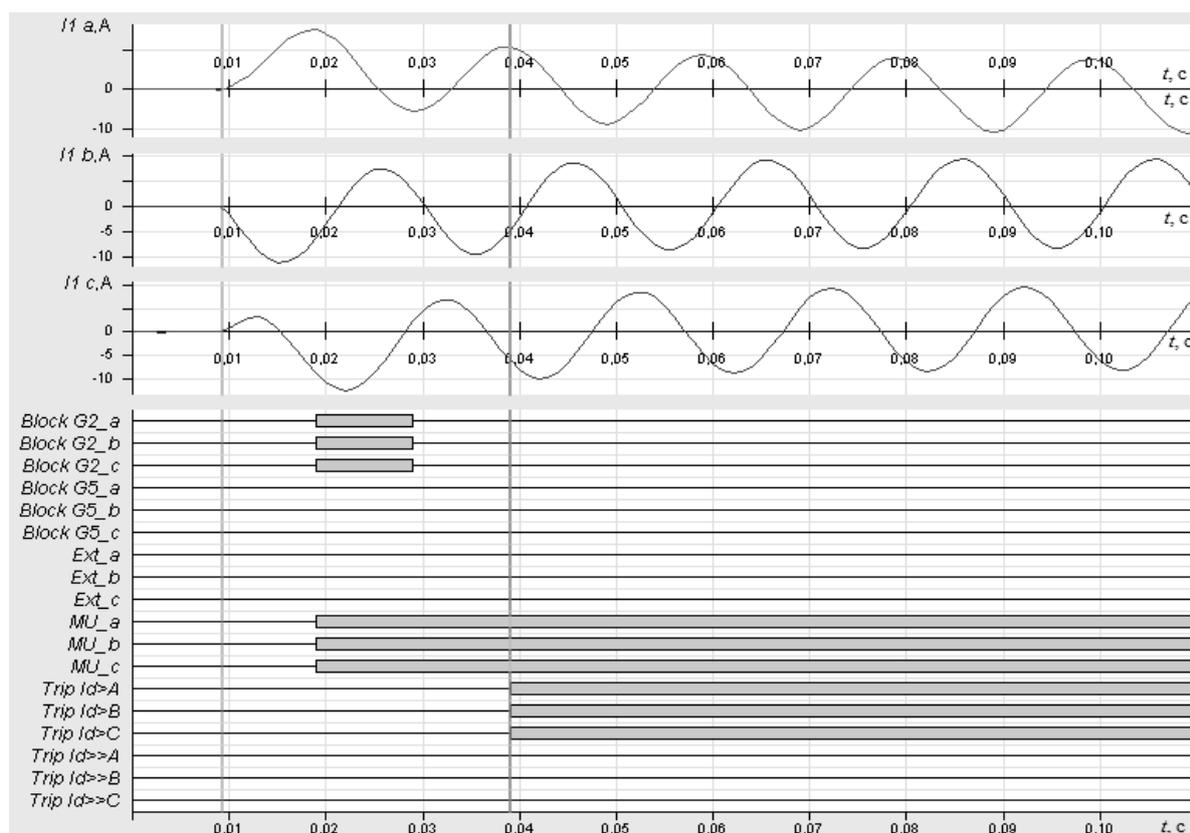


Рис. 7. Осциллограммы внутреннего трехфазного КЗ в точке K1

ВЫВОДЫ

В статье представлено исследование функционирования дифференциальной защиты понижающего трансформатора 110 кВ при внутренних повреждениях методом вычислительного эксперимента. Рассмотрены режимы внутренних одно-, двух-, двухфазного на землю и трехфазного КЗ, в том числе повреждений, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока.

Во всех режимах КЗ дифференциальная защита правильно определила режим внутреннего повреждения и сформировала команды отключения трансформатора. Анализ опытов КЗ показал, что:

- при насыщении ТТ и искажении формы токов возможен отказ дифференциальной ступени с торможением из-за блокировки по второй гармонике (применяемой для определения режимов БТН), при этом надежность работы защиты в целом обеспечивается срабатыванием дифференциальной отсечки без торможения;
- собственное время работы дифференциальной отсечки составляет не более 20 мс;
- собственное время работы дифференциальной ступени с торможением составляет не более 30 мс.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Романюк, Ф. А.** Микропроцессорная защита силовых понижающих трансформаторов / Ф. А. Романюк, С. П. Королев, М. С. Ломан // Энергетика... Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 5. – С. 5–10.
2. **Ковалевский, А. В.** Натурные испытания устройства дифференциальной защиты трансформатора / А. В. Ковалевский, М. С. Ломан // Релейщик. – 2010. – № 4. – С. 32–35.
3. **Романюк, Ф. А.** Формирование ортогональных составляющих контролируемых величин в микропроцессорной защите понижающего трансформатора / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан // Энергетика... Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 4. – С. 5–9.

REFERENCES

1. **Romaniuk, F. A.** Microprocessor Protection of Power Reducing Transformers / F. A. Romaniuk, S. P. Korolev, M. S. Loman // Energetika – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. – 2011. – No 5. – P. 5–10.
2. **Kovalevsky, A. V.** Field Tests of Devices for Differential Protection of Transformer / A. V. Kovalevsky, M. S. Loman // Releystchik (Protection Engineer). – 2010. – No 4. – P. 32–35.
3. **Romaniuk, F. A.** Formation of Orthogonal Controlled Value Components in Micro-Processor Protection of Power Reducing Transformer / F. A. Romaniuk, M. S. Loman // Energetika – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. – 2012. – No 4. – P. 5–9.

Поступила 09.10.2013