



## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

### Повышение чувствительности и быстродействия дифференциальной релейной защиты путем использования вспомогательных признаков аварийных режимов

Иванов И. Ю., канд. техн. наук

Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Татарстан — филиал ОАО «СО ЕЭС», Казань

Ференец А. В., канд. техн. наук

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева

Традиционные признаки выявления аварийных режимов электрооборудования, используемые в современных дифференциальных защитах, не имеют достаточной устойчивости в переходных режимах КЗ. При КЗ вне защищаемого оборудования это может обусловить неселективную работу защиты, а при повреждениях на защищаемом оборудовании — существенные задержки в ликвидации аварий. Повысить показатели чувствительности и быстродействия защиты можно с помощью вспомогательных признаков аварийных режимов, свойственных режимам внутреннего и внешнего КЗ в переходных режимах. Эти признаки имеют большие преимущества перед традиционными, так как позволяют распознавать аварийный режим за несколько миллисекунд, главным образом — в условиях переходного режима. На основе предлагаемых вспомогательных признаков разработаны алгоритмы, позволяющие определять зону повреждения до срабатывания реагирующих органов дифференциальной защиты и формировать в функциональной схеме защиты разрешающие и запрещающие сигналы. Благодаря этим сигналам обеспечивается селективность дифференциальной защиты в переходных режимах КЗ без уменьшения быстродействия и чувствительности защиты. Увеличение быстродействия и чувствительности дифференциальной защиты в свою очередь позволит снизить глубину и длительность провалов напряжения при КЗ в сети 110 – 220 кВ, что крайне важно для обеспечения эффективной работы промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом, нарушение электроснабжения которых даже на доли секунды приводит к значительному экономическому ущербу.

**Ключевые слова:** дифференциальная защита, насыщение трансформаторов тока, переходный режим, моделирование энергосистемы.

В технике релейной защиты [1] одним из наиболее широко применяемых является дифференциальный принцип, основанный на сравнении дифференциального сигнала с уставкой срабатывания, зависимой от значения тормозного сигнала [2]. Современные микропроцессорные устройства дифференциальной защиты [3] ответственных электроэнергетических объектов должны селективно и быстро (с временем до двух периодов промышленной частоты [4]) отключать поврежденное оборудование. При достаточно больших значениях постоянной времени затухания апериодической составляющей в токе КЗ дифференциальные защиты работают в условиях интенсивных электромагнитных переходных процессов [5].

Сложность в обеспечении селективности и быстродействия дифференциальных защит в условиях влияния переходных процессов обусловлена насыщением электромагнитных трансформаторов тока (ТТ), погрешности которых в переходных режимах КЗ значительно выше, чем в установившемся режиме [6]. При внешних КЗ повышенные погрешности ТТ могут привести к неселективной работе дифференциальной защиты, а при повреждениях на защищаемом оборудовании — к существенным задержкам в ликвидации аварий [7].

Для исследования влияния параметров первичной сети и погрешностей электромагнитных ТТ на работу дифференциальной защиты, а также для получения количественной оценки чувствительности и быстродействия

защиты разработана компьютерная модель дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 110 – 220 кВ [8]. Принятая методика моделирования основана на вычислении переходного тока КЗ в симметричной трехфазной сети с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями [9], численном дифференцировании нелинейного уравнения, описывающего работу электромагнитного трансформатора тока в переходном процессе с учетом его насыщения [10], и на дискретизации входного сигнала устройства релейной защиты с помощью дискретного преобразования Фурье [11, 12].

Результаты моделирования и проведенный анализ признаков идентификации режимов, применяемых в современных устройствах дифференциальной защиты, свидетельствуют:

традиционно используемые признаки аварийных режимов (дифференциальный и тормозной сигналы) не позволяют обеспечить требуемые показатели чувствительности и быстродействия защиты в условиях влияния интенсивных переходных процессов;

существенное повышение чувствительности и быстродействия защиты может быть достигнуто с помощью вспомогательных признаков, свойственных режимам внутреннего и внешнего КЗ в переходных режимах [13], в дополнение к традиционному принципу действия.

К наиболее информативным вспомогательным признакам следует отнести:

превышение времени совпадения полуволн одинаковой полярности токов плеч дифференциальной защиты  $t_{\text{совп}}$  над временем блокировки  $t_{\text{блок}}$  при внутренних КЗ;

отставание фронта волны дифференциального сигнала от фронта волны тормозного сигнала при внешних КЗ;

превышение длительности интервала времени от максимума дифференциального сигнала до минимума  $\Delta t_2$  над длительностью интервала времени от момента появления дифференциального сигнала до его максимума  $\Delta t_1$  при внешних КЗ.

Причиной преимущества первого вспомогательного признака в переходном режиме КЗ (в отношении динамических характеристик защиты) является стабильность его проявления даже при сильном амплитудном искажении формы кривой тока. Второй вспомогательный признак позволяет быстро определить факт внешнего КЗ на интервале идеальной трансформации ТТ (до насыще-

ния) и тем самым предотвратить неселективную работу защиты. Третий вспомогательный признак базируется на различии свойств насыщенного и ненасыщенного ТТ и поэтому проявляется тем интенсивнее, чем больше изменяется магнитное состояние сердечника насыщенного ТТ за период.

На основе указанных признаков в функциональной схеме дифференциальной защиты могут быть реализованы следующие блоки: разрешающий — для разрешения работы защиты при выявлении внутреннего КЗ и запрещающий — для блокирования работы защиты при выявлении внешнего КЗ.

Для контроля первого вспомогательного признака необходимо полуволны синусоидального тока с каждой стороны защищаемого оборудования преобразовать в прямоугольные сигналы соответствующей полярности и проверить их на совпадение. В идеальных условиях угол совпадения при внешних КЗ (т. е. при протекании сквозного тока КЗ) равен  $180^\circ$  ( $t_{\text{совп}} = 0$  мс), в то время как при внутренних КЗ (при равенстве фаз токов подпитки) он составляет  $0^\circ$  ( $t_{\text{совп}} = 10$  мс).

Алгоритм выявления внутреннего КЗ с помощью первого вспомогательного признака поясняется упрощенной функциональной схемой на рис. 1. При возникновении повреждения происходит следующее:

срабатывает пусковой орган защиты;

выделяются положительные и отрицательные полуволны токов плеч дифференциальной защиты;

в зависимости от начальной полярности токов измеряется время совпадения положительных ( $t_{\text{совп}+}$ ) или отрицательных ( $t_{\text{совп}-}$ ) полуволн токов плеч дифференциальной защиты;

указанное время сравнивается с заданным временем блокировки  $t_{\text{блок}}$ .

Время блокировки  $t_{\text{блок}}$  задается в диапазоне 2,22 – 3,61 мс в зависимости от принятого угла блокирования действия защиты на отключения  $\beta$ , который регулируется в диапазоне  $\pm (40 - 65)^\circ$  (по аналогии с углом блокирования, задаваемого в дифференциально-фазных защитах).

Результаты тестирования рассматриваемого алгоритма определения внутреннего КЗ с помощью первого вспомогательного признака приведены в табл. 1. В ней представлены полученные при моделировании значения времени совпадения  $t_{\text{совп}}$  полуволн одинаковой полярности токов плеч дифференциальной защиты при внутреннем КЗ и различных па-

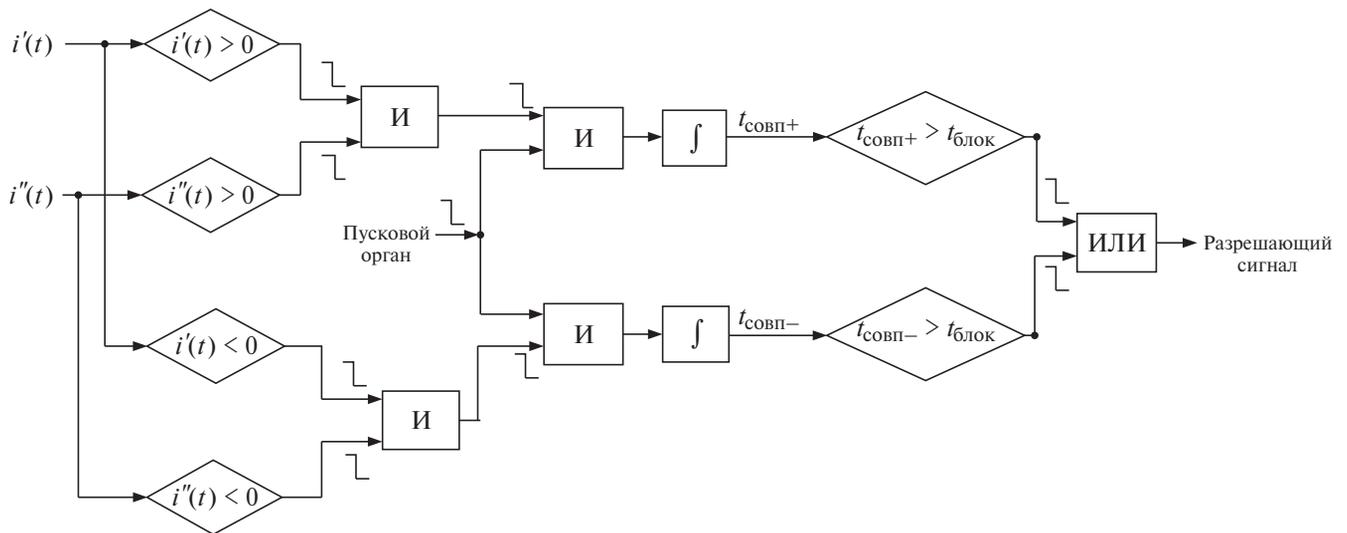


Рис. 1

раметрах системы электроснабжения:  $X/R$  (отношение индуктивного сопротивления участка цепи КЗ);  $k_{max}$  (кратность первичного тока КЗ);  $\delta$  (угол возникновения КЗ, град.);  $k_R$  (коэффициент остаточной намагниченности ТТ). Значения  $t_{совп}$  при внутренних КЗ позволяют судить об устойчивости функционирования первого вспомогательного признака при переходных процессах.

Для контроля второго вспомогательного признака необходимо проанализировать фронты волн дифференциального и тормозного сигналов. В общем случае на интервале идеальной трансформации ТТ (до насыщения) увеличение тормозного сигнала (выше заданной уставки  $C$ ) без такого же увеличения дифференциального сигнала с учетом множителя 0,5 сигнализирует о наличии внешнего КЗ.

Алгоритм определения внешнего КЗ с помощью второго вспомогательного признака реализуется по упрощенной функциональной схеме на рис. 2. При возникновении повреждения:

- срабатывает пусковой орган защиты;
- вычисляется приращение тормозного сигнала  $\Delta I_{\text{торм}}$  в момент выборки  $n$ ;
- определяется приращение дифференциального сигнала  $\Delta I_{\text{диф}}$  в момент выборки  $n$ ;
- рассчитывается отношение  $Delta$  приращения дифференциального сигнала к приращению тормозного сигнала в момент выборки  $n$ ;
- сравниваются значение приращения тормозного сигнала  $\Delta I_{\text{торм}}$  с заданной уставкой

Таблица 1

Параметр системы	$\delta$ , град.	$k_R$	$t_{совп}$ , мс
№ 1: $X/R = 10$ , $k_{max} = 10$	0	0	10
		0,5	10
		0,8	9,5
	45	0	10
		0,5	9,5
		0,8	8,5
№ 2: $X/R = 20$ , $k_{max} = 30$	0	0	9,5
		0,5	9,5
		0,8	9,5
	45	0	7
		0,5	7
		0,8	7

срабатывания  $C$  и значение отношения  $Delta$  с коэффициентом 0,5.

В общем случае значение уставки  $C$  зависит от частоты выборки мгновенных значений тока в устройстве релейной защиты (частоты дискретизации) и номинального вторичного тока ТТ.

В табл. 2 представлены полученные при моделировании результаты тестирования алгоритма определения внешнего КЗ с помощью второго вспомогательного признака. В

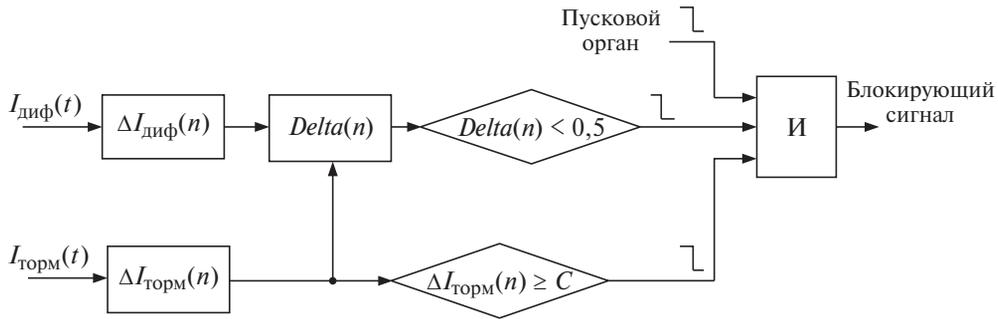


Рис. 2

Таблица 2

Параметр системы	$\delta$ , град.	$k_R$	$\Delta I_{\text{торм}}$ , А	$Delta$	$t_{\text{блок}}$ , мс	$t_{\text{н.раб}}$ , мс	$t_{\text{к.раб}}$ , мс
№ 1: $X/R = 10$ , $k_{\text{max}} = 10$	0	0	0,67	0	5	29	34
		0,5	0,67	0	5	13	34
		0,8	0,66	0,02	5	10	34
	45	0	0,52	0	8,5	—	—
		0,5	0,52	0	8,5	—	—
		0,8	0,52	0	8,5	—	—
№ 2: $X/R = 20$ , $k_{\text{max}} = 30$	0	0	0,63	0	2,5	10	68
		0,5	0,63	0	2,5	8	68
		0,8	0,63	0	2,5	7	68
	45	0	0,69	0	2	16	42
		0,5	0,69	0	2	15	42
		0,8	0,69	0	2	13	42

ней даны значения  $\Delta I_{\text{торм}}$  и  $Delta$ , соответствующие моменту выборки  $n$ , при котором выполняется условие  $\Delta I_{\text{торм}}(n) \geq 0,5$ , при этом фиксируются время формирования блокирующего сигнала  $t_{\text{блок}}$ , начальное время срабатывания дифференциальной защиты  $t_{\text{н.раб}}$  и конечное время срабатывания дифференциальной защиты  $t_{\text{к.раб}}$ . Точка отсчета указанных времен — момент возникновения КЗ.

Из таблицы следует, что селективность дифференциальной защиты при внешнем КЗ возможно обеспечить за счет блокирующего сигнала, время формирования  $t_{\text{блок}}$  которого во всех случаях меньше начального времени срабатывания дифференциальной защиты  $t_{\text{н.раб}}$ . При этом интервал времени  $\Delta t_{\text{бл2}}$ , в

течение которого требуется удерживать блокирующий сигнал, определяется с учетом времени, необходимого для отключения внешнего КЗ смежной релейной защитой  $t_{\text{откл.внеш.КЗ}}$ , и времени запаса  $t_{\text{зап}}$ .

Для контроля третьего вспомогательного признака необходимо определить моменты наступления экстремумов дифференциального сигнала и сравнить два интервала времени. Сопоставить два интервала времени можно с помощью оперативного запоминающего устройства, что, учитывая современные возможности микропроцессорных устройств релейной защиты, выполнить несложно.

Алгоритм определения внешнего КЗ с помощью третьего вспомогательного признака поясняется упрощенной функциональной

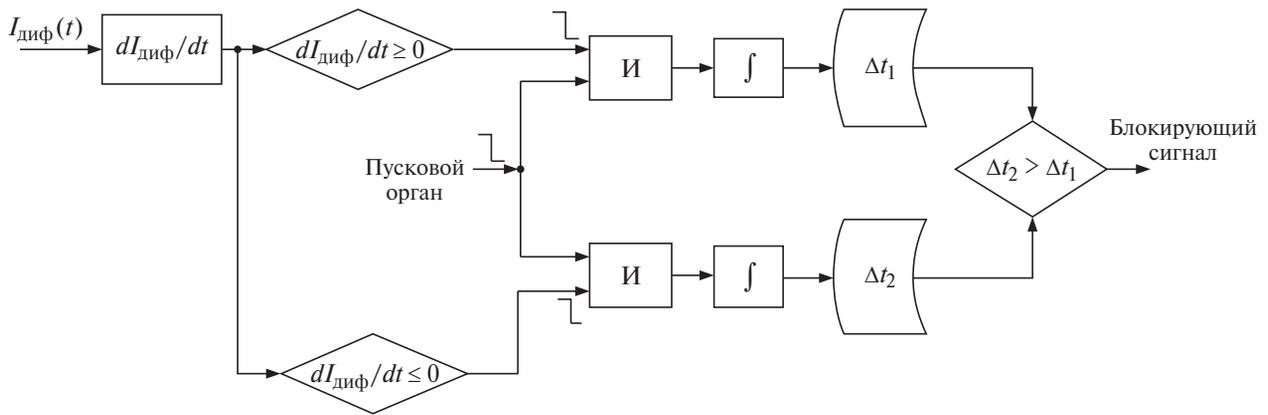


Рис. 3

Таблица 3

Параметры системы	$\delta$ , град.	$k_R$	$\Delta t_1$ , мс	$\Delta t_2$ , мс	$t_{\text{блок}}$ , мс	$t_{\text{н.раб}}$ , мс	$t_{\text{к.раб}}$ , мс
№ 1: $X/R = 10$ , $k_{\text{max}} = 10$	0	0	9	9,5	29	29	34
		0,5	9	10	27	13	34
		0,8	10	$\infty$	26	10	34
	45	0	22,5	$\infty$	59	—	—
		0,5	22,5	$\infty$	57	—	—
		0,8	9	$\infty$	29	—	—
№ 2: $X/R = 20$ , $k_{\text{max}} = 30$	0	0	9	$\infty$	25	10	68
		0,5	10	$\infty$	26	8	68
		0,8	10	$\infty$	25	7	68
	45	0	8	10	30	16	42
		0,5	8	$\infty$	29	15	42
		0,8	9	$\infty$	28	13	42

схемой на рис. 3. При возникновении повреждения:

- срабатывает пусковой орган защиты;
- определяются моменты наступления экстремумов дифференциального сигнала;
- измеряются, запоминаются и сравниваются интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ .

Результаты тестирования алгоритма определения внешнего КЗ с помощью третьего вспомогательного признака приведены в табл. 3. В ней представлены полученные при моделировании значения  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  при внешнем КЗ и различных параметрах  $X/R$ ,  $k_{\text{max}}$ ,  $\delta$  и  $k_R$ . При этом фиксируются время формирования блокирующего сигнала  $t_{\text{блок}}$ , началь-

ное время срабатывания дифференциальной защиты  $t_{\text{н.раб}}$  и конечное время срабатывания дифференциальной защиты  $t_{\text{к.раб}}$ . Точка отсчета указанных времен — момент возникновения КЗ.

Полученные при тестировании алгоритма данные позволяют сделать вывод о невозможности использования третьего вспомогательного признака в качестве основного для идентификации внешнего КЗ, так как во многих случаях требуется значительный интервал времени для формирования блокирующего сигнала. Это связано с тем, что в основу идентификации внешнего КЗ с помощью данного признака положен анализ фор-

мы кривой дифференциального сигнала, для определения моментов наступления экстремумов которого необходимо определенное время с момента возникновения КЗ. Однако третий вспомогательный признак может быть использован в качестве резервного для идентификации внешнего КЗ. Основным же признаком повреждения вне зоны действия защиты может быть второй вспомогательный признак.

По результатам исследования работы дифференциальной защиты на компьютерной модели можно сделать следующие основные выводы:

1) привлечение дополнительной информации в виде вспомогательных отличительных признаков позволяет уменьшить влияние погрешностей электромагнитных ТТ на работу дифференциальной защиты в переходных режимах. Это поможет повысить устойчивость работы защиты во время насыщения ТТ, так как традиционные признаки КЗ (дифференциальный и тормозной сигналы) недостаточно устойчивы именно в переходном режиме КЗ. Используемые вспомогательные признаки имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными, так как позволяют распознавать аварийный режим за несколько миллисекунд, главным образом — в условиях переходного режима;

2) разработанные алгоритмы дают возможность определять зону повреждения до срабатывания реагирующих органов дифференциальной защиты и формировать в функциональной схеме защиты разрешающие и запрещающие сигналы, благодаря которым обеспечивается ее селективность в переходных режимах КЗ без уменьшения быстродействия и чувствительности;

3) увеличение быстродействия и чувствительности дифференциальной защиты в свою очередь способствует снижению глубины и длительности провалов напряжения при КЗ в сети 110 – 220 кВ, что важно для обеспечения эффективной работы промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом [14], нарушение электроснабжения которых даже на доли секунды приводит к значительному экономическому ущербу.

## Список литературы

1. **Федосеев А. М.** Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.
2. **Циглер Г.** Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. — М.: Знак, 2008.
3. **Шнеерсон Э. М.** Цифровая релейная защита. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
4. **Типовые** технические решения по релейной защите и автоматике линий 10 – 750 кВ. Стандарт организации ОАО “ФСК ЕЭС”, 2010.
5. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970.
6. **Кужеков С. Л., Дегтярев А. А., Сербиновский Б. Б.** О требованиях к трансформаторам тока и устройствам релейной защиты в переходных режимах при наличии апериодической составляющей в первичном токе. — В кн.: Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем (Материалы междунар. науч.-техн. конф.). Екатеринбург, 2013.
7. **Дони А. Н., Дони Н. А.** Особенности продольной дифференциальной защиты линии с цифровыми каналами связи между полуккомплектами. — В кн.: Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем (Материалы междунар. науч.-техн. конф.). М., 2009.
8. **Иванов И. Ю., Дони Н. А., Гарке В. Г.** Повышение технического совершенства дифференциальной защиты линий электропередачи напряжением 110 – 220 кВ. — Релейная защита и автоматизация, 2012, № 4.
9. **Коновая Е. А., Гарке В. Г.** Анализ работы резервных защит линий электропередачи напряжением 110 – 220 кВ с учетом режимов электроэнергетической системы. (Материалы докладов междунар. науч.-практич. конф. и выставки “Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России”). Чебоксары, 2012.
10. **Афанасьев В. В.** Трансформаторы тока. — Л.: Энергоатомиздат, 1989.
11. **Овчаренко Н. И.** Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. — М.: Энергопрогресс, 2006.
12. **IEEE Tutorial Course: Advancements in Microprocessor based Protection and Communication.** — IEEE Course Text 79TP120-0, 1997.
13. **Багинский Л. В.** Быстродействующая защита мощных трансформаторов (автотрансформаторов). — Электричество, 1989, № 4.
14. **Исаков Р. Г., Гарке В. Г.** Концепция развития релейной защиты системы электроснабжения крупного промышленного предприятия. — Проблемы энергетики, 2012, № 7 – 8.

ferenc.electro@kstu-kai.ru