

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.314.222.6 : 621.316.925

**ЛОМАН**  
**Михаил Степанович**

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА**  
**СИЛОВЫХ Понижающих ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

Минск 2015

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный  
руководитель

**Романюк Федор Алексеевич**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе Белорусского национального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**Русан Викентий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Практическая подготовка студентов» Белорусского государственного аграрного технического университета;

**Калентиюк Евгений Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая  
организация

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»

Защита состоится «18» декабря 2015 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-71-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «3» ноября 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д02.05.02  
доктор технических наук, профессор

Сергей И.И.

© Ломан М.С., 2015

© Белорусский национальный  
технический университет, 2015

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Разработка терминала защит понижающего трансформатора МР801 выполнена в рамках задания № 6 Государственной научно-технической программы «Разработка и освоение методов, технологий, оборудования и систем, обеспечивающих эффективное и устойчивое функционирование топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь» «Энергетика-2010», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 4 января 2006 г. № 5.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов.

Основные задачи исследования:

- проведение анализа возможностей совершенствования существующих микропроцессорных защит силовых трансформаторов;
- разработка основных положений по выполнению микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов;
- разработка алгоритмов функционирования измерительной и логической частей защиты;
- разработка математических моделей ступеней микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов, их исследование методом вычислительного эксперимента и оценка эффективности функционирования;
- реализация разработанных технических решений в микропроцессорном терминале защиты силовых понижающих трансформаторов, оценка их эффективности посредством проведения натурных испытаний.

Объектом исследования являются микропроцессорные защиты силовых трансформаторов.

Предмет исследования – микропроцессорные дифференциальная токовая защита (ДТЗ) и максимальная токовая защита (МТЗ) силовых понижающих трансформаторов.

**Научная новизна** работы заключается:

в предложенных технических и алгоритмических решениях по реализации микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов, направленных на повышение ее технического совершенства;

новом способе блокировки ДТЗ силового понижающего трансформатора на основе оценки отношения приращений дифференциального и тормозного токов, обеспечивающем отстройку от токов небаланса внешних коротких

замыканий (КЗ), сопровождающихся глубоким насыщением трансформаторов тока (ТТ);

новом техническом решении для блокировки токовых защит силового трансформатора на основе контроля отношения тока прямой последовательности 2-й гармоники к току обратной последовательности 1-й гармоники, обеспечивающем отстройку от бросков тока намагничивания (БТН) и отличающим режимы БТН от режимов внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ;

результатах, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований, а также натурных испытаний функционирования ступеней ДТЗ и МТЗ микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Реализация способа блокировки ДТЗ силового понижающего трансформатора на основе оценки отношения приращений дифференциального и тормозного токов, обеспечивающего отстройку от токов небаланса внешних КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением ТТ.

2. Реализация способа блокировки токовых защит силового трансформатора на основе контроля отношения тока прямой последовательности 2-й гармоники к току обратной последовательности 1-й гармоники, обеспечивающего отстройку от БТН и отличающего режим БТН от режима внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ.

3. Реализация ступени ДТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора с блокировками при БТН и внешних КЗ с собственным временем срабатывания не более 30 мс.

4. Реализация ступени МТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора с блокировкой при БТН с собственным временем срабатывания не более 30 мс.

### **Личный вклад соискателя**

Соискателем разработаны:

основные положения по выполнению ступени ДТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора с блокировками при БТН и внешних КЗ;

основные положения по выполнению ступени МТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора с блокировкой при БТН;

методика выбора уставок ступени ДТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора;

математические модели ступеней ДТЗ и МТЗ, проведено их исследование методом вычислительного эксперимента;

алгоритмы функционирования ступеней ДТЗ и МТЗ терминала микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора МР801;

схемы вторичной коммутации и конфигурация терминала микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора МР801 для проведения натурных испытаний, выполнен анализ результатов натурных испытаний.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

Международной научно-технической конференции «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, 2011);

9-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2011);

10-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2012);

11-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2013);

8-й Международной конференции «New electrical and electronic technologies and their industrial implementation» в 2013 г. (Закопане, Республика Польша, 2013);

2-м Белорусско-Корейском форуме «Наука. Инновации. Производство» в 2013 г. (Минск, 2013);

Международной научно-технической конференции «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК» (Минск, 2013);

3-м Форуме вузов инженерно-технологического профиля «Форум проектов программ Союзного государства» в 2014 г. (г. Минск, БНТУ).

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований опубликованы 17 печатных работ, в том числе шесть научных статей (общий объем 2,3 авторского листа) в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, два патента Республики Беларусь на изобретение.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка литературы (96 наименований) и приложения.

Общий объем диссертации составляет 156 страниц. Из них 36 страниц заняты девятью таблицами и 71 рисунком, 10 страниц – списком использованных источников, одна страница – приложением.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** выполнены сравнительная оценка микропроцессорных защит силовых трансформаторов и анализ возможностей их совершенствования.

В белорусской энергосистеме в основном применяются микропроцессорные защиты трансформаторов зарубежных фирм: ABB (терминалы RET 521, RET670); Alstom и ее правопреемников Areva, Schneider Electric (Micom P6xx); GE Multilin (T35, T60), Siemens AG (7UT6xx). В указанных терминалах в качестве основной защиты трансформатора от внутренних КЗ содержится ДТЗ, в качестве резервной – МТЗ. При этом данные терминалы имеют избыточные функции, такие как защита от перегрузки по тепловой модели, защита от перевозбуждения сердечника трансформатора на основе оценки отношения напряжения и частоты, высокоимпедансная дифференциальная защита, дифференциальная защита по обратной последовательности и др. Это повышает их стоимость как за счет программной, так и аппаратной составляющих.

Важной задачей для белорусской энергетики является организация производства импортозамещающей продукции, ориентированной в первую очередь на потребности внутреннего рынка. В этой связи разработка отечественной микропроцессорной защиты понижающих трансформаторов является актуальной проблемой.

На основе проведенного анализа в разрабатываемом микропроцессорном терминале защиты понижающего трансформатора предусматривается следующий комплекс функций:

- ДТЗ, включающая в себя дифференциальную токовую ступень с торможением и дифференциальную токовую ступень (отсечку) без торможения;
- восемь ступеней МТЗ с возможностью пуска по напряжению, направленного действия и привязки к любой стороне трансформатора;
- шесть ступеней от повышения тока нулевой или обратной последовательности с возможностью пуска по напряжению, направленного действия и привязки к любой стороне трансформатора;
- четыре ступени максимальной и четыре ступени минимального напряжения с возможностью возврата по уставке;
- четыре ступени максимальной и четыре ступени минимальной частоты с возможностью возврата по уставке;
- шестнадцать внешних защит, контролирующих состояние трансформатора по внешним сигналам;
- автоматический ввод резерва, автоматическое повторное включения трансформатора;

- автоматика управления выключателем одной из сторон трансформатора с функцией устройства резервирования отказа выключателя;
- свободно программируемая логика.

Наиболее ответственными и сложными в реализации ступенями защиты трансформатора являются ДТЗ и МТЗ. Совершенствование указанных ступеней может в значительной степени повысить надежность микропроцессорной защиты понижающего трансформатора. Основные причины, снижающие надежность, быстродействие и чувствительность ДТЗ и МТЗ трансформатора – токи небаланса при внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, и БТН. Основные направления совершенствования алгоритмов отстройки ДТЗ и МТЗ трансформатора от БТН:

- обеспечение несрабатывания алгоритма обнаружения БТН при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ;
- увеличение чувствительности к характерным признакам БТН.

Алгоритмы отстройки ДТЗ от токов небаланса внешних КЗ на основе интервалов правильной трансформации имеют наибольшую практическую значимость. Направлением их совершенствования является выработка универсального критерия, реагирующего только на характерные признаки внешних КЗ, независимого от уровней тока и не требующего расчета уставок.

**Во второй главе** разработаны основные положения по выполнению ступеней ДТЗ и МТЗ микропроцессорной защиты понижающих трансформаторов, а также методики расчета их уставок.

Тракт формирования ортогональных составляющих (ОС) контролируемых микропроцессорной защитой величин включает в себя: входной датчик, аналоговый фильтр 2-го порядка на операционном усилителе, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой фильтр. В качестве цифрового фильтра применен алгоритм Гёрцеля – специальная реализация дискретного преобразования Фурье, позволяющая вычислить значение одного частотного компонента. Частота фильтрации реализуется по формуле

$$f(k) = \frac{k}{N} f_s, \quad (1)$$

где  $k$  – номер гармоники;

$N$  – число выборок;

$f_s$  – частота дискретизации.

Формула алгоритма Гёрцеля для  $k$ -й гармоники сигнала имеет вид

$$X(k) = \left( \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{N-1} - v_{N-2} \right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{N-1}, \quad (2)$$

$$v_i = x_i + 2 \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)v_{i-1} - v_{i-2}, \quad (3)$$

где  $x_i$  –  $i$ -я выборка сигнала,  $0 \leq i \leq N - 1$ ;  
коэффициенты  $v_{-2} = v_{-1} = 0$ .

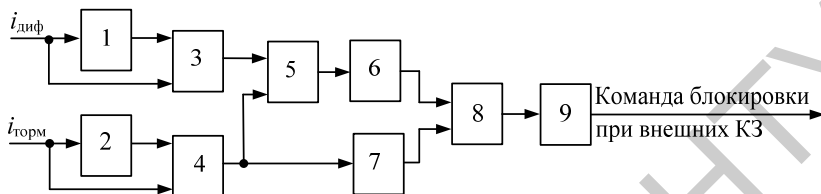
Исследование методом вычислительного эксперимента показало, что предлагаемый тракт формирования ОС контролируемых величин позволяет осуществлять фильтрацию 1-, 2- и 5-й гармоник в течение одного периода промышленной частоты, что достаточно для реализации измерительных органов ступеней защиты понижающего трансформатора. Фильтр 1-й гармоники точно настроен на частоту 50 Гц, однако в диапазоне рабочих частот (47–52 Гц) имеет погрешность до 3 %. Для обеспечения достаточной точности фильтрации целесообразно менять число выборок на период при изменении частоты сети. Фильтр 2-й гармоники полностью подавляет все гармоники, кроме 2-й, выходной сигнал частотой 100 Гц появляется на выходе без ослабления и усиления. При фильтрации 5-й гармоники сигнал ослабляется до величины 97 %, что обусловлено действием аналогового фильтра. При реализации ДТЗ трансформатора ослабление 5-й гармоники должно быть учтено с помощью поправочного коэффициента 1,03.

Для отстройки от ложных срабатываний ДТЗ в режимах внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, предложен новый способ блокировки, основанный на оценке отношения приращений дифференциального и тормозного токов. В режимах внутренних КЗ указанное отношение стремится к 1, в режимах внешних КЗ – к 0. Способ реагирует на характерные особенности режима внешнего КЗ, не требует выбора уставок и обладает высоким быстродействием. Способ прост в реализации при сохранении необходимой точности и не предъявляет высоких требований к вычислительной способности цифрового терминала защиты.

Функциональная схема блокировки ДТЗ при внешних КЗ представлена на рисунке 1. Блоки 1 и 2 осуществляют запоминание и хранение двух предыдущих выборок дифференциального  $i_{\text{диф}}$  и тормозного  $i_{\text{торм}}$  токов соответственно. Блоки 3 и 4 производят определение приращения на двух периодах дискретизации дифференциального и тормозного токов соответственно. Блок 5 производит вычисление отношения приращений дифференциального и тормозного токов на двух периодах дискретизации. Блок 6 сравнивает вышеуказанное отношение с коэффициентом  $K$  на двух периодах дискретизации. Коэффициент  $K$  выбирается из диапазона 0,2–0,3.



Блок 7 определяет периоды нарастания тормозного тока. Элемент 8 «И» проверяет одновременное выполнение условий по блокам 6 и 7. Блок 9 формирует длительность команды запрета действия ДТЗ на время 10 мс, т.е. на длительность полупериода, в котором было обнаружено внешнее КЗ.

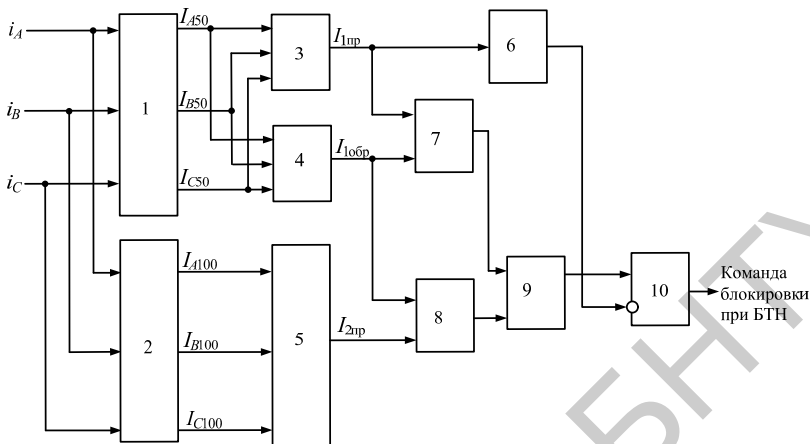


**Рисунок 1. – Функциональная схема блокировки ДТЗ при внешних КЗ**

Для блокировки ДТЗ и МТЗ в режимах БТН предложено новое техническое решение, основанное на оценке отношения тока 2-й гармоники прямой последовательности  $I_{2пр}$  к току 1-й гармоники обратной последовательности  $I_{1обр}$ . Указанное решение обеспечивает большую чувствительность за счет использования тока прямой последовательности 2-й гармоники по сравнению с классической блокировкой по содержанию 2-й гармоники, выполняемой отдельно для трёх фаз. За счет контроля уровня тока прямой последовательности 1-й гармоники  $I_{1пр}$  отличается режим БТН от внутреннего КЗ, сопровождающегося насыщением ТТ, и обеспечивается действие токовых защит на отключение при внутренних повреждениях.

Функциональная схема блокировки (рисунок 2) содержит: частотный фильтр 1 1-й гармоники тока, частотный фильтр 2 2-й гармоники тока, фильтры 3 и 5 прямой последовательности тока, фильтр 4 обратной последовательности тока, блок 6 запрета блокировки на основе контроля тока  $I_{1пр}$ , блок 7 контроля содержания тока обратной последовательности 1-й гармоники, блок 8 расчета и контроля параметра блокировки при БТН  $I_{2пр}/I_{1обр}$ , элемент 9 логическое «И», элемент 10 «Запрет».

**В третьей главе** приведены результаты исследования функционирования ступеней ДТЗ и МТЗ микропроцессорной защиты понижающих трансформаторов в режимах включения ненагруженного трансформатора под напряжение, внутренних и внешних КЗ всех видов. Исследование выполнено методом вычислительного эксперимента с применением математических моделей ДТЗ и МТЗ и компьютерных программ на их основе.



**Рисунок 2. – Функциональная схема блокировки токовых защит при БТН**

Математическая модель ДТЗ включает в себя модели входных датчиков тока и аналогового фильтра 2-го порядка с частотой среза 1 кГц; модель цифрового фильтра ортогональных составляющих (1-, 2- и 5-й гармоник тока) на основе алгоритма Гёрцеля; приведение токов по фазе и амплитуде; расчет тормозного и дифференциального токов; блокировку от перевозбуждения трансформатора на основе оценки 5-й гармоники; расчет дифференциальной ступени с торможением; расчет дифференциальной отсечки; алгоритм блокировки при внешних КЗ; алгоритм блокировки при БТН.

Математическая модель МТЗ включает в себя модели входных датчиков тока и аналогового фильтра 2-го порядка с частотой среза 1 кГц; модель цифрового фильтра ортогональных составляющих (1-й и 2-й гармоник тока); алгоритм блокировки при БТН.

В результате каждого опыта включения ненагруженного трансформатора 110/10 кВ под напряжение были получены зависимости предлагаемого  $I_{2пр}/I_{1обр}$  и известного (по содержанию 2-й гармоники в токах фаз –  $I_{A100}/I_{C50}$ ,  $I_{B100}/I_{B50}$  и  $I_{C100}/I_{C50}$ ) параметров блокировки от времени. Во всех проведенных опытах параметры блокировки в первый период после возникновения БТН имеют ярко выраженный минимум (рисунок 3), который определяет их минимальную чувствительность.

Блокировка при БТН по содержанию 2-й гармоники может быть реализована в пофазном или в перекрестном режимах, во втором случае срабатывание блокировки в любой фазе приводит к блокировке двух остальных.

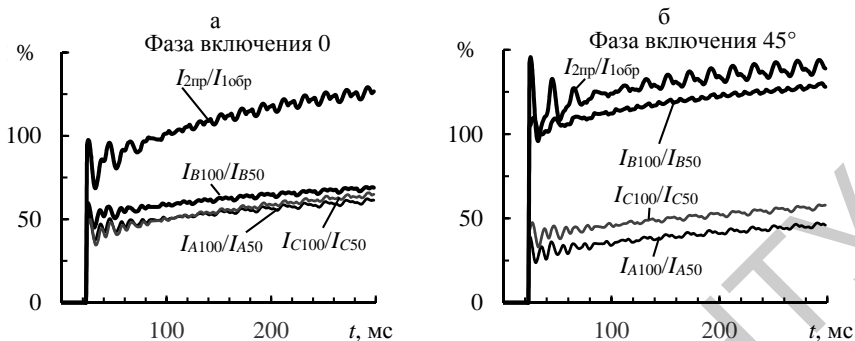
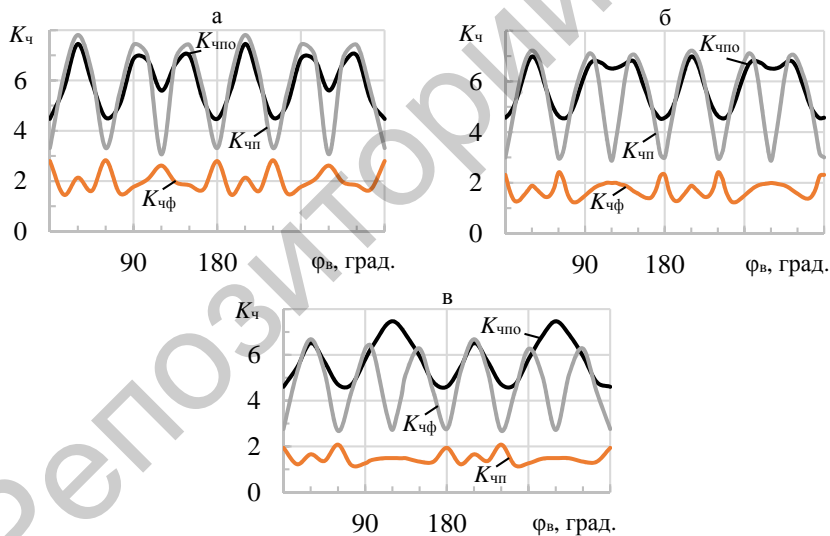


Рисунок 3. – Зависимость параметра блокировки от времени при включении трансформатора 6,3 МВ·А на номинальное напряжение

На рисунке 4 показаны зависимости чувствительности  $K_{чпо}$  предлагаемого параметра блокировки и известного – в пофазном  $K_{чф}$  и перекрестном  $K_{чп}$  режимах.



*a* – на напряжение 90% от номинального; *б* – на номинальное напряжение; *в* – на напряжение 110% от номинального

Рисунок 4. – Зависимость чувствительности параметров блокировки от фазы питающего напряжения при включении ненагруженного трансформатора

Как видно из рисунка 4, чувствительность предлагаемого параметра блокировки  $I_{2пр}/I_{1обр}$ :

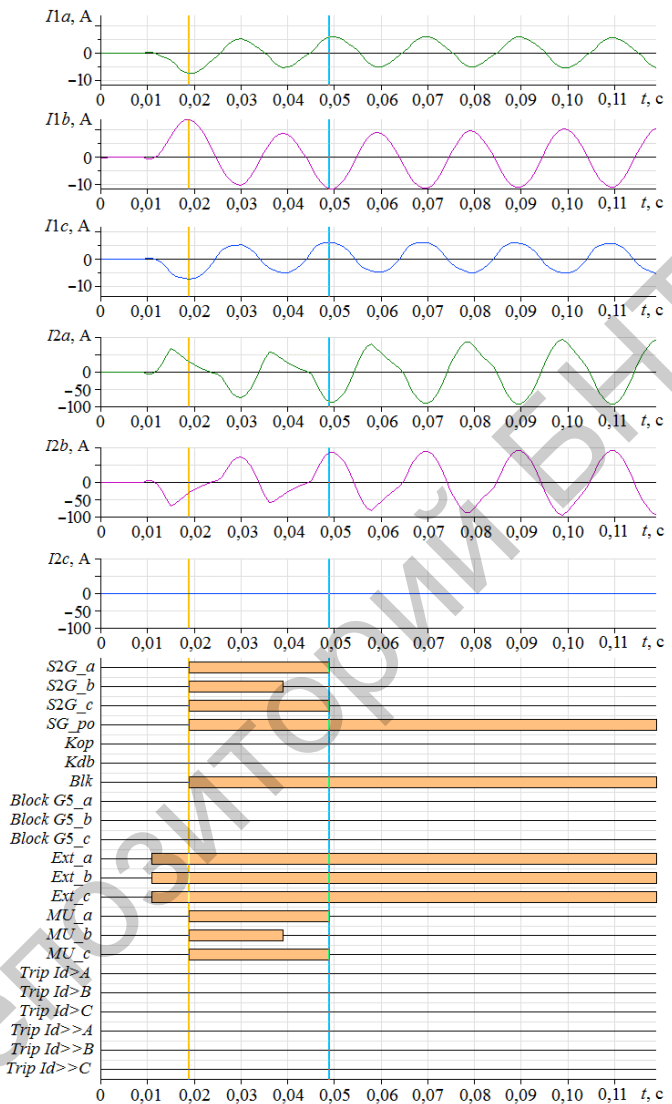
1) в 1,6–5,0 раза выше чувствительности пофазной блокировки по содержанию 2-й гармоники в токах фаз;

2) на отдельных участках находится на уровне чувствительности перекрестной блокировки по содержанию 2-й гармоники в токах фаз, а на отдельных участках – существенно выше её.

Диапазон изменения минимальной величины параметра блокировки  $I_{2пр}/I_{1обр}$  составил 67,2–112,2 %, диапазон изменения минимальной величины параметра перекрестной блокировки 40,3–117,1 %. Таким образом, параметр блокировки  $I_{2пр}/I_{1обр}$  обладает большей стабильностью и более эффективен для обнаружения БТН, чем параметр перекрестной блокировки.

На рисунке 5 представлена полученная методом вычислительного эксперимента осциллограмма внешнего двухфазного КЗ и сигналов функционирования ДТЗ, где  $I_1$  и  $I_2$  – вторичные токи ТТ в трёх фазах стороны 110 и 10 кВ трансформатора соответственно;  $S2G$  – сигналы содержания 2-й гармоники выше 15 % по трём фазам;  $SG_{po}$  – сигнал, показывающий, что отношение  $I_{2пр}/I_{1обр}$  выше 15 %;  $Kop$  – сигнал, показывающий низкое содержание (менее 25 %) 1-й гармоники тока обратной последовательности  $I_{1обр}$ ;  $Kdb$  – сигнал запрета блокировки при БТН при величине 1-й гармоники тока прямой последовательности выше 8 номинальных токов силового трансформатора;  $Blk$  – сигнал блокировки токовой защиты при БТН;  $Block G5$  – сигналы блокировки по 5-й гармонике по трём фазам;  $EXT$  – сигналы блокировки при внешних КЗ по трем фазам;  $MU$  – сигналы срабатывания измерительных органов по трем фазам;  $Trip Id>$  – сигналы срабатывания дифференциальной ступени с торможением по трём фазам;  $Trip Id>>$  – сигналы срабатывания дифференциальной отсечки по трём фазам.

В начальный период КЗ ТТ в поврежденных фазах  $A$  и  $B$  стороны 10 кВ работают в режиме насыщения (рисунок 5), при этом через 10 мс после возникновения КЗ срабатывает измерительный орган дифференциальной ступени с торможением  $MU$ . Срабатывание измерительного органа  $MU$  в трёх фазах обусловлено приведением по фазе токов низкой стороны, имеющей схему соединений Д. Сигналы блокировки при внешних КЗ  $Ext_a$ ,  $Ext_b$  и  $Ext_c$ , возникающие через 2 мс после начала КЗ, запрещают срабатывание ДТЗ. Сигналы блокировки  $Ext$  существуют в течение всей длительности режима внешнего двухфазного КЗ, что обуславливает надежную отстройку от токов небаланса.



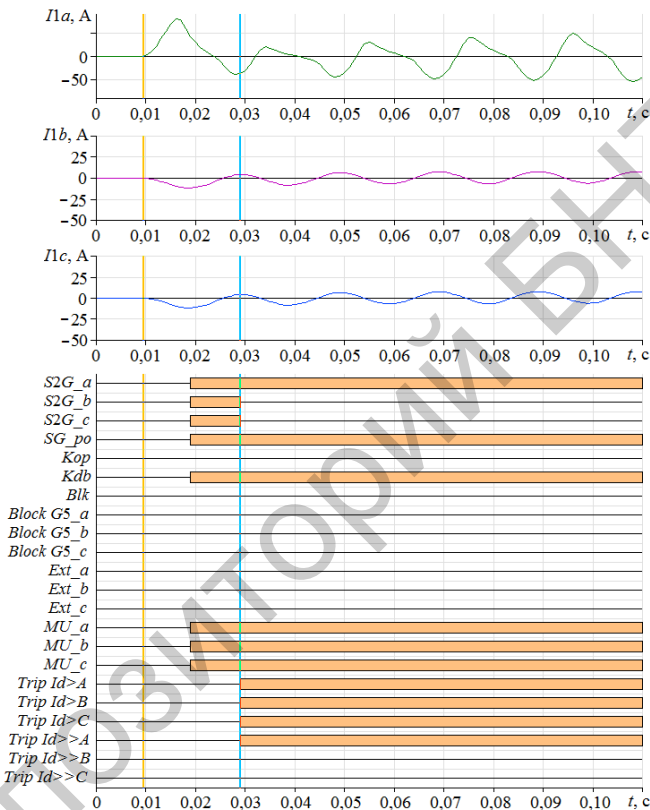
**Рисунок 5. – Осциллограмма режима внешнего двухфазного КЗ**

Исследования ДТЗ в режимах внешних КЗ всех видов, сопровождающихся насыщением ТТ и значительными токами небаланса, показали:

- 1) ДТЗ не срабатывает ложно в указанных режимах;

2) время срабатывания алгоритма блокировки при внешнем КЗ составляет не более 2 мс.

На рисунке 6 представлена полученная методом вычислительного эксперимента осциллограмма внутреннего однофазного КЗ и сигналов функционирования ДТЗ.



**Рисунок 6. – Осциллограмма внутреннего однофазного КЗ на выводах 110 кВ**

ТТ в фазе  $A$  работает в режиме насыщения, при этом ток  $I_a$  в фазе  $A$  имеет характерные искажения и содержит в значительном количестве 2-ю гармонику (см. рисунок 6). В случае использования критерия блокировки при БТН на основе содержания 2-й гармоники в токах фаз срабатывание измерительного органа было бы избыточно заблокировано сигналами  $S2G_a$ ,  $S2G_b$  и  $S2G_c$ . Применение предлагаемого алгоритма блокировки при БТН обеспечивает разблокировку ДТЗ при значительных токах по-

вреждения (сигнал *Kdb*). В течение 10 мс после возникновения КЗ срабатывает измерительный орган дифференциальной ступени с торможением в трех фазах (сигналы *MU\_a*, *MU\_b* и *MU\_c*). Еще через 10 мс формируются сигналы срабатывания дифференциальной токовой защиты с торможением по трем фазам (*Trip Id>A*, *Trip Id>B* и *Trip Id>C*) и сигнал срабатывания дифференциальной отсечки по поврежденной фазе *A Trip Id>>A*. Собственное время работы дифференциальной защиты составляет 20 мс.

Исследования ДТЗ в режимах внутренних КЗ всех видов показали:

- 1) ДТЗ трансформатора надежно срабатывает в режимах внутренних КЗ, при этом собственное время срабатывания не превышает 30 мс;
- 2) применение алгоритма блокировки при БТН не приводит к замедлению срабатывания ДТЗ при внутренних повреждениях, в том числе сопровождающихся насыщением ТТ.

На рисунке 7 представлена полученная методом вычислительного эксперимента осциллограмма трехфазного КЗ и сигналов функционирования МТЗ, где *MU* – сигналы срабатывания измерительных органов МТЗ по трем фазам; *Trip I>* – сигналы срабатывания МТЗ по трём фазам.

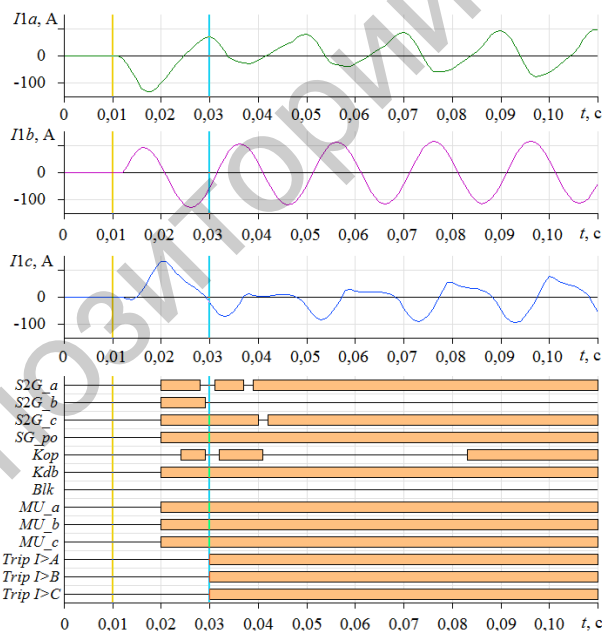


Рисунок 7. – Осциллограмма трехфазного КЗ на выводах 110 кВ

При трехфазном КЗ на выводах 110 кВ трансформатора (рисунок 7) ТТ фаз *A* и *C* работают в режиме насыщения, что приводит к появлению 2-й гармоники (сигналы *SG\_a* и *SG\_c*) в токах *Ia* и *Ic*. Через 10 мс после начала КЗ формируется сигнал *SG\_po* критерия блокировки при БТН. В симметричных режимах, в том числе в режиме трёхфазного КЗ с токами синусоидальной формы, 1-я гармоника тока обратной последовательности близка к нулю и сигнал *Kop* должен находиться в состоянии логической единицы. Но искажения токов фаз *A* и *C* обуславливают нестабильный характер сигнала *Kop*. Однако, появление сигнала блокировки *Blk* надежно запрещается сигналом *Kdb*. При этом ступень МТЗ определяет режим КЗ, формирует сигналы на отключение трансформатора (*Trip I>A*, *Trip I>B* и *Trip I>C*).

Исследования МТЗ в режимах КЗ всех видов показали:

- 1) МТЗ трансформатора надежно срабатывает в режимах КЗ, при этом собственное время срабатывания не превышает 30 мс;
- 2) применение алгоритма блокировки при БТН не приводит к замедлению срабатывания МТЗ при внутренних повреждениях, в том числе сопровождающихся насыщением ТТ.

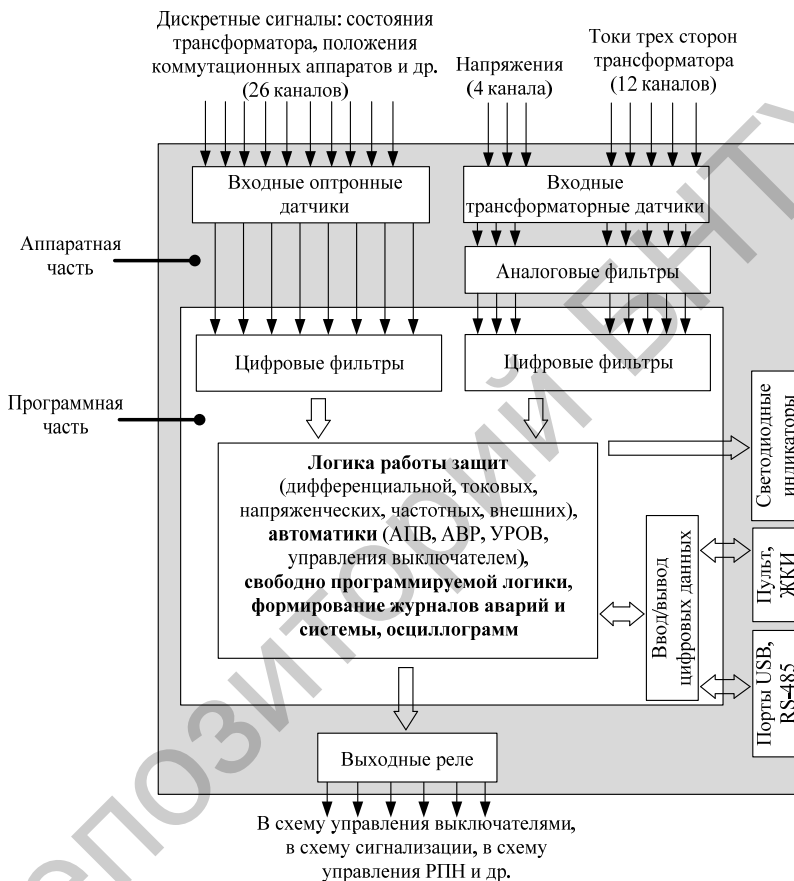
**В четвертой главе** изложены общие принципы построения терминала защиты силового понижающего трансформатора МР801, особенности его конструктивного исполнения, приведены результаты натурных испытаний и опытной эксплуатации.

Функциональная структура терминала представлена на рисунке 8. МР801 включает в себя 12 токовых, 4 напряженческих и 26 дискретных входов и обеспечивает контроль до трёх плеч защищаемого трансформатора. Входные сигналы тока и напряжения трансформируются на входных датчиках в сигналы напряжения, которые после аналоговой фильтрации преобразуются в цифровой сигнал на 16-разрядном АЦП. В терминале применены аналоговые фильтры 2-го порядка с частотой среза 1 кГц. Для обеспечения необходимой точности измерений и скорости обработки сигнала выбрана частота дискретизации 20 выборок на период (1 кГц). Расчет действующего значения осуществляется в 10-миллисекундном цикле. В результате расчетов формируются массивы данных токов сторон трансформатора, дифференциального (частоты 50, 100, 250 Гц), тормозного токов, а также фазных и линейных напряжений.

На основе полученных данных реализуется работа ДТЗ и МТЗ, токовых защит нулевой и обратной последовательностей, защит минимального и максимального напряжения, защит минимальной и максимальной частоты, автоматики и свободно программируемой логики. Результаты работы логики защит и автоматики могут быть выведены на выходные реле, светодиодные индикаторы, а также выданы в порты связи: RS-485 (с верхним уровнем автоматизированных систем управления) и USB (применяется для



конфигурирования и наладки терминала). Для контроля нормальных и аварийных событий терминал формирует журналы системы и аварий, осциллограммы аварийных процессов.



**Рисунок 8. – Структура терминала МР801**

Натурные испытания микропроцессорной защиты понижающего трансформатора МР801 были проведены на ПС 110/10 «Синявка» филиала «Столбцовские электрические сети» РУП «Минскэнерго» на трансформаторе Т2 мощностью 6,3 МВ·А 110/10 кВ.

Цель испытаний: проверка поведения терминала МР801 в реальных условиях – несрабатывания его ДТЗ и МТЗ при БТН, несрабатывания ДТЗ при различных видах сквозных коротких замыканий на стороне 10 кВ си-

лового трансформатора (в том числе в режиме насыщения ТТ низкой сторона). Для ее достижения были проведены следующие опыты:

- 1) включение ненагруженного трансформатора под напряжение;
- 2) включение трансформатора на внешнее двухфазное КЗ в сети 10 кВ;
- 3) включение трансформатора на внешнее трехфазное КЗ в сети 10 кВ.

Результаты натурного эксперимента показали:

1) МТЗ трансформатора правильно функционирует в наиболее характерных режимах для оценки ее работы:

- не срабатывает ложно в режиме БТН при включении ненагруженного силового трансформатора под напряжение
- при внешних КЗ правильно срабатывает измерительный орган МТЗ.

2) ДТЗ терминала МР801 правильно функционирует в режимах с наибольшими токами небаланса:

- не срабатывает ложно в режимах внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ;

- не срабатывают ложно в режиме БТН при включении ненагруженного силового трансформатора под напряжение.

При сравнении результатов натурных испытаний терминала защиты с результатами вычислительного эксперимента было установлено:

1) математические модели, примененные в вычислительном эксперименте, имеют погрешность по току не более 11 % и показывает идентичные натурным испытаниям результаты работы логической части ДТЗ;

2) компьютерные программы, выполненные на базе данных математических моделей, могут быть использованы для проверки работы ДТЗ в широком спектре режимов, в том числе в режимах, которые не могут быть реализованы при натурных испытаниях из-за опасности повреждения дорогостоящего оборудования.

После проведения натурных испытаний четыре устройства МР801 были внедрены в опытную эксплуатацию, за время которой зафиксирована правильная работа (действие на отключение при КЗ в защищаемой зоне) и отсутствие неправильных действий (ложных срабатываний и несрабатываний при внутренних КЗ) терминала МР801.

К концу 2014 г. выпущено 127 терминалов МР801, из них не менее 92 введены в эксплуатацию на объектах ГПО «Белэнерго».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнен комплекс исследований, направленных на разработку микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов, что позволяет решить важную прикладную проблему оснащения объектов электроэнергетики отечественными микропроцессорными тер-

миналами защиты. Наиболее существенные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Разработаны основные положения по выполнению ступеней ДТЗ и МТЗ микропроцессорной защиты силового понижающего трансформатора с собственным временем срабатывания не более 30 мс, что находится на уровне зарубежных аналогов [1, 2, 10, 13].

2. Разработан новый способ блокировки ДТЗ при внешних КЗ, являющийся предметом изобретения и отличающийся тем, что в качестве контролируемого параметра блокировки используется отношение производных дифференциального и тормозного токов фазы. Реализация способа повышает надежность отстройки от ложных срабатываний ДТЗ силового трансформатора при внешних КЗ. За счет реагирования на характерные особенности этих режимов не требует выбора уставок, обладает высоким быстродействием, составляющим не более 2 мс, что соответствует уровню лучших зарубежных аналогов [3, 8, 11, 14, 15, 16].

3. Разработано новое техническое решение для блокировки токовых защит при БТН, составившее предмет изобретения и отличающееся тем, что в указанном решении в качестве контролируемого параметра блокировки используется отношение тока прямой последовательности 2-й гармоники к току обратной последовательности 1-й гармоники. Реализация решения повышает надежность отстройки от ложных срабатываний МТЗ и ДТЗ силового трансформатора при БТН. За счет использования симметричных составляющих 1-й и 2-й гармоник тока параметр блокировки обладает в 1,6–5,0 раз большей чувствительностью по сравнению с блокировкой по содержанию 2-й гармоники в токах фаз в пофазном режиме работы и характеризуется большими стабильностью и эффективностью по сравнению с блокировкой по содержанию 2-й гармоники в токах фаз в перекрестном режиме работы. Предлагаемое решение обеспечивает действие токовых защит на отключение при внутренних повреждениях без замедления срабатывания [4, 5, 6, 17].

4. Результаты выполненных исследований реализованы в микропроцессорном терминале защиты силового понижающего трансформатора МР801, натурные испытания и опытная эксплуатация которого подтверждают эффективность разработанных методов и технических решений [7, 9, 12].

5. Основные научные результаты работы и ее практические положения имеют существенное значение для обеспечения надежного электроснабжения за счет использования микропроцессорной защиты трансформаторов, устойчиво функционирующей при воздействии токов небаланса внешних КЗ и БТН [3, 6, 16, 17].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

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. 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.

3. Романюк, Ф.А. Исследование микропроцессорной дифференциальной защиты понижающего трансформатора / Ф.А. Романюк, М.С. Ломан // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 81–86.

4. Романюк, Ф.А. Исследование алгоритма блокировки токовых защит трансформатора в режимах броска тока намагничивания / Ф.А. Романюк, М.С. Ломан, А.С. Гвоздицкий // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 2. – С. 5–10.

5. Romaniuk, F.A. Blocking algorithm from magnetization current inrush for current protections / F.A. Romaniuk, M.S. Loman // Science and Technics. – 2014. – № 3. – P. 52–55.

6. Loman, M.S. Investigation of microprocessor transformer overcurrent protection in fault modes / M.S. Loman // Science and Technics. – 2014. – № 3 – P. 74–77.

### Статьи в других изданиях

7. Ломан, М.С. Натурные испытания устройства дифференциальной защиты трансформатора / М.С. Ломан, А.В. Ковалевский // Релейщик. – 2010. – № 4. – С. 32–35.

8. Romanyuk, F. Validation of mathematical model of differential protection / F. Romanyuk, I. Novash, M. Loman, P. Węgierek, M. Szrot // Przegląd elektro-techniczny. – 2014. – № 3. – P. 187–190.

### Материалы докладов на конференциях

9. Ломан, М.С. Разработка микропроцессорного терминала основной защиты понижающего трансформатора / М.С. Ломан // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–25 ноября 2011 г. / Белорус. гос. аграрн. тех. ун-т. – Минск, 2011. – С. 109–111.

10. Loman, M. Features of implementation of microprocessor transformer differential protection / M. Loman // Science. Innovation. Production. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Belarus-Korea forum, Minsk, November 19–20, 2013 / Belarusian National Technical University. – Minsk, 2013. – P. 61–62.

11. Ломан, М.С. Исследование функционирования микропроцессорной дифференциальной защиты трансформатора при внешних повреждениях / М.С. Ломан // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 ноября 2013 г. / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т. – Минск, 2013. – С. 73–75.

### **Тезисы докладов на конференциях**

12. Ломан, М.С. Испытания устройства дифференциальной защиты трансформатора / М.С. Ломан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Девятой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 24.

13. Ломан, М.С. Цифровые фильтры гармонических составляющих тока в микропроцессорной дифференциальной защите трансформатора / М.С. Ломан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2012 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 66–67.

14. Romanyuk, F. Principle of offset from transient current imbalance for differential protection / F. Romanyuk, M. Loman, P. Węgierek, M. Szrot // 8<sup>th</sup> International Conference, Zaczopane, Poland, June 18–21, 2013 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2013. – P. 55.

15. Ломан, М.С. Математическая модель дифференциальной защиты трансформатора / М.С. Ломан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Одиннадцатой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2013 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 31–32.

### **Патенты**

16. Способ блокировки дифференциальной защиты электроэнергетических систем при внешних коротких замыканиях : пат. 19004 Респ. Беларусь, МПК Н 02Н 1/04, 3/44, 7/045 / Ф.А. Романюк, М.С. Ломан; заявители Бел. нац. техн. ун-т, ОАО «Белэлектромонтажналадка». – № а20130831; заявл. 08.07.2013; опубл. 28.02.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 112–113.

17. Устройство блокировки токовой защиты трансформатора при броске тока намагничивания : пат. 19086 Респ. Беларусь, МПК Н 02Н 1/04, 7/04 / Ф.А. Романюк, М.С. Ломан; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а20131196; заявл. 15.10.2013; опубл. 30.04.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 2. – С. 91.

## РЭЗІЮМЭ

Ломан Міхаіл Сцяпанавіч

### МІКРАПРАЦЭСАРНАЯ ЗАСЦЯРОГА СІЛАВЫХ ПАЅЖАЛЬНЫХ ТРАНСФАРМАТАРАЎ

**Ключавыя словы:** рэлейная засцярога, дыферэнцыяльная токавая засцярога, максімальная токовая засцярога, сілавы трансфарматар, мікрапрацэсарны тэрмінал рэлейнай засцярогі.

**Мэта даследаванняў:** распрацоўка мікрапрацэсарнай засцярогі сілавых паніжальных трансфарматараў.

**Метады даследаванняў:** вылічальны і натурны эксперыменты.

**Атрыманыя вынікі:** распрацаваныя алгарытмы ступеняў ДТЗ і МТЗ мікрапрацэсарнай засцярогі сілавых паніжальных трансфарматараў. Распрацаваны тэрмінал мікрапрацэсарнай засцярогі сілавых трансфарматараў МР801.

**Навізна:** самымі важнымі вынікамі выкананых навуковых даследаванняў з’яўляюцца распрацаваныя алгарытмы блакіроўкі дыферэнцыяльнай токавай засцярогі пры знешніх кароткіх замыканнях і блакіроўкі токавых засцярог трансфарматара пры кідке току намагнічвання, навізна якіх пацвярджаецца патэнтамі Рэспублікі Беларусь на вынаходства.

**Укараненне:** тэрмінал МР801 укаранены ў эксплуатацыю на аб’ектах ДВА «Белэнерга» у колькасці 92 шт. для засцярогі сілавых трансфарматараў напружаннем 110 кВ.

## РЕЗЮМЕ

Ломан Михаил Степанович

### МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ПОНИЖАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Ключевые слова:** релейная защита, дифференциальная токовая защита, максимальная токовая защита, силовой трансформатор, микропроцессорный терминал релейной защиты.

**Цель исследований:** разработка микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов.

**Методы исследований:** вычислительный и натурный эксперименты.

**Полученные результаты:** разработаны алгоритмы ступеней ДТЗ и МТЗ микропроцессорной защиты силовых понижающих трансформаторов. Разработан терминал микропроцессорной защиты силовых трансформаторов МР801.

**Новизна:** самыми важными результатами проведенных научных исследований являются разработанные алгоритмы блокировки дифференциальной токовой защиты при внешних коротких замыканиях и блокировки токовых защит трансформатора при броске тока намагничивания, новизна которых подтверждается патентами Республики Беларусь на изобретения.

**Внедрение:** терминал МР801 внедрен в эксплуатацию на объектах ГПО «Белэнерго» в количестве 92 шт. для защиты силовых трансформаторов напряжением 110 кВ.

## SUMMARY

Loman Mikhail S.

### MICROPROCESSOR-BASED POWER STEP-DOWN TRANSFORMERS PROTECTION

**Keywords:** relay protection, differential current protection, overcurrent protection, power transformer, microprocessor-based relay protection terminal.

**Purpose of research:** development of the microprocessor-based power step-down transformer protection.

**Methods of research:** calculating and field experiments.

**Obtained results:** algorithms of differential current and overcurrent steps of microprocessor-based power step-down transformers protection have been developed. MP801 microprocessor-based terminal of power transformers protection have been designed.

**Novelty:** the most important results of scientific research are developed blocking algorithms for differential current protection during external faults and for transformer current protections during inrush current process. The novelty of these algorithms is confirmed by patents of the Republic of Belarus.

**Implementation:** MR801 terminals have been put into operation for the protection of 110 kV power transformers at SPA "Belenergo" facilities in the amount of 92 unites.



Научное издание

**ЛОМАН**  
**Михаил Степанович**

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА  
СИЛОВЫХ Понижающих трансформаторов**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 27.10.2015. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 80. Заказ 833.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.