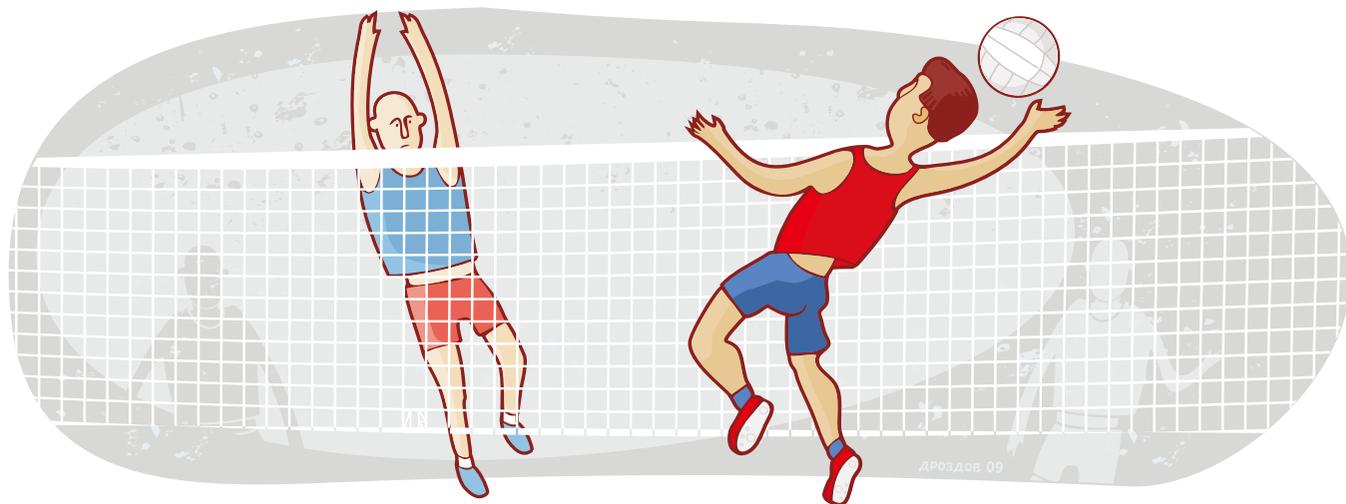


# Усовершенствованный алгоритм отстройки от бросков тока намагничивания

В данной статье вы найдете ответы на следующие вопросы:

- Каковы условия возникновения броска намагничивающего тока (БНТ) в силовых трансформаторах?
- Почему способы блокировки при БНТ, работающие на основе оценки доли содержания второй гармоники в токе, оказываются малоэффективными в современных условиях?
- Как обеспечить правильную идентификацию БНТ?



**Авторы**  
Каштенни Б.,  
Севов Л.

**М**ощные трансформаторы являются одними из ключевых и самых дорогостоящих элементов электроэнергетической системы. Если в силовом трансформаторе возникает повреждение, то выполнить его отключение необходимо как можно быстрее с тем, чтобы минимизировать возможные повреждения. Это обусловлено тем, что затраты на ремонт силовых трансформаторов могут быть значительными. С другой стороны, незапланированный вывод из работы трансформатора может стоить сетевой компании миллионы долларов. Тем самым очень важно обеспечить минимальное число и продолжительность ложных отключений. В соответствии с этим предъявляются

жесткие требования к устройствам защиты трансформаторов. В числе таких требований: надежность срабатывания при появлении соответствующего требования, надежность несрабатывания в режимах без внутреннего короткого замыкания (КЗ) и быстродействие.

Однако возможные режимы работы силовых трансформаторов делают задачу обеспечения указанных требований непростой. Реализация защиты трансформаторов является, возможно, одной из самых сложных задач релейной защиты.

В таблице 1 приведены основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться при реализации защиты трансформаторов, с учетом режимов броска тока

Режим	Измерения	Надежность несрабатывания	Надежность срабатывания	Быстродействие
<b>БНТ</b>	Для точного измерения второй и пятой гармоник требуется один период промышленной частоты. Частоты, отличающиеся от номинальной, обуславливают погрешности измерения при оценке доли содержания гармоник в дифференциальном токе	В современных силовых трансформаторах из-за магнитных свойств сердечника содержание второй гармоники при БНТ и пятой гармоники при перевозбуждении может быть незначительным, что может привести к ложной работе защиты	Появление высших гармоник не обязательно может свидетельствовать о БНТ. Возможна блокировка защиты при тяжелых внутренних КЗ вследствие насыщения измерительных ТТ	Для того чтобы исключить предположение о возникновении БНТ или перевозбуждении требуется один период промышленной частоты, если ток внутреннего КЗ не настолько велик, чтобы отключение было бы выполнено дифференциальной токовой отсечкой
<b>Перевозбуждение</b>			Пятая гармоника может появляться и при внутренних КЗ вследствие насыщения измерительных ТТ и несимметрии роторов генераторов	
<b>Внешние КЗ</b>	Скорость изменения величины тока велика. Как следствие, измеренный сигнал часто оказывается значительно искаженным	При внешних КЗ и неточном выравнивании вторичных токов в плечах защиты характерно появление тока небаланса. При насыщении ТТ при внешних КЗ также возможно возникновение тока небаланса	Все способы, направленные на предотвращение ложного срабатывания защиты при внешних КЗ, в определенной степени снижают надежность срабатывания защиты при внутренних КЗ	Способы обеспечения несрабатывания устройств защиты при внешних КЗ могут ограничивать быстродействие защиты
<b>Внутренние КЗ</b>		Ток внутреннего КЗ может составлять несколько процентов от номинального тока трансформатора. Меры, направленные на обеспечение чувствительности защиты в таких случаях, могут снизить надежность несрабатывания защиты в режиме без КЗ	Ток внутреннего КЗ может составлять несколько процентов от номинального тока трансформатора. Меры, направленные на предотвращение срабатывания при БНТ, перевозбуждении и внешних КЗ, могут снижать надежность срабатывания защиты при внутренних КЗ	Способы обеспечения несрабатывания устройств защиты при БНТ, перевозбуждении и внешних КЗ могут ограничивать быстродействие защиты

Таблица 1. Проблемы реализации защиты силовых трансформаторов

намагничивания, перевозбуждения трансформатора, внутренних и внешних КЗ. Эти проблемы приведены в контексте вопросов выполняемых терминалом релейной защиты измерений электрических величин, обеспечения надежности срабатывания и несрабатывания при появлении соответствующих требований, а также быстродействия [1, 2].

Цифровые устройства защиты, предоставляющие возможность реализовывать различные алгоритмы обработки сигналов, позволяют специалисту осуществить пересмотр классических принципов защиты трансформатора и повысить техническое совершенство такой защиты, обеспечив быстрдействие, надежность и селективность [3].

В данной статье рассматривается вопрос обеспечения отстройки дифференциальной защиты трансформатора от броска намагничивающего тока (БНТ).

### Броски тока намагничивания – краткий анализ явления

Причиной возникновения БНТ в силовых трансформаторах является резкое изменение уровня напряжения намагничивания. Хотя обычно возникновение БНТ связывают с включением трансформатора под напряжение, он также может быть обусловлен [4, 5]:

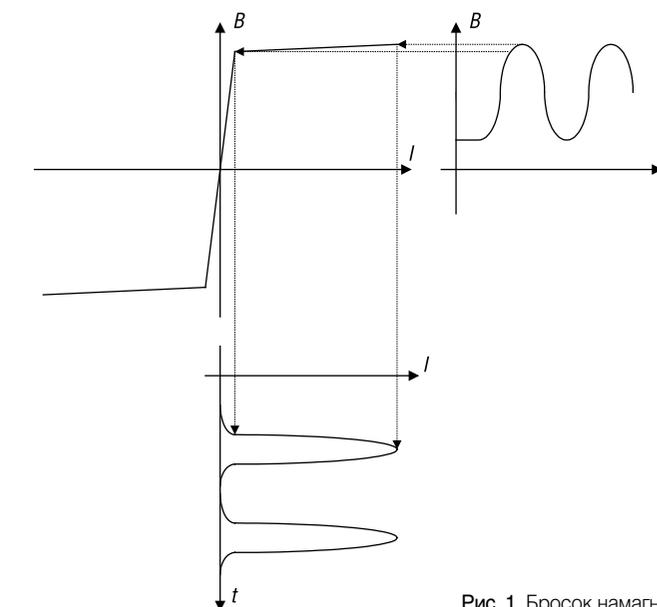


Рис. 1. Бросок намагничивающего тока (БНТ)

- Возникновением внешнего КЗ,
- Восстановлением уровня напряжения после отключения внешнего КЗ,
- Переходом КЗ из одного вида в другой (к примеру, переход однофазного КЗ в двухфазное КЗ на землю),
- Несинхронным подключением генератора к системе.

Поскольку ветвь намагничивания схемы замещения трансформатора, может

быть представлена как шунт при его насыщении, ток намагничивания нарушает баланс между токами на выводах трансформатора. Дифференциальная защита воспринимает ток БНТ как дифференциальный, однако должна устойчиво функционировать в таком случае. Отключение трансформатора при БНТ является нежелательным с точки зрения условий обеспечения длительного срока службы

Богдан Каштенни, Любомир Севов., компания «General Electric»

Оригинал статьи на английском языке представлен на сайте [www.gedigitalenergy.com/multilin](http://www.gedigitalenergy.com/multilin)

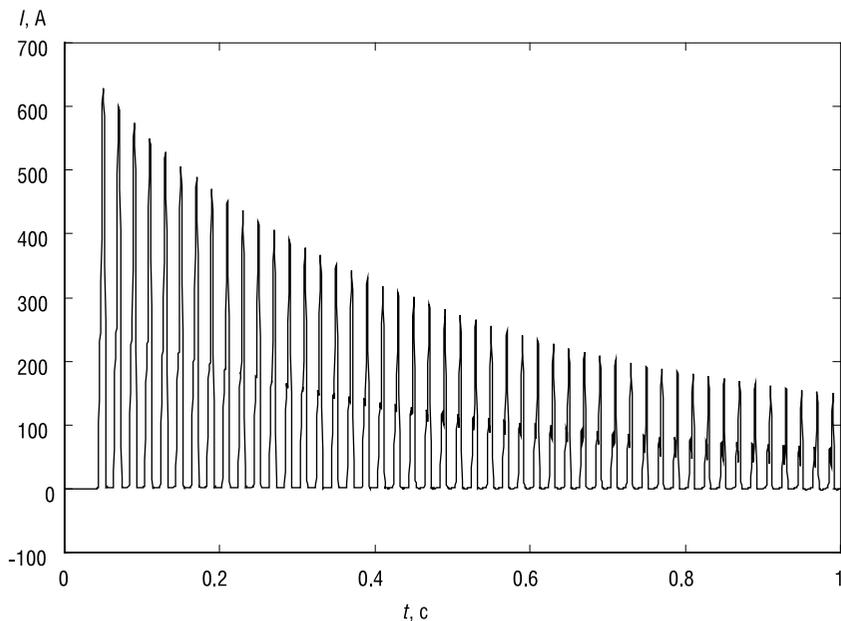


Рис. 2. Характерный вид БНТ

трансформатора (отключение тока индуктивного характера вызывает высокие перенапряжения, что может представлять угрозу для трансформатора и быть косвенной причиной возникновения внутреннего КЗ).

#### 1. Бросок тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение

Намагничивание трансформатора из-за включения его под напряжение считается самым неблагоприятным случаем, вызывающим БНТ наибольшей амплитуды. Когда производится отключение трансформатора, напряжение намагничивания оказывается равным нулю, ток намагничивания снижается до нуля, в то время как магнитная индукция изменяется согласно характеристике намагничивания сердечника. Указанное обуславливает наличие остаточной индукции в сердечнике. Когда, по истечении некоторого времени, производится повторное включение трансформатора под напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону, магнитная индукция начинает изменяться по тому же закону, однако со смещением на значение остаточной индукции. Остаточная индукция может составлять 80–90% номинальной индукции, и, таким образом, точка может переместиться за излом характеристики намагничивания, что, в свою очередь, обуславливает большую амплитуду и искажение формы кривой тока (рис. 1).

На рис. 2 представлена характерная форма БНТ. Данная осциллограмма отображает наличие длительно затухающей апериодической составляющей, может быть охарактеризована содержанием различных гармоник и большой амплитудой тока в начальный момент времени (до 30 раз превышающей значение номинального тока трансформатора). Кривая значительно затухает через десятые секунды, однако полное затухание характерно через несколько секунд. При определенных обстоятельствах БНТ затухает лишь спустя минуты после включения трансформатора под напряжение [4, 5].

Форма кривой, амплитуда и постоянная времени затухания БНТ зависит от ряда факторов:

#### ■ Мощность силового трансформатора

Большая амплитуда БНТ характерна для трансформаторов меньшей мощности, в то время как постоянная времени затухания оказывается больше для трансформаторов большей мощности. Для маломощных трансформаторов (100 кВА и менее) постоянная времени затухания составляет порядка 0,1 с, для более мощных трансформаторов – порядка 1 с.

#### ■ Эквивалентное сопротивление системы, от которой производится включение трансформатора под напряжение

Амплитуда БНТ оказывается большей при включении трансформатора от более мощной системы. Более того, от значения активного сопротивления от эквивалентного источника сети до ветви намаг-

ничивания зависит скорость затухания БНТ. Таким образом, при включении под напряжение трансформаторов, установленных в непосредственной близости от генерирующих станций, проявляющиеся БНТ затухают много дольше, нежели БНТ, проявляющиеся при включении трансформаторов, электрически удаленных от генерирующих станций.

#### ■ Магнитные свойства материала, из которого изготовлен сердечник трансформатора

Бросок намагничивающего тока имеет большую амплитуду в том случае, когда индукция насыщения не велика. Обычно трансформаторы изготавливаются с индукцией насыщения в диапазоне от 1.5 до 1.75 Тл. Трансформаторы, работающие с индукцией, близкой к указанным значениям, имеют меньшие по амплитуде БНТ [4, 5].

#### ■ Уровень остаточной индукции сердечника

При самых неблагоприятных значениях фазы напряжения и знака остаточной индукции (как представлено на рис. 1) при большем значении остаточной индукции характерен больший БНТ. Значение остаточной индукции может оказываться равным от 1.3 до 1.7 Тл [4, 5].

#### ■ Момент включения трансформатора под напряжение

Наибольшая амплитуда БНТ характерна для тех случаев, когда включение трансформатора производится в момент прохождения сигнала напряжения через нуль и когда новая вынужденная индукция совпадает по знаку с остаточной индукцией сердечника (рис. 1). В целом амплитуда БНТ является случайной величиной и зависит от фазы сигнала напряжения, при которой осуществляется включение коммутационного аппарата, а также от знака остаточной индукции. Согласно выполненным оценкам, каждое пятое или шестое включение силового трансформатора под напряжение сопровождается значительными по амплитуде БНТ [6].

#### ■ Способ включения трансформатора под напряжение

Величина БНТ зависит от площади поперечного сечения между сердечником и обмоткой, включаемой под напряжение. Большая амплитуда БНТ характерна для тех случаев, когда в первую очередь производится включение под напряжение внутренней обмотки (обмотки меньшего диаметра). Согласно выполненным оценкам, для трансформаторов с сердечниками из текстурированной стали амплитуда

БНТ может превышать номинальный ток трансформатора в 5–10 раз, когда производится включение под напряжение внешней обмотки и в 10–20 при включении под напряжение внутренней обмотки. Обмотка низшего напряжения трансформаторов обычно наматывается ближе к сердечнику. Соответственно, при включении под напряжение такой обмотки характерны БНТ большей амплитуды.

Некоторые трансформаторы могут быть оснащены специальным коммутационным оборудованием, которое позволяет осуществлять их включение через определенное активное сопротивление [4, 5]. Данное сопротивление позволяет снизить амплитуду БНТ, и скорость затухания таких БНТ значительно увеличивается. В таких условиях характерно меньшее число проблем с обеспечением требований работы защиты трансформатора.

Обратная ситуация, когда в цепи трансформатора установлен воздушный выключатель. В этом случае горение дуги может повлечь за собой наложение напряжения одной полярности в течение 5 последовательных периодов промышленной частоты. Последовательные однополярные импульсы напряжения увеличивают значение остаточной индукции, что впоследствии приводит к возникновению БНТ большей амплитуды. Указанное ставит под угрозу не только правильную работу защиты трансформатора, но и сам трансформатор [2, 4, 5].

## 2. Содержание гармоник в БНТ

Для вычисления спектра частот БНТ будем опираться на аналитическую аппроксимацию, представленную на рис. 3. Пусть угол  $\alpha$  будет параметром. Тогда амплитуда  $n$ -ой гармоники, представленной на рис. 3 характеристики, может быть вычислена как:

$$A_n = \frac{I_m}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{n+1} \cdot \sin((n+1) \cdot \alpha) + \frac{1}{n-1} \cdot \sin((n-1) \cdot \alpha) - 2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{n}\right) \cdot \sin(n \cdot \alpha) \right] \quad (1)$$

На рис. 4 представлен частотный спектр сигнала (рис. 3), вычисленный согласно выражению (1) при значениях угла, равных 60, 90 и 120 эл. градусам соответственно. Как видно из этой иллюстрации, в БНТ всегда доминирует вторая гармоника, поскольку характерно проявление большой аperiodической составляющей. Однако содержание второй гармоники может составлять и менее 20%. Минимальное содержание второй

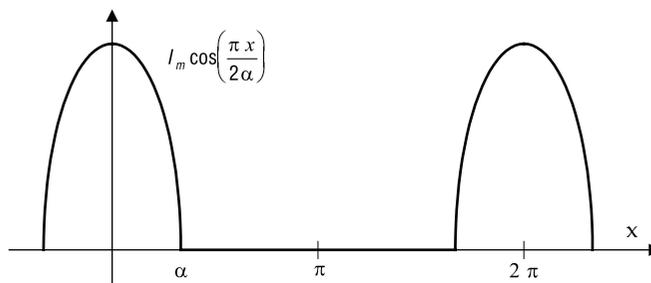


Рис. 3. Идеализированный БНТ для выполнения спектрального анализа

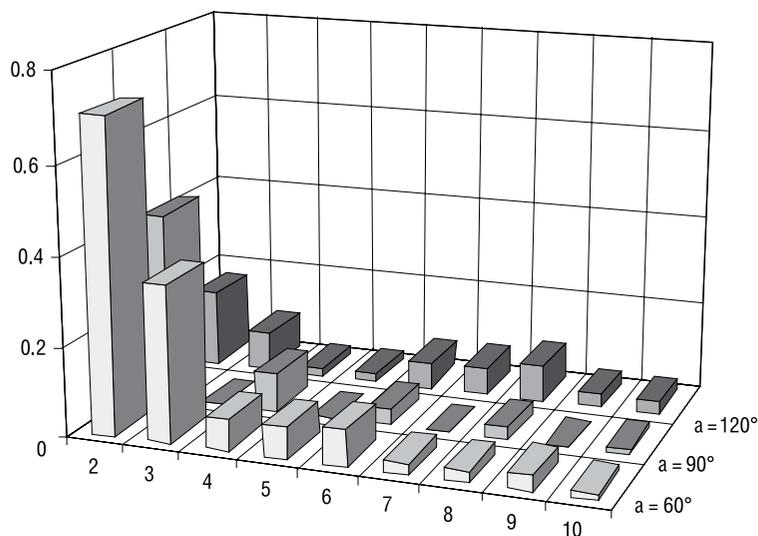


Рис. 4. Содержание второй гармоники в идеализированном БНТ при углах равных 60, 90 и 120 эл. град

гармоники зависит в основном от значения индукции насыщения трансформатора. Чем меньше оказывается индукция насыщения трансформатора, тем больше содержание второй гармоники. Современные силовые трансформаторы, которые изготавливаются при использовании более высококачественной стали, имеют большие значения индукции насыщения. Тем самым содержание второй гармоники в БНТ оказывается относительно невысоким. Поскольку уровень второй гармоники является основным критерием, по которому производится отстройка дифференциальных защит от БНТ, при реализации защиты современных трансформаторов возникают определенные трудности [3, 7, 8].

Также известно, что, когда амплитуда БНТ достигает больших значений, характерно меньшее содержание второй гармоники в нем [4, 5].

## 3. Бросок тока намагничивания в трехфазных трансформаторах

Броски намагничивающего тока, проявляющиеся по разным фазам трехфазного трансформатора, могут значительным образом отличаться по следующим причинам:

- Отличия фазы напряжения в момент включения трансформатора по разным фазам,
- При включении под напряжение обмотки, соединенной по схеме «треугольник», когда в качестве напряжения намагничивания выступают линейные напряжения,
- В последнем случае линейный ток по фазе будет являться векторной суммой токов двух обмоток,
- В зависимости от типа сердечника и других условий только некоторые из фаз могут насыщаться.

Исходя из указанного выше, ток в одной из фаз и в заземленной нейтрали может быть либо схож по форме с однофазным БНТ (рис. 2), либо может иметь искаженную форму (многополярный БНТ). В последнем случае содержание второй

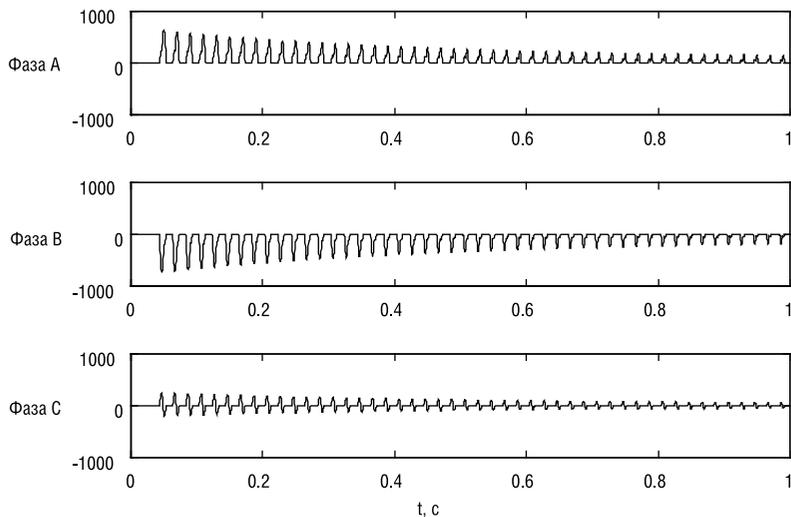


Рис. 5. Пример БНТ при включении под напряжение трехфазного трансформатора с соединением обмоток по схеме «звезда-треугольник» (включение со стороны обмотки, соединенной по схеме «звезда»)

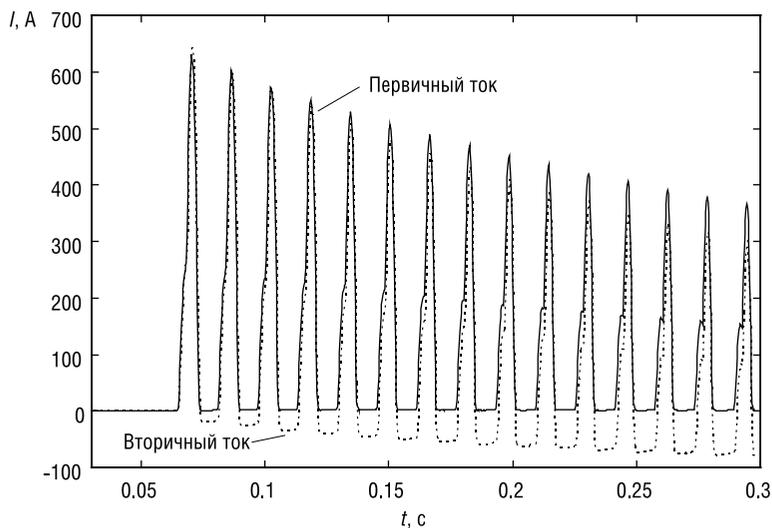


Рис. 6. Первичные и масштабированные вторичные токи при БНТ и насыщении ТТ

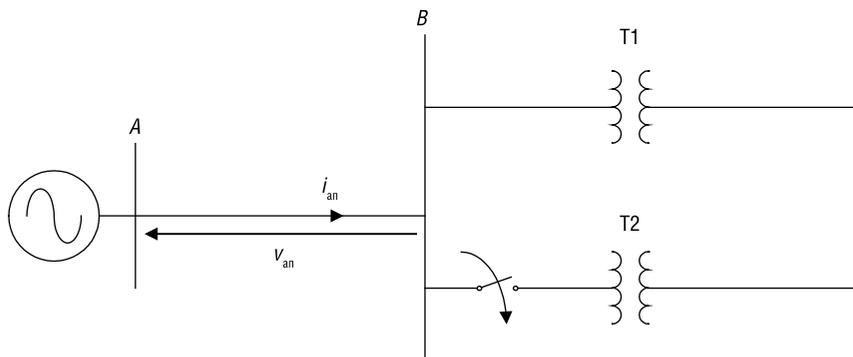


Рис. 7. Условия, приводящие к возникновению индуцированного БНТ

гармоники в токе может значительно образом снижаться, что, в свою очередь, может создавать проблемы для правильного функционирования дифференциальной защиты. На рис. 5 представлен пример осциллограммы токов по фазам при включении под напряжение трехфазного трансформатора. Форма токов по фазам А и В совпадает с формой однофазного БНТ, а форма тока по фазе С имеет искаженную форму – наблюдается двухполярный БНТ.

#### 4. Насыщение трансформаторов тока при БНТ

В связи с большой и длительно затухающей апериодической составляющей при БНТ характерно насыщение измерительных трансформаторов тока, даже если амплитуда самого тока относительно невелика. Когда трансформатор тока насыщается, искажается форма вторичного тока (см. рис. 6). Из-за насыщения ТТ при БНТ возможно значительное снижение доли второй гармоники в дифференциальном токе [9].

#### 5. Бросок намагничивающего тока после ликвидации внешнего КЗ

Когда производится ликвидация близкого КЗ действием соответствующего устройства защиты и соответствующего выключателя, напряжение на выводах трансформатора восстанавливается до нормального уровня. Это создает условия, схожие с условиями, которые наблюдаются при включении трансформатора под напряжение, и может возникнуть БНТ. Однако данная ситуация отличается двумя характерными чертами:

- Скачкообразное изменение напряжения обычно значительно меньше, чем при включении трансформатора под напряжение. Только при возникновении трехфазного КЗ на сборных шинах, к которым подключен трансформатор, и его ликвидации впоследствии возникают условия, идентичные условиям при включении трансформатора под напряжение,
- Обычно увеличение индукции после отключения внешнего КЗ незначительно, и, тем самым, вероятность насыщения сердечника трансформатора оказывается малой.

Амплитуда БНТ, возникающего после восстановления напряжения, оказывается значительно ниже, нежели чем амплитуда БНТ при включении трансформатора под напряжение, а форма и содержание гармоник идентичны последнему.

#### 6. Индуцированный БНТ

Индуцированный БНТ возникает при включении силового трансформатора, со-

единенного в параллель с другим трансформатором, уже находящимся под напряжением (как это показано на рис. 7). В предположении того, что для трансформатора Т2 характерно большое положительное значение остаточной магнитной индукции и его включение производится в момент прохождения фазы напряжения через нуль, при его включении может проявляться БНТ достаточной большой амплитуды. Длительно затухающая аperiodическая составляющая БНТ вызывает значительное падение напряжения на активном сопротивлении эквивалентной электрической системы. Результирующее падение напряжения определяет скачкообразное изменение напряжения на шинах В, и это изменение влечет за собой уменьшение степени насыщения трансформатора Т2. Трансформатор Т1, в свою очередь, оказывается подвержен резкому изменению напряжения, что может вызвать БНТ в обратном направлении (рис. 8). Таким образом, последовательность событий оказывается следующей: первоначально БНТ вызывает только включение трансформатора Т2 под напряжение, затем ток намагничивания трансформатора Т1 увеличивается при одновременном снижении тока намагничивания трансформатора Т2; в конечном счете происходит затухание обоих БНТ, когда оба трансформатора оказываются под напряжением постоянного уровня (рис. 8). Индуцированный БНТ может продолжаться много дольше тех БНТ, которые проявляются при включении не параллельно соединенных трансформаторов (даже в течение нескольких минут [4,5]).

Потенциально при проявлении индуцированного БНТ возможно возникновение двух проблем:

- БНТ трансформатора Т1 может быть настолько велик, что может вызвать неправильную работу дифференциальной защиты этого трансформатора
- Ток питающей линии оказывается равным векторной сумме двух БНТ и может быть схож с аperiodической составляющей тока КЗ. Это, в свою очередь, может вызвать проблемы, когда параллельно включенные трансформаторы имеют одну систему защиты.

### Способы отстройки от БНТ – краткий обзор

Исторически для предотвращения ложной работы дифференциальной защиты трансформатора при БНТ вводилась некоторая выдержка времени согласно какому-либо критерию. Либо это

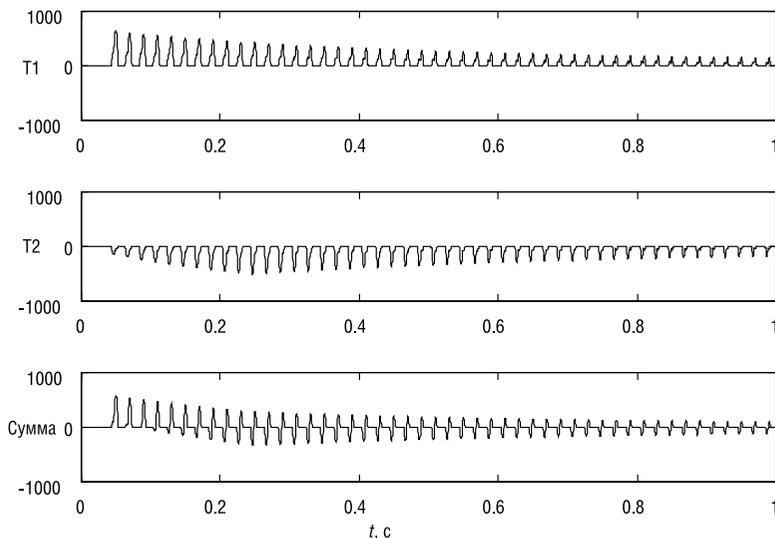


Рис. 8. Пример индуцированных БНТ

выдержка времени вводилась после включения трансформатора под напряжения, либо использовались иные способы [6]. Сейчас ввод выдержки времени уже не считается приемлемым решением для отстройки защиты от БНТ, в особенности для мощных трансформаторов. Современные способы отстройки от БНТ основаны на идентификации его по форме дифференциального тока – либо косвенно (выполнение анализа гармонического состава), либо непосредственно (выполнением анализа формы кривой тока) [8, 9, 10].

#### 1. Отстройка на основе оценки доли содержания гармоник

Отстройка по гармоникам является классическим способом отстройки дифференциальной защиты трансформатора от БНТ. Как было показано ранее, ток намагничивания, который защита воспринимает как дифференциальный ток, может быть охарактеризован содержанием высших гармоник. Таким образом, наличие гармоник низшего порядка может выступать критерием, разрешающим срабатывание защиты, а содержание гармоник высшего порядка, наоборот, являться критерием проявления БНТ и использоваться для блокировки действия защиты. Для цифровых устройств защиты условие может быть записано как:

$$TP = I_{CH} < \Delta I_{CD} \quad (2)$$

где:

$TP$  – сигнал разрешения срабатывания от детектора БНТ;

$I_{CH}$  – комбинированный гармонический ток в дифференциальном токе;

$I_{CD}$  – комбинированный дифференциальный ток;

$\Delta$  – уставка срабатывания.

Условие (2) является основой серии алгоритмов, отличающихся способами формирования токов  $I_{CH}$  и  $I_{CD}$ .

Наиболее простой подход – использование амплитуды тока второй гармоники в дифференциальном токе по данной фазе в качестве сигнала комбинированного гармонического тока и амплитуды основной гармоники в дифференциальном токе по той же фазе в качестве комбинированного дифференциального тока:

$$\left. \begin{aligned} I_{CH} &= I_{D2\phi} \\ I_{CD} &= I_{D1\phi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Другой способ – использовать в качестве комбинированного дифференциального тока действующее значение:

$$I_{CD} = I_{DRMS\phi} \quad (4)$$

При использовании способов формирования величин согласно (3) и (4), проверка условия (2) осуществляется отдельно для каждой фазы одновременно. Для определения необходимости выполнения блокировки в случае идентификации БНТ по одной из фаз необходим ввод дополнительной логики.

Действие устройства защиты в таком случае может быть скорректировано при использовании перекрестной блокировки или путем ввода оценки суммы гармоник по трем фазам.

Опыт показал, что оценка суммы гармоник по всем трем фазам является наиболее надежным решением [3]. В этом случае

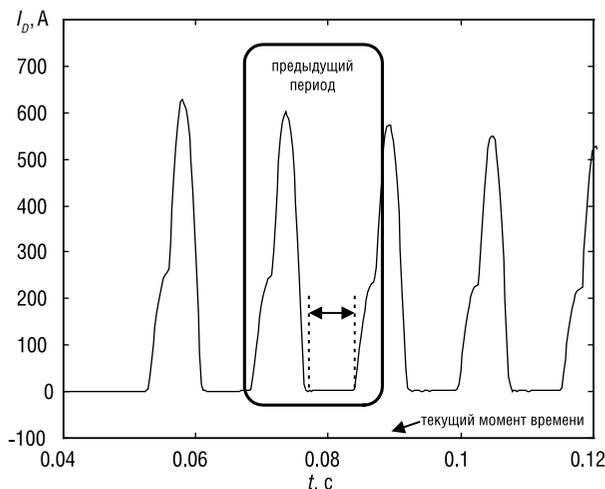


Рис. 9. Иллюстрация способа идентификации БНТ по значению пауз между импульсами тока



Рис. 10. Упрощенная схема способа идентификации БНТ по паузам между импульсами тока

величины, участвующие в выражении (2), формируются следующим образом:

$$I_{CH} = \sum_{A,B,C} I_{CH\phi} \quad (5)$$

и

$$I_{CD} = \sum_{A,B,C} I_{D1\phi} \quad \text{или} \quad I_{CD} = \sum_{A,B,C} I_{DRMS\phi} \quad (6)$$

Также вместо действующего значения могут быть использованы только гармоники низшего порядка. При таком подходе комбинированный дифференциальный сигнал формируется следующим образом:

$$I_{CD} = \sqrt{\sum_{k=1}^p I_{Dk}^2} \quad (7)$$

где

$p$  — наибольшая измеренная гармоника (обычно пятая гармоника, используемая отстройки устройства защиты трансформатора от режима перевозбуждения).

В зависимости от способа формирования величин выражения (2) изменяются и значения уставки функции. Обычно значение уставки задается равным 0.15 – 0.20 (15–20 %).

Метод отстройки от БНТ, в независимости от способа формирования величин комбинированного гармонического

тока и комбинированного дифференциального тока, имеет определенные ограничения в использовании и недостатки.

Во-первых, для точной оценки амплитуды тока той или иной гармоники в дифференциальном токе (обычно используется только вторая гармоника) требуется определенное время. Даже если в дифференциальном токе отсутствуют гармоники вообще, значение отношения  $I_{CH}$  к  $I_{CD}$  имеет большое значение (до тех пор, пока диапазон интегрирования не будет охватывать лишь режим КЗ). Это означает, что функция отстройки от БНТ по гармоникам обычно не формирует сигнал разрешения срабатывания дифференциальной защиты в течение одного периода промышленной частоты, что обычно является диапазоном интегрирования используемых фильтров.

Во-вторых, поскольку в современных трансформаторах содержание высших гармоник в дифференциальном токе может составлять менее 10 % (содержание второй гармоники может составлять порядка 7 %, а общее содержание гармоник около 7.5 % [4, 5]). При таких обстоятельствах значение уставки срабатывания, согласно выражению (2), должно быть уставлено равным менее 7 %. Это, однако,

может привести к задержке срабатывания защиты или отказу ее срабатывания из-за значительного содержания гармоник в дифференциальном токе при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ. Использование функции перекрестной блокировки или изменяемого с течением времени значения уставки срабатывания может лишь частично разрешить описанную проблему.

В-третьих, содержание второй гармоники может на некоторое время (несколько периодов промышленной частоты) составлять менее 20% в связи с переходными процессами, как будет показано далее.

## 2. Отстройка на основе оценки формы кривой тока

Существует два основных метода отстройки такого типа [9]:

- Первый и наиболее распространенный способ использует в качестве критерия идентификации БНТ значение пауз между импульсами тока

Предположение о проявлении БНТ может быть опровергнуто в том случае, если за период промышленной частоты дифференциальный ток не оказывается равным нулю в течение минимум 1/4 периода промышленной частоты (см. рис. 9). Данный принцип был известен еще во время широкого использования статических реле и были разработаны алгоритмы, идентичные этому, для применения в цифровых устройствах защиты. На рис. 10 изображен наиболее широко известный из них [6, 7].

Данный способ отстройки от БНТ обладает следующими недостатками:

а) Для идентификации внутреннего КЗ требуется один период промышленной частоты,

б) При насыщении ТТ при БНТ (что может быть из-за наличия аperiodической составляющей в токе намагничивания) изменяется форма кривой тока (рис. 6), что, в свою очередь, может привести к ложному срабатыванию защиты,

в) При тяжелых внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, форма кривой вторичного тока может изменяться и иметь значения, близкие к нулю, что может приводить к отказу срабатывания защиты.

- Второй способ производит оценку знака максимальных значения тока и скорости затухания БНТ (критерий 2).

При использовании данного способа предположение о проявлении БНТ может

быть отвергнуто, если дифференциальный ток [10] (см. рис. 10):

а) Имеет максимальные свои значения, смещенные относительно друг друга на один период промышленной частоты, и

б) Два последовательных импульса тока не являются импульсами одной полярности.

При использовании данного метода требуется точная идентификация максимальных значений тока. Время между двумя последовательными импульсами должно оцениваться с некоторым запасом исходя из возможных отклонений частоты.

Теоретически, для отличия внутренних КЗ от БНТ данному методу необходимо  $3/4$  периода промышленной частоты. Первый максимум тока КЗ проявляется через четверть периода, следующий – через полпериода. При проявлении второго максимума предположение о проявлении БНТ может быть отвергнуто и отключение от защиты может быть разрешено.

Достоинством данного метода является то, что глубокое насыщение ТТ как в режиме БНТ, так и в режиме внутреннего КЗ, не оказывает влияния на правильность идентификации режима.

Основной недостаток – необходимость выполнения перекрестной поляризации между фазами. Не во всех случаях по всем трем фазам проявляется однополярный БНТ. Также при благоприятных условиях включения защищаемого трансформатора под напряжение (при «благоприятном» значении фазы напряжения и значении остаточной индукции) указанный алгоритм окажется неэффективным.

Данный критерий также может быть использован косвенным образом как функция дифференциальной токовой отсечки. Условие срабатывания дифференциальной отсечки выглядит следующим образом:

$$\text{ОТКЛЮЧЕНИЕ} = |i_D| > \Delta \quad (8)$$

При этом уставка срабатывания данной функции должна быть выставлена достаточно высокой для предотвращения ложных срабатываний защиты (выше максимального значения БНТ). Однако условие срабатывания можно несколько изменить (рис. 12):

$$\text{ОТКЛЮЧЕНИЕ} = (|i_D| > \Delta_+) \text{ и } (|i_D| < \Delta_-) \quad (9)$$

В этом случае необходимо использование двух уставок срабатывания для идентификации однополярности и двуполярности сигнала БНТ (рис. 12). Опираясь на последнее условие срабатывания, значе-

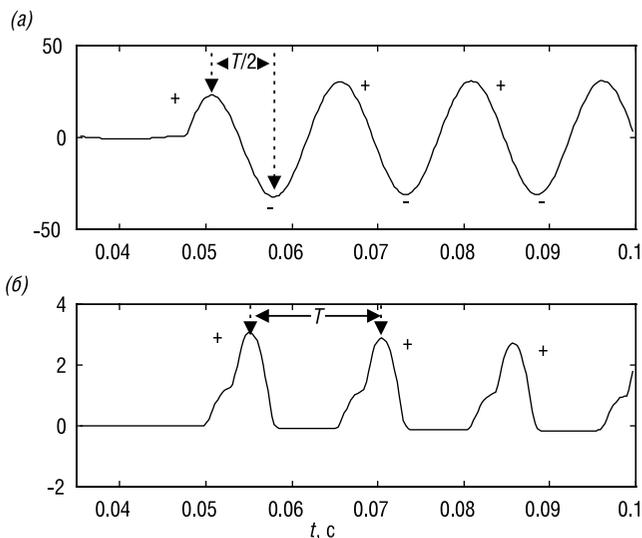


Рис. 11. Иллюстрация использования критерия 2. Режим внутреннего КЗ (а) и режим БНТ (б)

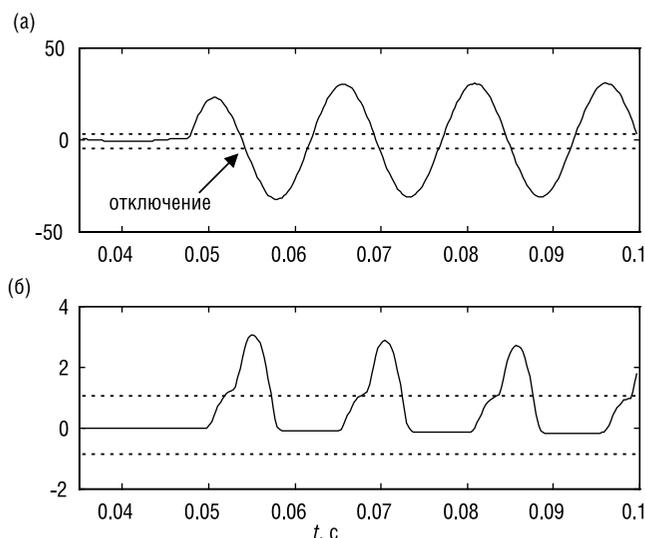


Рис. 12. Иллюстрация принципа использования двух уставок срабатывания. Внутреннее КЗ (а) и БНТ (б)

ние уставки может составлять  $1/3$  от значения уставки по условию (8).

При использовании последних двух условий возможно быстрое действие отключения поврежденных без каких-либо задержек по времени.

### 3. Другие способы

#### ■ Способы, основанные на оценке параметров математической модели

Данные способы основаны на оценке ряда параметров математической модели трансформаторов [11, 12]. Производится вычисление либо определенных параметров модели на основе информации об измеренных величинах, либо производит-

ся вычисление ряда величин на выводах трансформатора, а затем их сравнение с измеренными величинами. В первом случае значения вычисленных параметров позволяют отличить внутренние КЗ от других режимов (включая БНТ). Во втором случае различие между вычисленными и измеренными величинами позволяет устройству выполнять классификацию возможных режимов. При использовании указанных способов необходимо выполнение измерений токов и напряжений на выводах трансформатора.

#### ■ Метод вычисления и оценки значения дифференциальной мощности

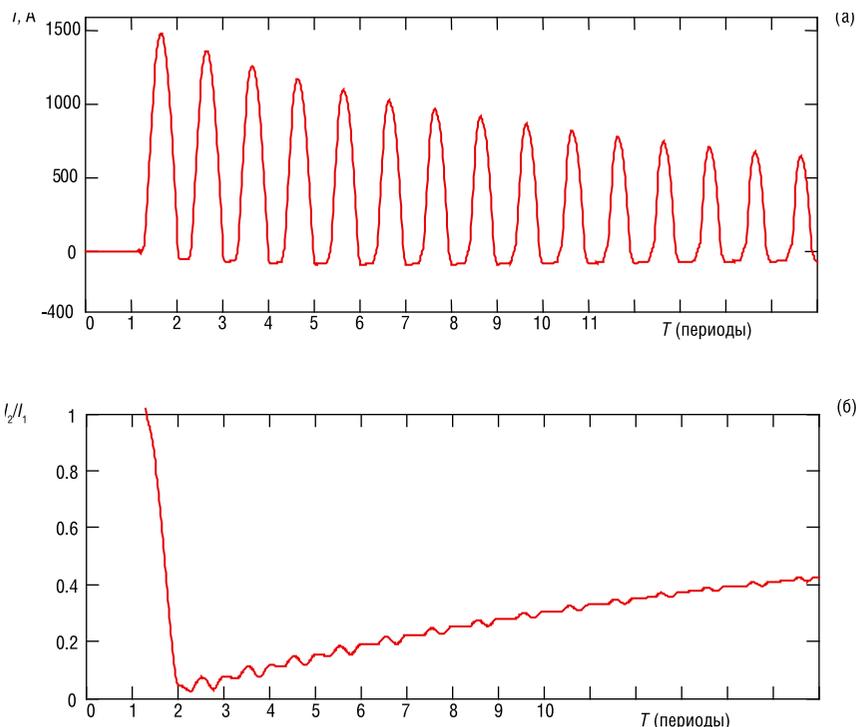


Рис. 13. Пример кривой БНТ (а) и характеристика изменения содержания второй гармоники в БНТ во времени (б)

Другой способ использует дифференциальную активную мощность для отличия режима внутреннего КЗ от других режимов (включая БНТ). Вместо дифференциальных токов осуществляется вычисление и контроль значения дифференциальной мощности [13]. Сигналом, оценка которого производится, здесь является разность между значениями мгновенных мощностей на выводах трансформатора. При применении данного метода необходимо измерение токов и напряжений со всех сторон трансформатора, однако не требуется выполнение учета группы соединения его обмоток и отличия коэффициентов трансформации, используемых защитой ТТ. Надежность идентификации БНТ может быть повышена путем компенсации активных потерь в трансформаторе – как в меди, так и в стали.

#### ■ Метод вычисления и оценки значения магнитной индукции

При использовании данного алгоритма отличие режима внутреннего КЗ от режимов БНТ и перевозбуждения производится на основе вычисления магнитной индукции в сердечнике [14, 15]. Преимуществом данного способа является то, что в нем оказываются взаимосвязаны проблема, вызывающая БНТ (насыщение сердечника трансформатора), и пара-

метр, используемый для его идентификации (магнитная индукция сердечника).

#### Предлагаемый алгоритм

Алгоритм, представленный в данной статье, позволяет обеспечить отстройку от БНТ при доле содержания второй гармоники в нем менее 15–20%.

Снижение доли содержания второй гармоники в дифференциальном токе при БНТ обусловлено большими значениями тока намагничивания, что приводит к тому, что угол (согласно выражению (1), рис. 3) принимает значения более 90 эл. град. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению доли содержания второй гармоники в БНТ ниже уровня 20% (см. рис. 4).

Рис. 13 иллюстрирует указанное выше, представляя пример кривой БНТ (а) и характеристику изменения доли содержания второй гармоники во времени (б), оценка которого производилась при использовании фильтра Фурье с диапазоном интегрирования в один период промышленной частоты. В данном примере содержание второй гармоники в БНТ оказывается меньше 20% в течение 5 периодов. Это может вызвать либо ложную работу защиты, либо принудить пользователя выставить значение

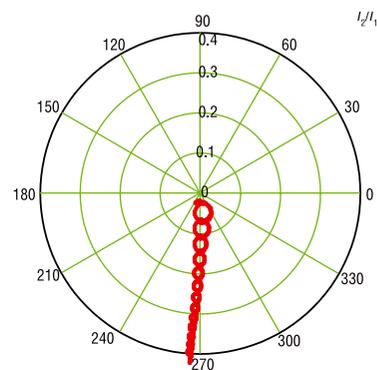


Рис. 14. Траектория изменения сформированной величины  $I_{21}$  на примере кривой БНТ, представленной на рис. 13

уставки функции блокировки, равной менее 5%, что может оказать влияние на быстродействие и чувствительность защиты.

С течением времени форма тока начинает в большей степени принимать характерную форму БНТ (значение угла уменьшается) и содержание второй гармоники оказывается выше 20%.

#### 1. Разработка алгоритма

В классическом способе отстройки от БНТ производится сравнение амплитуды второй гармоники с амплитудой основной гармоники дифференциального тока. При выполнении такой оценки, однако, пренебрегают еще одним параметром – разницей фаз между током второй и основной гармоник.

Очевидно, что вектор тока второй гармоники вращается с в два раза большей скоростью, нежели вектор тока основной гармоники. Но это обстоятельство легко учесть.

Таким образом, возникает вопрос: может ли оценка разницы фаз между векторами второй и основной гармоник тока намагничивания, в дополнение к оценке соотношения амплитуд этих величин, обеспечивать лучшую идентификацию БНТ и внутренних КЗ?

В поиске ответа на этот вопрос был введен следующий сигнал:

$$I_{21} = \frac{I_2}{I_1 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{I_2}{I_1} \langle \arg(I_2) - 2 \cdot \arg(I_1) \rangle \quad (10)$$

где:

$I_2$  – вектор тока второй гармоники, вращающийся с частотой  $2\omega$  ( $\omega$  – частота системы в радианах),

$I_1$  – вектор тока основной гармоники, вращающийся с частотой  $\omega$ .

Величина (10) приведена к фазе и скорости вращения вектора второй гармоники (путем вычитания удвоенной фазы второй гармоники). В нормальном режиме как амплитуда, так и аргумент комплексной величины  $I_{21}$ , являются постоянными величинами.

## 2. Анализ эффективности предлагаемого способа

### ■ Аналитическая оценка

Для анализа эффективности предлагаемого способа в части отстройки от БНТ была рассмотрена идеализированная кривая БНТ (см. рис. 3) и были вычислены как содержание второй гармоники в этом токе, так и разность фаз между токами основной и второй гармоники. В результате был сделан вывод о том, что при БНТ разность фаз оказывается близкой либо  $+90$ , либо к  $-90$  эл. град.

Вычисления были также выполнены для формы кривой БНТ, который содержал апериодическую составляющую с различной по значению постоянной времени затухания. И вновь аналитически было доказано то, что разность фаз между токами основной и второй гармоники оказывается близкой к  $90$  эл. град, в независимости от того, составляло ли содержание второй гармоники в токе менее или более  $20\%$ .

Для иллюстрации этого на рис. 14 на комплексной плоскости приведена траектория изменения величины  $I_{21}$  (при охвате диапазоном интегрирования значений кривой тока, представленных на рис. 13). Как видно, хотя и доля содержания второй гармоники в токе снижается практически до нуля, траектория изменения сформированной величины продолжает проходить вблизи оси  $\pm 90$  эл. град.

Необходимо отметить, что на представленной комплексной плоскости характеристикой срабатывания традиционной функции отстройки от БНТ является окружность с радиусом  $0.15-0.20$  (блокировка будет действовать при попадании вектора за пределы данной окружности). На основе этого можно сказать, что в представленном примере, устройство защиты с функцией блокировки по второй гармонике сработает ложно.

### ■ Статистическая оценка

Действие представленного алгоритма было испытано на различного рода формах БНТ, полученных как путем моделирования, так и на физических моделях силового трансформатора.

Были рассмотрены следующие возможные ситуации:

а) Включение под напряжение трансформаторов как соединением обмоток по схеме «звезда-треугольник», так и с соединением обмоток по схеме «звезда-звезда»

б) Включение трансформаторов под напряжение как со стороны обмоток, соединенных по схеме «звезда», так и со стороны обмоток, соединенных по схеме «треугольник»

### БНТ (для всех трансформаторов)

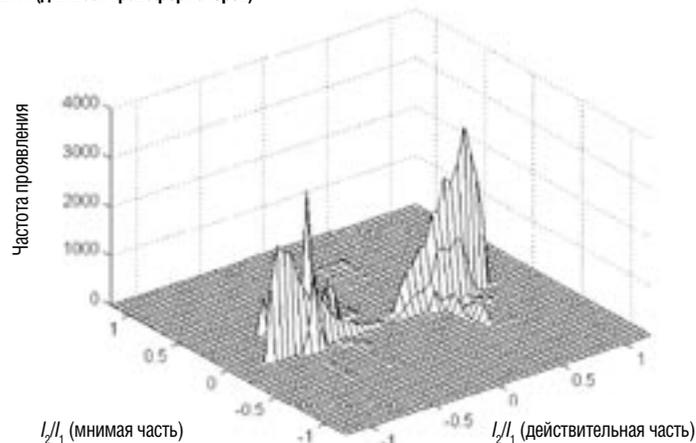


Рис. 15. Гистограмма изменения сигнала  $I_{21}$  при различных БНТ (различные трансформаторы)

### Внутренние КЗ (схема соединения обмоток трансформатора – Yy)

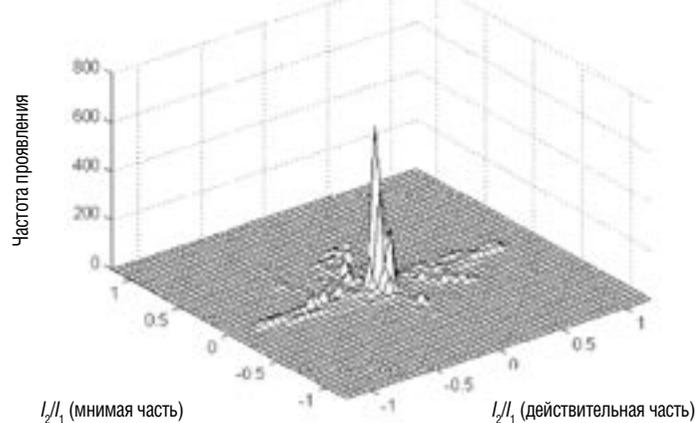


Рис. 16. Гистограмма изменения сигнала  $I_{21}$  при различных внутренних КЗ (трансформаторы с соединением обмоток по схеме «звезда-звезда»)

### Внутренние КЗ (схема соединения обмоток трансформатора – Yd)

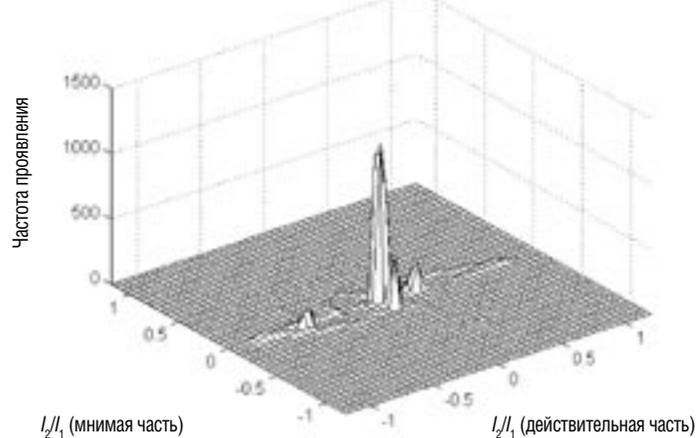


Рис. 17. Гистограмма изменения сигнала  $I_{21}$  при различных внутренних КЗ (трансформаторы с соединением обмоток по схеме «треугольник-звезда»)

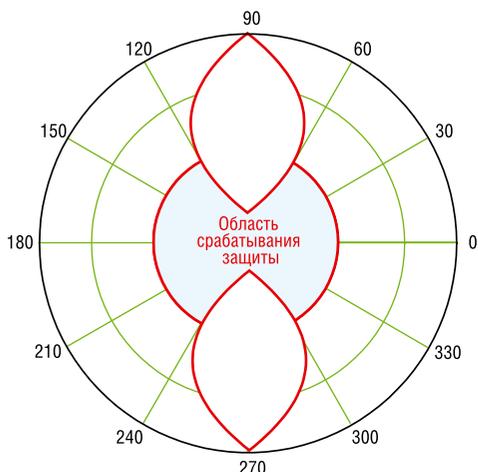


Рис. 18. Область, в которой разрешается срабатывание защиты, при использовании алгоритма блокировки при БНТ на основе оценки величины  $I_{21}$

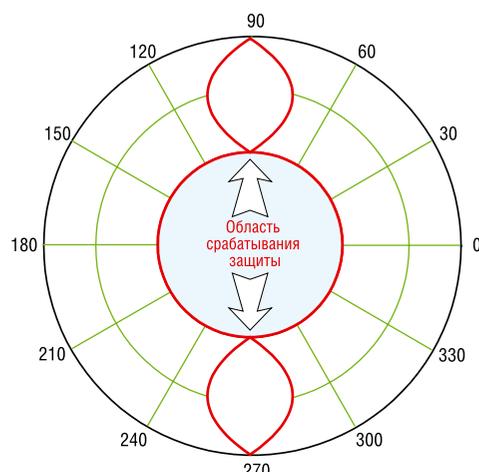


Рис. 19. Расширение области, в которой разрешается срабатывание защиты, при использовании алгоритма блокировки при БНТ на основе оценки величины  $I_{21}$

в) Включение трансформаторов на внутреннее КЗ

г) Производился учет различных факторов, оказывающих влияние на амплитуду и форму БНТ (включение от систем различной мощности, включение при различных уровнях остаточной индукции и различном значении фазы напряжения и т.д.).

Выполненный анализ показал лучшую эффективность предлагаемого метода по сравнению с традиционным методом отстройки от БНТ.

Для иллюстрации этого на рис. 15 представлена гистограмма изменения сигнала  $I_{21}$  для многочисленных случаев БНТ, проявившихся в результате включения под напряжение обмоток трансформатора с различными схемами соединения. Как видно, значения комплексной величины  $I_{21}$  концентрируются вдоль оси  $\pm 90$  эл. град.

Для сравнения, рис. 16 и 17 иллюстрируют гистограмму изменения сигнала  $I_{21}$  при внутренних КЗ в трансформаторах с соединением обмоток по схеме «звезда-звезда» и «треугольник-звезда», соответственно. Значения сигнала  $I_{21}$  находится вблизи начала координат комплексной плоскости. Значения на удалении от начала координат обусловлены переходными процессами и распределяются достаточно однородно. Таким образом, имеется незначительное перекрещивание той области, в которой находятся значения вектора при внутреннем КЗ (рис. 16 и 17) и области, в которой находятся значения вектора при БНТ (рис. 15). Это обеспечивает надежную работу нового алгоритма.

### 3. Области разрешения срабатывания защиты и ее блокировки

При учете всего вышесказанного областью, в которой разрешается срабатывание защиты, на основе оценки местоположения вектора  $I_{21}$  на комплексной плоскости, выбрана область, представленная на рис. 18.

При этом применительно к областям, в которых разрешается срабатывание защиты и ее блокировки, справедливо следующее:

- Область, в которой разрешается срабатывание защиты, представляет собой окружность с радиусом, значение которого составляет от амплитуды основной гармоники дифференциального тока при значении фазы сформированной величины равной 0 или 180 эл. град (традиционная функция блокировки при БНТ);

- Для значений фазы величины  $I_{21}$ , близких к 90 эл. град., из области, в которой разрешается срабатывание, вырезается две области овальной формы, для обеспечения блокировки срабатывания дифференциальной защиты при БНТ с малым содержанием второй гармоники;

- Вырезы овальной формы не являются постоянными по площади – их площадь изменяется с течением времени. Изначально площадь вырезов значительна (рис. 18), но через несколько периодов характеристика срабатывания функции блокировки при БНТ принимает традиционный вид (рис. 19).

В результате динамического изменения площади области, в которой разрешается срабатывание защиты, имеем зависимость от времени характеристику функции блокировки при БНТ на основе оценки вектора  $I_{21}$ . Время, необходи-

мое для разблокировки защиты (время, по истечении которого снимается блокировка от функции блокировки при БНТ) является функцией  $I_{21}$ . Если указанный вектор не изменяется во времени, может быть получена постоянная характеристика (см. рис. 20). Полученная характеристика обладает некоторыми отличительными особенностями:

- Если фаза  $I_{21}$  близка к 0 или к 180 эл. град., блокировка снимается немедленно в независимости от доли содержания второй гармоники в дифференциальном токе;

- Если фаза  $I_{21}$  близка к  $\pm 90$  эл. град., тогда значение выдержки времени зависит от доли содержания второй гармоники в дифференциальном токе: если характерно малое содержание второй гармоники, значение выдержки времени оказывается незначительным; если содержание второй гармоники в дифференциальном токе составляет порядка 20 %, тогда значение выдержки времени равняется приблизительно 5–6 периодам промышленной частоты; этого достаточно для предотвращения неправильной работы защиты при БНТ, когда содержание второй гармоники составляет менее 20 %.

### 4. Тестирование алгоритма

Представленный алгоритм был протестирован с использованием симулятора RTDS [17]. При тестировании алгоритма были использованы как смоделированные на программном обеспечении БНТ, так и осциллограммы БНТ на трансформаторах, находящихся в работе.

Тестирование подтвердило эффективность работы нового алгоритма.

## Выводы

В данной статье представлен новый алгоритм отстройки от БНТ для дифференциальных защит трансформатора. Данный алгоритм является усовершенствованием традиционно используемого способа отстройки от БНТ по второй гармонике – вместо измерения отношения амплитуды второй гармоники к амплитуде основной, алгоритм производит учет фазового соотношения между составляющими второй и основной гармоник дифференциального тока.

В результате был представлен новый сигнал, на основе которого принимается решение о запрете срабатывания защиты, и представлена соответствующая характеристика срабатывания функции отстройки от БНТ. Зона срабатывания данной характеристики выполнена изменяющейся для обеспечения надежного срабатывания защиты при внутренних КЗ.

Новый алгоритм был успешно реализован в физических устройствах защиты.

Результаты большого числа испытаний подтвердили, что данный алгоритм повышает надежность несрабатывания защиты при БНТ при одновременном обеспечении надежности срабатывания при внутренних КЗ. □

## Список литературы

1. Kasztenny B. and Kezunovic M.: "Improved Power Transformer Protection Using Numerical Re-lays", IEEE Computer Applications in Power, Vol.11, No.4, October 1998, pp.39–45.
2. IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems, IEEE Publication, 1991.
3. Horowitz S.H. and Phadke A.G.: Power system relaying, Wiley & Sons, New York, 1992.
4. Blume L.F.: Transformer engineering, Wiley & Sons, New York 1951.
5. Karsai K., Kerenyi D. and Kiss L.: Large power transformers, Elsevier, New York, 1987.
6. Elmore W.A.: Protective relaying. Theory and Applications, Marcel Dekker, New York, 1994.
7. Giuliante T. and Clough G.: "Advances In The Design Of Differential Protection For Power Trans-formers", Texas A&M University Conference for Protective Relay Engineers, College Station, Texas, April 5, 1995.
8. IEEE Tutorial Course: Advancements in microprocessor based protection and communication, IEEE Catalog No. 97TP120-0, 1997.
9. Kasztenny B., Rosolowski E., Saha M.M. and Hillstrom B.: "A Comparative Analysis Of Protec-tion Principles For Multi-Criteria Power Transformer Relaying", Proceedings of the 12th Power Systems Com-

putation Conference, Dresden, Germany, August 19–23, 1996, pp.107–113.

10. Habib M. and Marin M.A.: "A Comparative Analysis Of Digital Relaying Algorithms For The Dif-ferential Protection Of Three Phase Trans-formers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.3, August 1988, pp.1378–1384.

11. Inagaki K., Higaki M., Matsui Y., Kurita K., Suzuki M., Yoshida K. and Maeda T.: "Digital Protection Method For Power Trans-formers Based On An Equivalent Circuit Composed Of Inverse In-ductance", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988, pp.1501-8.

12. Sidu T.S., Sachdev M.S. and Wood H.C.: "Detecting Transformer Winding Faults Using Non-Linear Models Of Transformers", Proceedings of the 4th International Conference Developments in Power System Protection, IEE Publication No.302, 1989, pp. 70–74.

13. Yabe K.: "Power Differential Meth-od For Discrimination Between Fault And

Magnetizing Inrush Current In Trans-formers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.3, July 1997, pp.1109–1118.

14. Thorp J.S. and Phadke A.G.: "A New Computer Based Flux Restrained Current Differential Relay For Power Transformer Protection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.11, November 1983, pp. 3624–3629.

15. Sachdev M.S., Sidhu T.S. and Wood H.C.: "A Digital Relaying Algorithm For Detecting Trans-former Winding Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.3, July 1989, pp.1638–1648.

16. Pozzuoli M.P.: "Meeting The Challenges Of The New Millennium: The Universal Relay", Texas A&M University Conference for Protective Relay Engineers, College Station, Texas, April 5–8, 1999.

17. Real Time Digital Simulator (RTDS). Reference Manual. Manitoba HVDS Research Center, 1999.

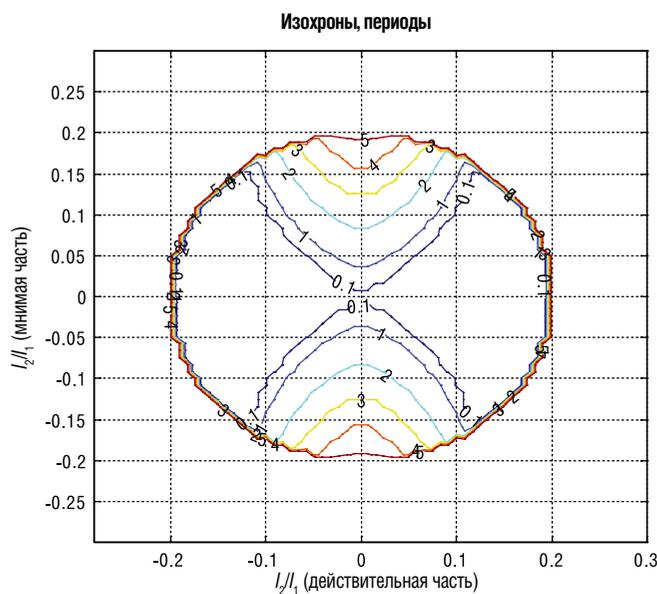
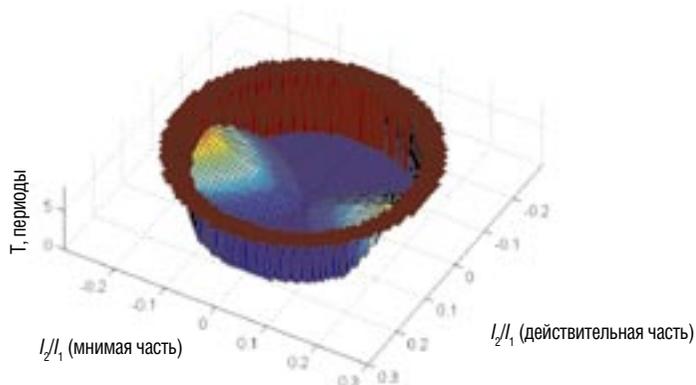


Рис. 20. Эффективная характеристика срабатывания ( $T-I_{21}$ ) функции блокировки при БНТ на основе оценки величины (трехмерный граф и изохроны)