

$$U_{ш} = \alpha_{ш} R_3 I_3, \quad (6)$$

где  $\alpha_{ш}$  – коэффициент шага.

Очевидно, что основными характеристиками, по которым можно установить рабочие и электрозашитные качества заземляющих устройств, являются  $R_3$ ,  $U_{п}$  и  $U_{ш}$ , найденные в расчетном сезоне при расчетном значении тока  $I_3$ .

Значения  $U_{п}$  и  $U_{ш}$  зависят от характера поля тока, выходящего из заземлителя в землю, и от характера поля тока, выходящего с ног человека в землю, и сопротивления тела человека, являющегося функцией тока, проходящего по его телу. Следовательно, чтобы рассчитать сопротивление заземляющего устройства и напряжения прикосновения и шага, необходимо уметь рассчитывать электрические поля токов, выходящих из заземлителей в землю. Решение этой задачи составляет значительную часть, теории заземляющих устройств.

Требуемые значения электрических характеристик заземляющих устройств должны быть обеспечены при наиболее неблагоприятных условиях [1], т. е. непрерывно во времени и при возможном наибольшем расчетном токе, стекающем с заземлителя в землю. Введение этого требования вызвано закономерными циклическими сезонными изменениями параметров электрической структуры земли, приводящими к закономерным изменениям электрических характеристик заземляющих устройств. Причем в процессе этих изменений наступает сезон, во время которого соответствующая характеристика заземляющего устройства принимает наибольшее значение.

Работоспособность заземляющих устройств может быть обеспечена только, если имеется возможность точного определения их характеристик и картины распределения токов замыканий по элементам устройства.

### Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
2. Бургсдорф, В.В., Якобс, А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

УДК 621.316

## СПОСОБЫ ОТСТРОЙКИ ОТ БРОСКА ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТАХ

*Сингаевская Е.М.*

Научный руководитель – БУЛОЙЧИК Е.В.

Одним из основных требований к дифференциальной защите силового трансформатора является быстрое и правильное распознавание броска тока намагничивания (БТН). Многообразие форм и значений тока с учетом разновременности включения фаз и степени насыщения трансформаторов тока обуславливает сложность выявления данного режима.

БТН появляется при включении силового трансформатора под напряжение или восстановлении напряжения при отключении внешних КЗ. Он обусловлен появлением свободной аperiodической составляющей в магнитном потоке, приводящей к насыщению магнитопровода. Наибольший БТН возникает в ненагруженном трансформаторе при включении на холостой ход.

Форма БТН существенно не синусоидальна. В общем случае в БТН содержится большая аperiodическая составляющая, гармоники основной частоты и высшие гармоники. Соотношения между этими составляющими для различных фаз отличаются и зависят от: схем соединения силового трансформатора и трансформаторов тока, насыщения трансформаторов тока, неодновременности включения фаз, режима заземления нейтрали силового трансформатора и др. По форме БТН может быть как однополярным и содержать большую аperiodическую составляющую, так и разнополярным, когда аperiodическая составляющая очень мала.

БТН протекает только в одной обмотке трансформатора со стороны питания.

Рассмотрим способы отстройки от БТН, получившие наибольшее распространение. Они наиболее просты в реализации и основаны на контроле признаков дифференциального тока.

1. Гармоническое торможение осуществляется благодаря относительно большому (не менее 17 %) содержанию второй гармоники по отношению первой в дифференциальном токе. Этот способ широко используется ведущими зарубежными производителями цифровых защит и будет рассмотрен ниже более подробно. Недостатком является возможность задержки срабатывания защиты в режиме КЗ, сопровождающимся насыщением трансформаторов тока. Для исключения этого недостатка в схеме защиты может предусматриваться дополнительная ступень (дифференциальная токовая отсечка, отстройка от БТН для которой осуществляется по току срабатывания).

2. Признаки, основанные на анализе формы БТН, например, временные интервалы, включающие длительность бестоковых пауз, длительность импульсов на различных уровнях замера, соотношение указанных интервалов и т. д. При этом возможен отказ защиты при внутренних КЗ большой кратности, когда во вторичных токах могут появляться значительные бестоковые паузы, а в трансформированных БТН они могут исчезнуть. В связи с этим в некоторых защитах применяются корректирующие звенья.

3. Комбинированные способы используют сочетание признаков гармонического состава и временных интервалов.

Как указывалось ранее в большинстве цифровых защит для отстройки от БТН используется вторая гармоника, которая присутствует в БТН независимо от его величины и формы. Блокировка защиты основана на контроле отношения действующего значения второй гармоники к действующему значению первой гармоники дифференциального тока. Срабатывание защиты блокируется, если контролируемое соотношение превышает уставку, до тех пор, пока соотношение не опустится ниже уставки. В некоторых терминалах предусмотрен специальный анализ дифференциального тока, особенности формы кривой и скорости нарастания мгновенного дифференциального тока, позволяющий снимать блокировку по второй гармонике, если ее появление вызвано не БТН, а насыщением трансформаторов тока аperiodической составляющей тока КЗ. («Сирус-Т»).

Аналитические методы расчета БТН достаточно сложны и трудоемки. Поэтому переходные процессы при включении трансформатора на холостой ход и различных видах КЗ были исследованы методом вычислительного эксперимента на базе комплексных математических моделей реализованной на ПЭВМ.

Характерная форма БТН представлена на рисунке 1.

При анализе поведения дифференциальной защиты следует учитывать влияние схем соединения в трехфазные группы трансформаторов тока на величину и форму БТН. При соединении трансформатора тока в звезду (рисунок 1а) значительно уменьшается нагрузка на трансформаторы тока и степень их насыщения, степень искажения формы вторичных токов, и, как следствие, улучшается работа измерительного органа основанная на анализе формы БТН.

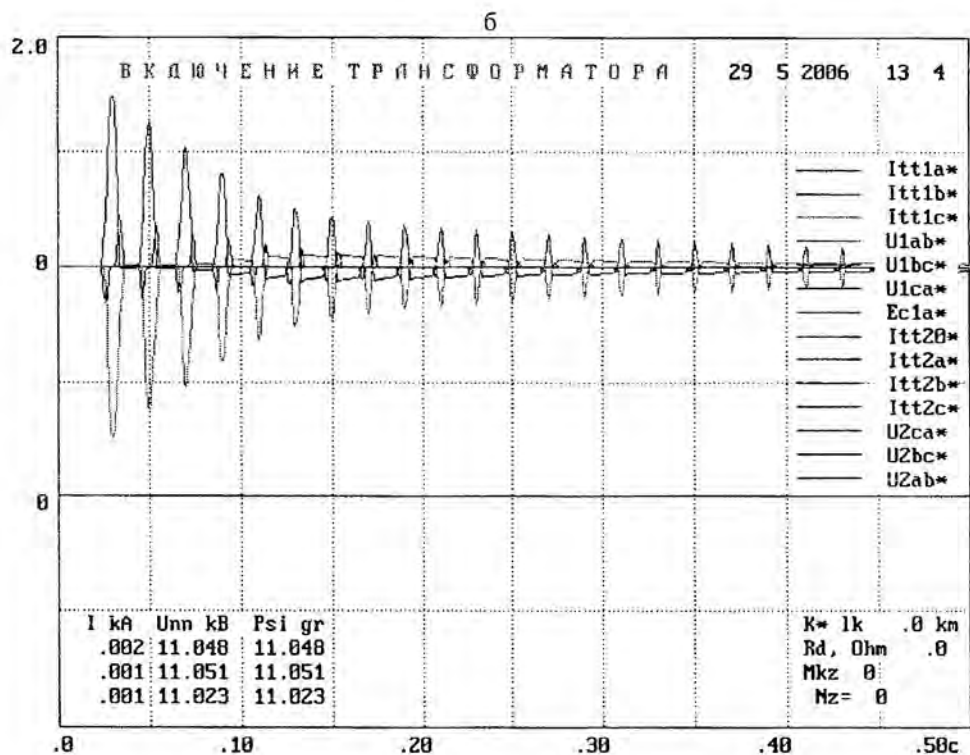
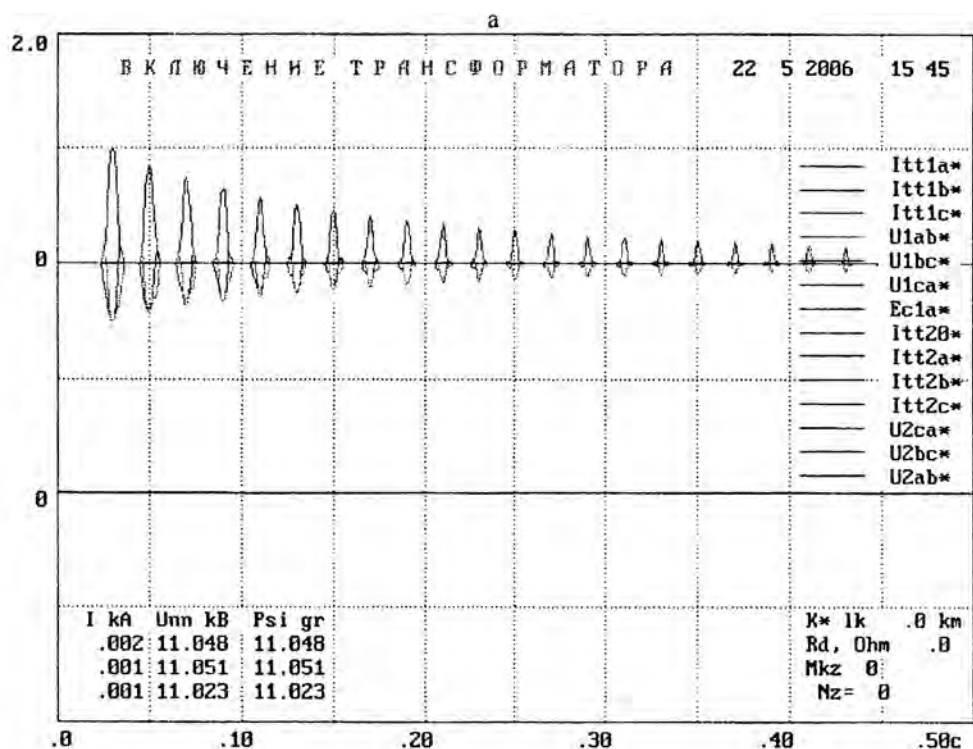


Рисунок 1. БТН: а – при соединении ТА в звезду;  
б – при соединении ТА в треугольник

При соединении трансформаторов тока в треугольник апериодическая составляющая БТН сильно поглощается ветвью намагничивания, и во вторичных токах появляются обратные полуволны, что сильно усложняет работу измерительного органа. Поэтому трансформаторы тока надо соединять в звезду независимо от схемы соединения силового трансформатора, а компенсацию фазового сдвига производить программно.

На рисунке 2 показано отношение гармоник при БТН, трансформаторы тока соединены в звезду и треугольник соответственно. Видно что относительное содержание второй гармоники для трех фаз *A, B, C* в общем случае различны и меняются в течение переходного процесса, но они достаточны для надежного блокирования защиты.

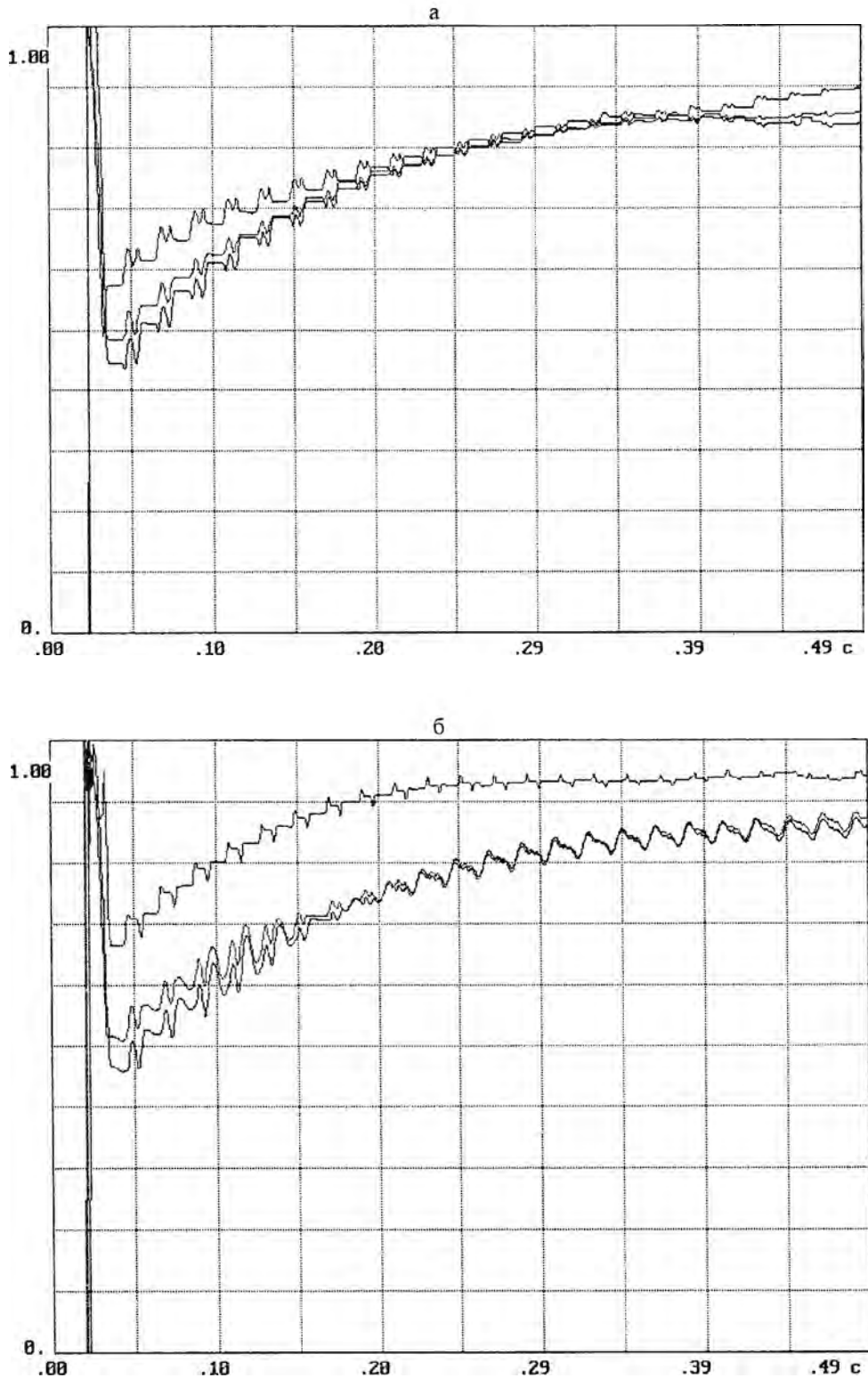


Рисунок 2. Относительное содержание второй гармоники при БТН:  
а – при соединении ТА в звезду; б – при соединении ТА в треугольник

На рисунке 3 показано относительное содержание второй гармоники при трехфазном КЗ в зоне и вне зоны действия защиты соответственно.

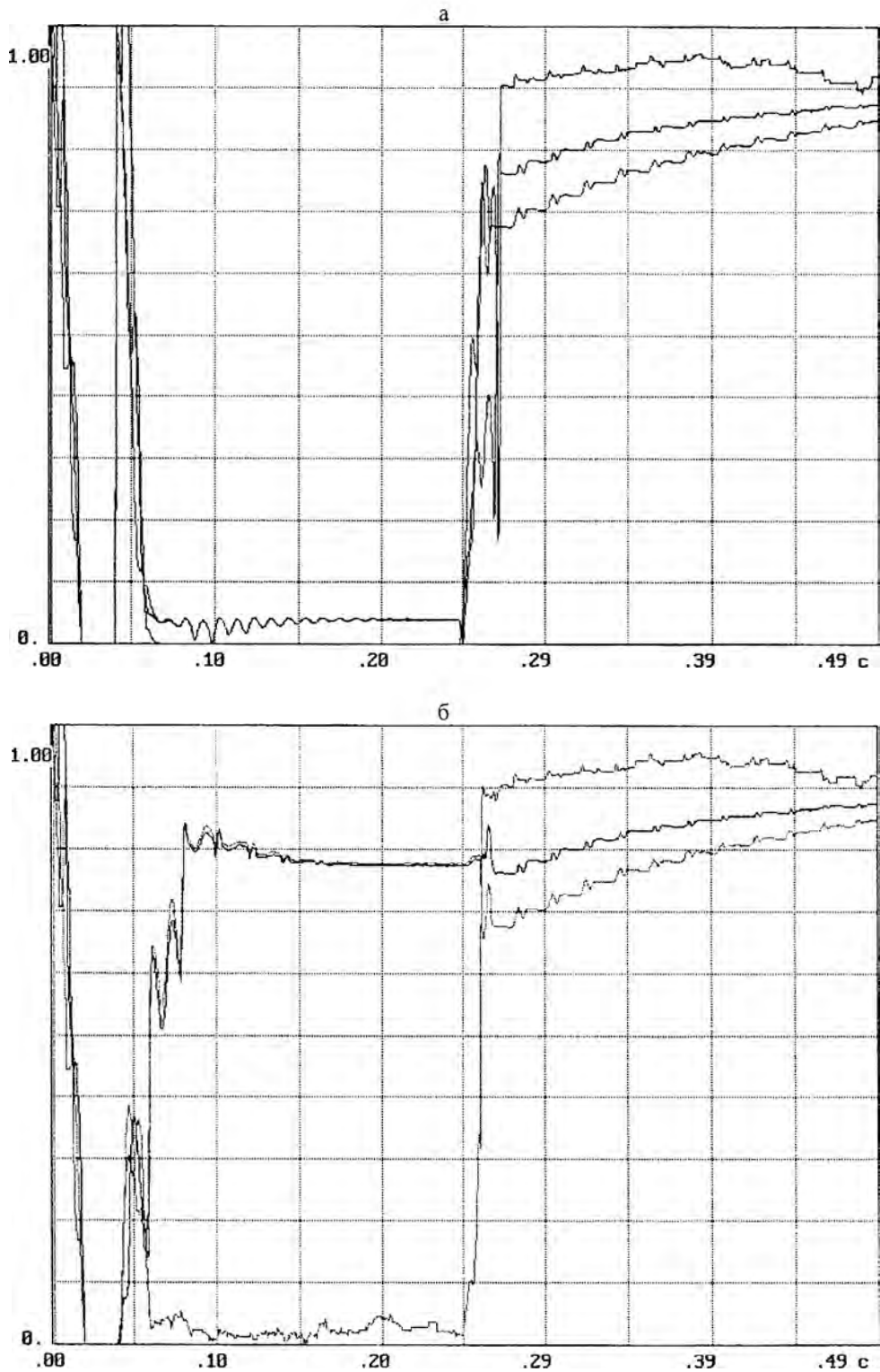


Рисунок 3. Относительное содержание второй гармоники во время КЗ и при его отключении: а – КЗ в зоне действия защиты; б – внешнее КЗ

Если короткое замыкание произошло в зоне действия защиты, то относительное содержание второй гармоники в токе КЗ мало и защита надежно срабатывает. Это от-

ношение резко возрастает после отключения повреждения. В режиме внешнего КЗ, при насыщении трансформаторов тока значение отношения гармоник может быть велико и приводить к срабатыванию блокировки, тем самым повышая надежность отстройки защиты от внешних КЗ.

### Литература

1. Засыпкин, А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
2. Дьяков, А.Ф., Овчаренко, Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 199 с.
3. Гловацкий, В.Г., Пономарев, И.В. Современные средства релейной защиты и автоматики электросетей. – 3 электронная версия. – Киев: Энергомашвин, 2003. – 535 с.
4. Дифференциальное реле защиты трансформатора ТЗ5, версии 4.4. Руководство по использованию серии УР, GE. – 2005. – 130 с.
5. Дифференциальная защита 7UT612, версия 4.0. Руководство по эксплуатации. – Siemens, 2003. – 498 с.
6. Терминал защиты трансформатора RET 521\*RU. Руководство по эксплуатации. – АВВ, 2004.
7. Микропроцессорное устройство основной защиты двухобмоточного трансформатора «Сириус-Т». Руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2005. – 68 с.

УДК 621.316.5

## УРОВНИ ТОКОВ И МОЩНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ И СПОСОБЫ ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

*Гоголинский О.Н., Агеенко Ю.Н.*

**Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент СИЛЮК С.М.**

В процессе эксплуатации ЭЭС одной из основных причин нарушения нормального режима работы отдельных электроустановок и системы в целом являются возникающие КЗ, которые представляют собой всякое случайное или преднамеренное не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек, не принадлежащих одной фазе, электроустановки между собой или землей.

Расчеты токов КЗ необходимы для следующих конечных целей:

- сопоставления оценки и выбора схем электрических соединений ЭЭС;
- выбора электрических аппаратов электроустановок по условиям термической и электродинамической стойкости;
- проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики ЭЭС;
- определения влияния токов КЗ на линии связи;
- оценки устойчивости работы ЭЭС;
- разработки мероприятий по координации и оптимизации значений токов КЗ;
- проектирования заземляющих устройств;
- выбора разрядников;
- анализа аварий в электроустановках;
- проведения различных испытаний в ЭЭС.

К методам ограничения уровней токов КЗ относится:

- выбор структуры и схемы электрических соединений элементов ЭЭС;
- стационарное и автоматическое деление электрической сети;
- выбор режима ее эксплуатации;
- выбор схем коммутации;
- применение оборудования с повышенным электрическим сопротивлением;
- использование быстродействующих коммутационных аппаратов;