



PS1 – S3-06



Повышение чувствительности и быстродействия средств защиты и противоаварийного управления силовых трансформаторов

В.К. ВАНИН, М.Г. ПОПОВ, С.О. ПОПОВ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Россия

PopovMG@eef.spbstu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электроэнергетические системы (ЭЭС), трансформаторное оборудование, дифференциальная защита, алгоритмы формирования тормозных токов, трансформатор тока (ТТ), восстановление первичного тока, ток намагничивания.

1 ВВЕДЕНИЕ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Развитие энергосистемы сопровождается стремительным ростом введения трансформаторной мощности на сооружаемых и реконструируемых подстанциях 110-750 кВ. В связи с этим устойчивость электроснабжения в объединенной электроэнергетической системе (ЭЭС) в значительной степени определяется надежностью работы силового оборудования. Так по данным [1,2] в последнее время наблюдается увеличение до 18% суммарного экономического и технологического ущерба, обусловленного ложным отключением и отказом защиты силовых трансформаторов вследствие их внутренних повреждений. Это объясняется, во-первых, значительной до 60-100% стоимости аварийного ремонта мощного трансформатора, во-вторых, большей (относительно нормативного срока) длительностью аварийного ремонта. Кроме этого, в большинстве случаев после аварийного возгорания трансформатор вообще не подлежит восстановлению, а последующая экспертиза аварии не выявляет первоначальную причину повреждения из-за большого объема разрушений и, как следствие не позволяет внести необходимые конструктивные изменения, направленные на повышение надежности силового оборудования. В связи с этим проблема быстродействия и чувствительности защит силовых трансформаторов является актуальной и приоритетной в решении задачи повышения надежности работы электрооборудования ЭЭС. Повышение быстродействия и чувствительности основных токовых продольных дифференциальных защит силовых трансформаторов позволит снизить объем их повреждений, исключить возможность возгорания и, как следствие, сократить амортизационные затраты на ремонт.

Совершенствование средств защиты силовых трансформаторов должно осуществляться на основе качественного системного анализа переходных процессов в энергосистеме. Исследование физических явлений в трансформаторах при различных повреждениях трансформаторов и внешних коммутациях производится с использованием адекватных математических моделей электрооборудования, учитывающих реальное расположение фазных обмоток, их схему и группу соединения, а также нелинейность их собственных и взаимных индуктивностей. Методы разработки уточненного математического описания силовых трансформаторов (автотрансформаторов) разработаны на кафедре «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и достаточно подробно изложены в [3].

Настоящее исследование посвящено совершенствованию функциональных алгоритмов торможения и измерения дифференциальных токов с применением математического описания измерительных трансформаторов тока. Восстановление первичных сигналов с учетом погрешности измерительных трансформаторов является наиболее перспективным направлением в решении проблемы быстродействия, чувствительности и селективности работы дифференциальной защиты силовых трансформаторов. В последующих разделах показано, что задача повышения быстродействия защиты не может быть решена без количественной и качественной оценки токов намагничивания, как силового трансформатора, так и измерительных трансформаторов тока (ТТ).

2 ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В переходных процессах влияние токов намагничивания силового трансформатора и трансформаторов тока может быть различным. Ток намагничивания силового трансформатора достигает больших значений только при включении на малую нагрузку или холостой ход. При этом в сигналах тока будет сильно проявляться 2-ая и 5-ая гармоника (см. рис 1), при появлении которых можно судить о росте тока намагничивания силового трансформатора.

Важно отметить, что при включении могут насыщаться измерительные трансформаторы тока. В результате чего происходит снижение уровня второй гармоники в составе сигнала вторичного тока (кривая 2, рис.1) и таким образом может произойти ложное отключение трансформатора.

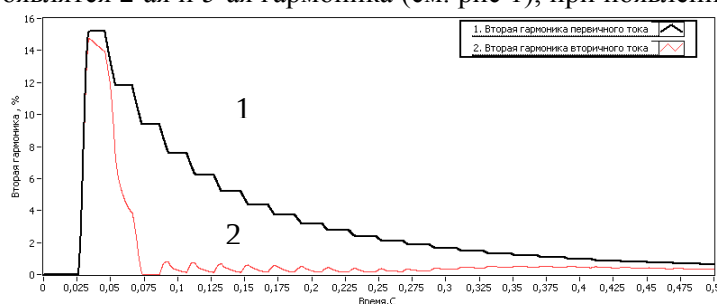


Рис. 1: Изменение второй гармоники при включении трансформатора на холостой ход

В режимах короткого замыкания ток намагничивания силового трансформатора практически отсутствует и, как следствие этого, ток небаланса защиты в основном определяется токами намагничивания измерительных ТТ.

$$i_{нб} = i_{2I} - i_{2II} = (i'_{1I} - i'_{\mu I}) - (i'_{1II} - i'_{\mu II}) = i'_{\mu T} + i'_{\mu II} - i'_{\mu I} + U'_{рпн} + f_{урз} \quad (1)$$

где $i'_{1I}, i'_{2I}, i'_{\mu I}$ — соответственно приведенный первичный, вторичный токи и приведенное значение намагничивающего тока ТТ первого плеча; $i'_{1II}, i'_{2II}, i'_{\mu II}$ — тоже второго плеча защиты; $i'_{\mu T}$ — ток намагничивания силового трансформатора; $U'_{рпн}$ погрешность обусловленная регулированием напряжения под нагрузкой; $f_{урз}$ погрешность устройств релейной защиты, обусловленная преобразованием АЦП, погрешностью вычислений и др.

В выражении (1) можно выделить независимую от первичного тока составляющую тока небаланса, которая характеризуется характеристиками АЦП и регулирующим эффектом РПН силового трансформатора. Как правило, данные составляющие тока небаланса незначительны — диапазон регулирования напряжения устройства $\Delta U_{рпн} = \pm 16\%$, а погрешность устройств релейной защиты $f_{урз}$ составляет не более 3%. В установившихся режимах ток небаланса незначителен и с использованием достаточно простых методов торможения обеспечивается необходимая эффективность работы дифференциальной защиты.

В переходных режимах с увеличением уровня токов плеч защиты возрастает относительный ток небаланса. В этих режимах мгновенная погрешность трансформаторов тока

увеличивается до 70% (см. рис 2,е), а также может достигать величины более 100%. Оценка мгновенной (локальной) погрешности трансформатора тока $\varepsilon_{\text{ТТ}}$ выполняется по выражению

$$\varepsilon_{\text{ТТ}} = \frac{1}{I_1} \frac{1}{T} \int_0^T (i_1' - i_2)^2 dt$$

где I_1 - действующее значение приведенного первичного тока

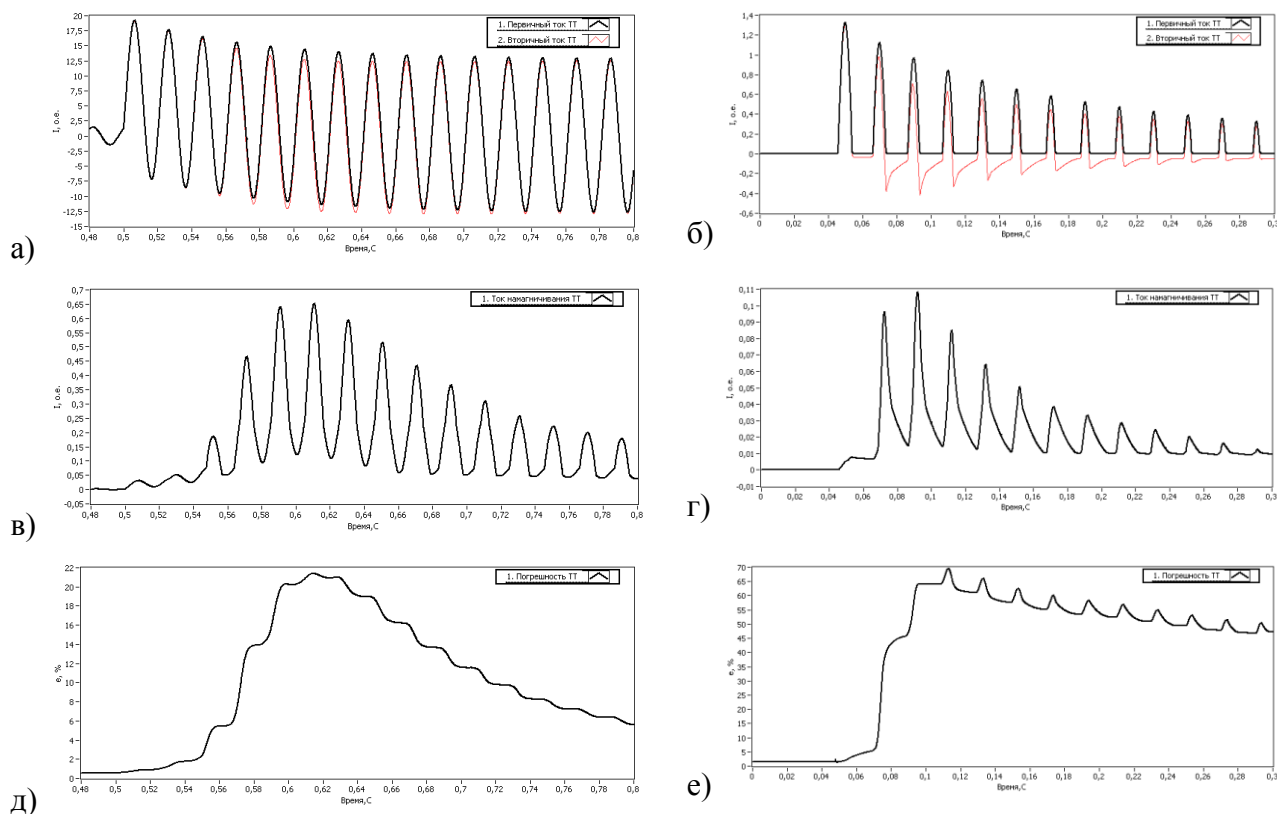


Рис. 2: Переходные процессы в трансформаторах тока
а,б) первичный(приведенный) и вторичный ток при КЗ и включении на холостой ход;
в,г) ток намагничивания при КЗ и включении на холостой ход;
д,е) полная погрешность ТТ при КЗ и включении на холостой ход

В этой связи для повышения чувствительности применяется торможение дифференциальных защит (см. рис. 3). При этом условие срабатывания дифференциальной защиты описывается, в общем случае, неравенством:

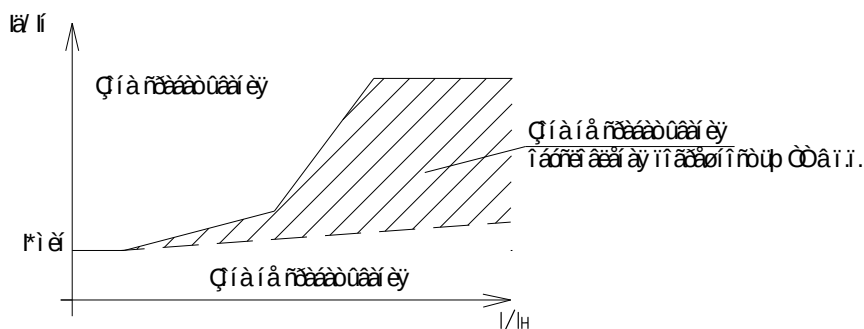


Рис. 3: Характеристика срабатывания дифференциальной защиты

$$I_d - I_{с.мин} - k_m I_m > 0$$

где I_d - дифференциальный ток; $I_{с.мин}$ - минимальный ток срабатывания защиты;

I_m тормозной ток; k_m - коэффициент торможения.

При этом величина тока небаланса зависит не только от кратности протекающего тока, но и от формы этого сигнала. Это приводит к противоречивым требованиям к формированию тормозных токов и определяет их большое разнообразие. Наиболее эффективными являются сигналы торможения, получаемые из токов плеч дифференциальных защит. Широко распространенными являются следующие алгоритмы (см. табл. 1, рис. 4): сумма абсолютных значений токов всех присоединений, максимальная сумма положительных и отрицательных полувольт токов плеч, разность суммы абсолютных значений и модуля дифференциального тока, максимальный ток плеча.

Табл. 1: Сравнительная характеристика тормозных сигналов при внешних КЗ

Название	Функциональные алгоритмы	$\left(\frac{I_d}{I_{m, \max}}\right)$			
		$\varepsilon_{TT} < 10\%$	$\varepsilon_{TT} = 20\%$	$\varepsilon_{TT} = 40\%$	$\varepsilon_{TT} = 60\%$
Сумма абсолютных значений токов всех плеч	$\sum_{k=1}^N i_k $	0.06	0.2	0.38	0.61
Максимальная сумма положительных или отрицательных полувольт токов плеч	$\max\{i_{\text{пол}}, i_{\text{отп}}\}$ $i_{\text{пол}} = 0,5 \cdot \sum_{k=1}^N (i_k + i_k), i_{\text{отп}} = 0,5 \cdot \sum_{k=1}^N (i_k - i_k)$	0.06	0.2	0.38	0.6
Разность суммы абсолютных значений и модуля дифференциального тока	$\sum_{k=1}^N i_k - \left \sum_{k=1}^N i_k \right $	0.03	0.11	0.23	0.41
Максимальный ток плеча	$\max_{k \in N} \{i_k\}$	0.03	0.12	0.27	0.61

Однако, при практической реализации упомянутых алгоритмов возникают значительные трудности, которые обусловлены, во-первых, насыщением сердечников ТТ при больших токах КЗ и апериодической составляющей в первичном токе; во-вторых, несовпадением фазовых углов в переходных режимах работы из-за значительной угловой погрешности ТТ.

Наиболее приемлемыми, согласно [4] являются тормозные сигналы, сформированные по алгоритмам 1,2. Недостатком этих алгоритмов является наличие тормозного сигнала при внутренних КЗ, что не желательно с точки зрения наибольшей чувствительности и надежности срабатывания защиты. В известной мере преодолеть указанное противоречие позволяют алгоритмы с использованием фазового торможения, например:

$$I_T = \sqrt{I'_1 I'_2 \cos a},$$

где

$$I'_1 = \max \{i_k\},$$

$$I'_2 = \sum_{k=1}^N I_k - I'_1,$$

$$a = (I'_1)^\wedge (-I'_2)$$

При использовании фазового торможения приходится считаться с методической погрешностью вычисления векторов тока при отклонении частоты от номинальной и наличии апериодической составляющей тока, которая вызывает насыщение ТТ. Частично снизить эту погрешность позволяет использование специальных цифровых фильтров, что в свою очередь приводит к задержке работы дифференциальных защит более чем на 20 мс. Таким образом, полностью исключить неверную работу данных алгоритмов невозможно, что, в конечном

счете, приводит к необходимости увеличивать расчетное значение коэффициента торможения (см. рис. 4) или увеличению времени расчета, и как следствие, к снижению чувствительности и быстродействия.

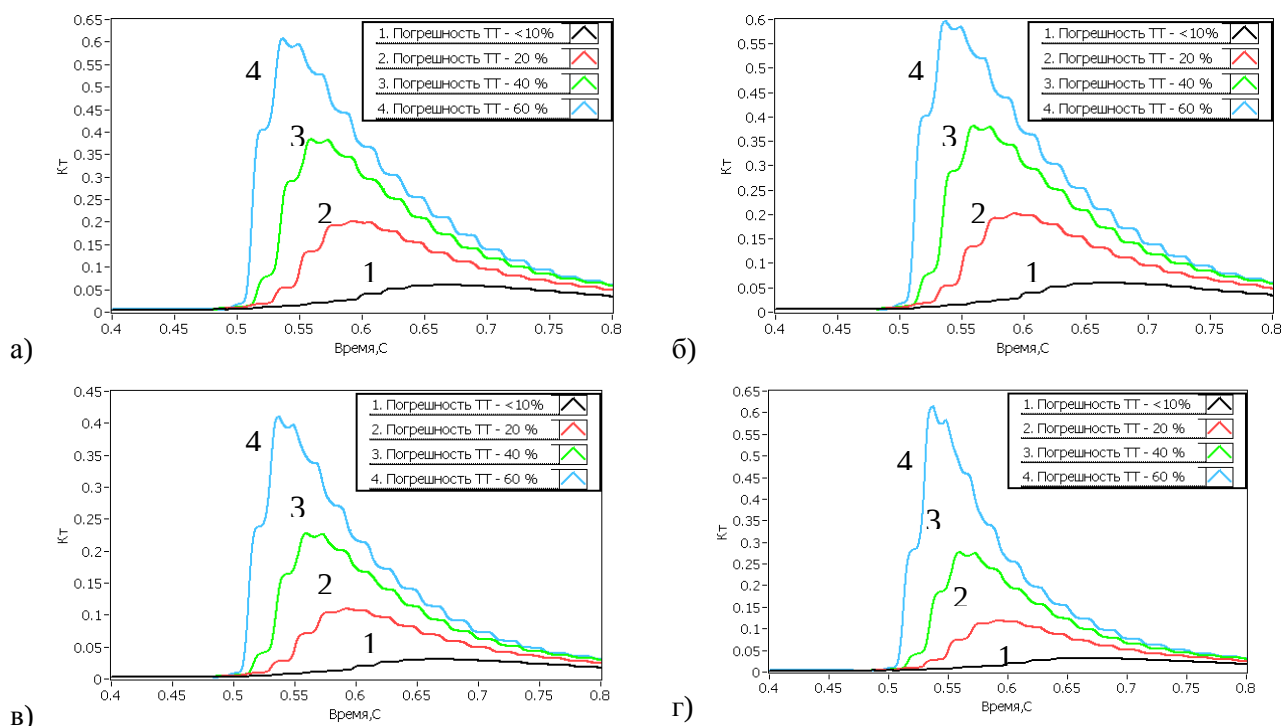


Рис. 4: Отношение дифференциального к тормозному сигналу при различных алгоритмах торможения
 а) максимальный ток плеча
 б) максимальная сумма положительных и отрицательных полувольт токов плеч
 в) сумма абсолютных значений токов плеч
 г) разность абсолютных значений токов плеч и дифференциального тока

Исследования показали, что погрешность трансформаторов тока в динамических режимах энергосистемы является основной причиной, препятствующей дальнейшему повышению быстродействия и чувствительности дифференциальных защит трансформаторов. Безусловно можно утверждать, что при использовании дифференциальных защит истинных первичных токов защита будет обладать существенно более высокими характеристиками. Таким образом встает задача восстановления первичных токов плеч защиты по измеренным вторичным токам.

3 ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АЛГОРИТМАХ ФОРМИРОВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ ТОКОВ

Согласно теории автоматического управления для восстановления входной величины, поступающей в звено с известной передаточной функцией $W_1(p)$, необходимо последовательно

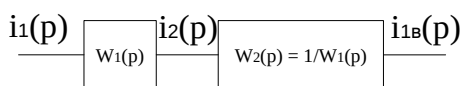


Рис. 5: Использование обратной модели ТТ

подключить звено с обратной передаточной функцией $W_2(p)=1/W_1(p)$. В общем случае передаточное звено 1 должно учитывать параметры всего измерительного тракта, включая характеристики и схему измерительных трансформаторов тока, сопротивление проводов вторичной коммутации и вторичных преобразователей, а также параметры АЦП. При правильном выборе АЦП и высококачественных вторичных преобразователей с достаточным

динамическим диапазоном работы, можно считать, что сигналы тока поступающие на вход обратной модели ТТ линейно пропорциональны вторичному току ТТ $i_{2A'} = i_{2A}$ (см. рис. 6)

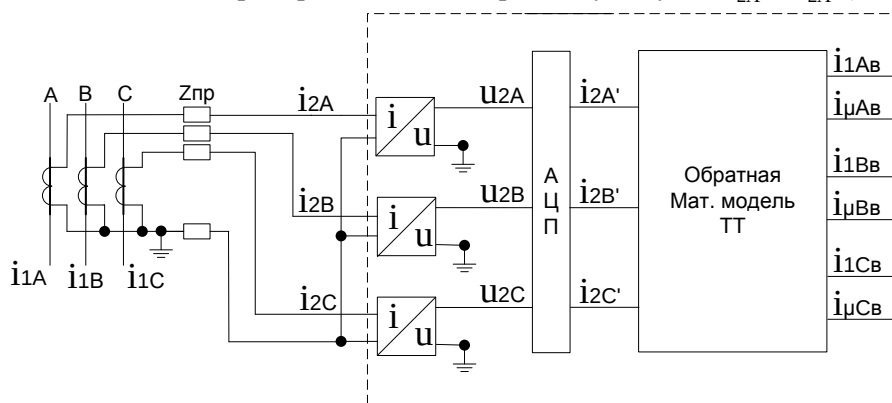


Рис. 6: Структурная схема восстановления первичных токов

Выполнить теоретически полный расчет группы однофазных трансформатора тока позволяет метод фазовых составляющих. Наибольшее внимание развитию этого метода уделено в работах Александрова Г.Н., Евдокунина А.Г., Попова М.Г., Рагозина А.А., Шакирова М.А. В результате использования обратной модели трансформаторов тока появляется возможность частичной коррекции первичных токов в темпе переходного процесса. К тому же, модель позволяет по-новому строить схемы защиты, так как в ней непосредственно имеется сигнал, пропорциональный току намагничивания трансформаторов тока, определяющим ток небаланса дифференциальной защиты при внешних и внутренних КЗ. При этом трудности вызывает аппроксимации кривой намагничивания ферромагнитного материала, обусловлена необходимостью учета следующих факторов: остаточной индукцией трансформаторов тока; предельными частными циклами характеристики $H=f(B)$; частотной зависимостью характеристики намагничивания. Некоторые методы, учитывающие данные явления представлены [5]. Сказанное обуславливает то, что время расчета адекватной математической модели может быть недопустимо велико. Вместе с тем в некоторых практических приложениях можно использовать упрощенное математическое описание ТТ.

С практической точки зрения, наибольший интерес представляет алгоритм формирования тормозного тока на основе геометрической разности намагничивающих токов ТТ всех присоединений объекта защиты. В алгебраической форме этот способ можно представить в виде:

$$i_m = \sum_{j=1}^l i'_{\mu j} - \sum_{s=1}^m i'_{\mu s} \quad (2)$$

где $i'_{\mu j}$ и $i'_{\mu s}$ - намагничивающие токи трансформаторов тока соответственно j-го и s-го плеча защиты; l- число плеч по которым токи притекают в зону защиты; m – число плеч, по которым токи вытекают из зоны защиты.

Дифференциальный сигнал при внешнем КЗ определяется по выражению

$$i_o = (i'_{\mu II} - i'_{\mu IIB}) - (i'_{\mu I} - i'_{\mu IB}) \quad (3)$$

где $i'_{\mu I}$, $i'_{\mu II}$ - приведенные значения намагничивающих токов;

$i'_{\mu IK}$, $i'_{\mu IIB}$ - расчетные значения приведенных намагничивающих токов ТТ.

Тогда, тормозной ток в режиме внешнего КЗ будет рассчитываться по уравнению

$$i_m = i'_{\mu IB} + i'_{\mu IIB} \quad (4)$$

Рабочий и тормозной сигналы при КЗ в зоне действия защиты:

$$i_o = (i_{2I} + i'_{\mu IB}) + (i_{2II} + i'_{\mu IIB}) \quad (5)$$

$$i_m = i'_{\mu Ik} - i'_{\mu Ik} \quad (6)$$

Наиболее неблагоприятные условия работы дифференциальной защиты характеризуются насыщением трансформаторов тока одного из токов плеч. При этом если перейти к действующим значениям можно записать

$$\left(\frac{I_{\partial}}{I_m} \right)_{\text{внешКЗ}} = \frac{I'_{\mu I} - I'_{\mu Ik}}{I'_{\mu Ik}} = \frac{I'_{\mu I} - k_{\delta} I'_{\mu I}}{k_{\delta} I'_{\mu I}}, \quad (7)$$

$$\left(\frac{I_{\partial}}{I_m} \right)_{\text{внутрКЗ}} = \frac{(I_{2I} + I'_{\mu Ik})}{I'_{\mu Ik}} = \frac{I_{2I} + k_{\delta} I'_{\mu I}}{k_{\delta} I'_{\mu I}} \quad (8)$$

где $k_{\delta} = \frac{I'_{\mu IB}}{I'_{\mu I}}$ - коэффициент погрешности восстановления тока намагничивания при использовании

обратной модели трансформатора тока

Очевидно, что при использовании обратной модели, обеспечивающей восстановления тока намагничивания с погрешностью не более 50 %, выполняется условие $I_m > I_{\partial}$. При внутренних КЗ всегда выполняется условие $I_m < I_{\partial}$ и чувствительность защиты в переходных режимах существенно увеличивается, и определяется только постоянной составляющей тока небаланса.

В результате сравнительного анализа различных способов формирования тормозного сигнала при восстановлении тока намагничивания с использованием математической модели ТТ выявлено наименьшее загробление защиты с применением вышеописанного алгоритма. Установлено, что во всех расчетных исследованиях КЗ в зоне действия величины относительного тока срабатывания дифференциальной защиты асимптотически стремится к значению кратности тока (см. рис 7,а). При внешних КЗ расчетный ток срабатывания находится в области отрицательных значений (см. рис 7,б).

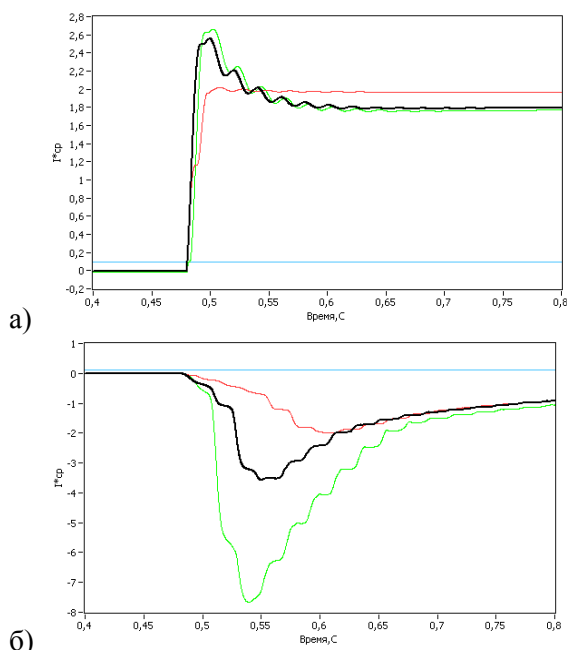


Рис. 7: Характер изменения тока срабатывания при КЗ в зоне (а) и вне зоны (б) срабатывания

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Analysis of transformer failures. William H. Bartley P.E. // International association of engineering insurers 36-th annual conference, Stockholm, 2003.
- [2] Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // «Электричество». 2010, № 2. С. 27-31.
- [3] Гараева Н.Р., Медина Гарай К.Э., Попов М.Г. Разработка методики синтеза усовершенствованных математических моделей автотрансформатора.// «Изв. вузов Электромеханика», 2010, спецвыпуск «Диагностика энергооборудования». С. 28-30.
- [4] Добродеев К.М., Курицин В.П. Дифференциальное реле для защиты трансформаторов // «Изв. Вузов. Электромеханика». 1977, № 9. С. 993-999.
- [5] Наумов В.А., Шевцов В.М. Математические модели трансформатора тока в исследованиях алгоритмов дифференциальных защит // «Электрические станции». 2003, № 3. С. 51-56.