

Разработка и исследование алгоритма работы органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110–220 кВ

Бобров С.Е., инж.

Рассматривается алгоритм работы органа сравнения фаз, использованный при разработке микропроцессорного устройства дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий 110–220 кВ. Приведена комплексная оценка алгоритма работы органа сравнения фаз в различных режимах работы ЭЭС. С помощью программного обеспечения MATLAB произведено математическое моделирование ЭЭС. Рассмотрены также вопросы по оценке помех, возникающих на ЛЭП при коммутации силового оборудования, при КЗ и т.п.

Ключевые слова: дифференциально-фазная защита, орган сравнения фаз, интегральный принцип, метод комплексной оценки, реверс мощности, помеха.

Development and research of the phase comparison device algorithm of the differential-phase protection for high-voltage lines

This paper describes the phase comparison device algorithm which is used for development of a microprocessor-based relay of the phase-comparison protection. The paper contains the total algorithm evaluation of operating phase comparison device in the electrical power system various modes. The electrical power system is emulated with the MATLAB software. The paper also includes disturbance evaluation issue which may take place in the following cases: faults, power facilities communication, etc.

Keywords: phase-comparison protection, phase-comparison device, integration principle, method of total signal evaluation, power reversal, disturbance.

Введение. Орган сравнения фаз (ОСФ) входит в состав дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) и предназначен для косвенного сравнения фаз токов манипуляции по концам защищаемой линии. Информация о фазе тока манипуляции противоположного конца защищаемой линии передается по каналу связи с помощью высокочастотных (ВЧ) передатчиков. ВЧ-приемник, в свою очередь, принимает суммарный ВЧ-сигнал, образуемый как собственным передатчиком, так и передатчиком противоположного конца линии, и производит инвертирование сигнала [1]. Таким образом, при отсутствии ВЧ-сигнала в канале связи на выходе ВЧ-приемника формируется активный сигнал, при наличии – сигнал с нулевым уровнем.

Принцип работы ОСФ подразумевает несрабатывание при непрерывном ВЧ-сигнале и срабатывание при длительности пауз в ВЧ-сигнале, превышающей соответствующее значение уставки по углу блокировки. При этом на практике длительность единичного импульса при всех видах КЗ изменяется относительно идеальной за счет присутствия погрешностей в функционировании защиты и ЭЭС. Основные причины возникновения погрешностей можно классифицировать следующим образом:

- сдвиг по фазе между ЭДС системы по концам линии;
- различие углов сопротивления на концах линии системы;
- угловые погрешности трансформаторов тока (ТТ);
- погрешности фильтров симметричных составляющих органа манипуляции;
- конечная скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии электропередачи.

Уставка по углу блокировки (углу между токами манипуляции), предотвращающая излишние срабатывания защиты при внешних КЗ, выбирается

исходя из максимальных значений указанных погрешностей.

Алгоритм работы ОСФ должен обеспечить: отключение с требуемым быстродействием внутренних КЗ; несрабатывания при внешних КЗ; правильное функционирование при реверсе мощности, передаваемой по линии; срабатывания при переходе внешнего КЗ во внутреннее.

В [2, 3] предложен вариант алгоритма работы ОСФ микропроцессорной (МП) ДФЗ, основанные на использовании интегрального принципа, заключающегося в реализации зависимости измеренного угла блокировки от времени срабатывания ОСФ. Интегральный принцип позволяет также исключить ложные срабатывания ДФЗ при реверсе мощности.

В предлагаемом нами алгоритме указанный принцип учитывается. Кроме этого, дополнительно используется метод комплексной оценки входного сигнала ОСФ.

Применение метода комплексной оценки входного сигнала ОСФ на заданном интервале времени при реализации алгоритма работы ОСФ позволяет учесть и исключить негативное влияние ряда внешних факторов на работу ДФЗ. Примером таких факторов являются помехи, возникающие на ЛЭП вследствие коммутации высоковольтного оборудования, КЗ на защищаемой линии и других причин. Появление помех в выходном сигнале ВЧ-приемника связано с низкой помехозащищенностью объектов ЭЭС, а также с использованием устаревшего оборудования, что приводит к ложной работе ДФЗ.

Алгоритм работы ОСФ. Алгоритм работы ОСФ предполагает последовательное решение трех задач: условное разделение входного сигнала ОСФ на интервалы; применение на выделенном интервале метода комплексной оценки входного сигнала ОСФ; использование принципа интегрирования.

Первая из указанных задач заключается в условном разделении входного сигнала ОСФ на последовательные интервалы, длительность которых принимается равной либо периоду синусоиды подводимого напряжения, либо периоду сигнала с фиксированной частотой. Единичный интервал, выделенный во входном сигнале ОСФ, принимается как базовый период.

Последовательность выполняемых операций после выделения базового периода иллюстрирует блок-схема алгоритма работы ОСФ, приведенная на рис. 1.

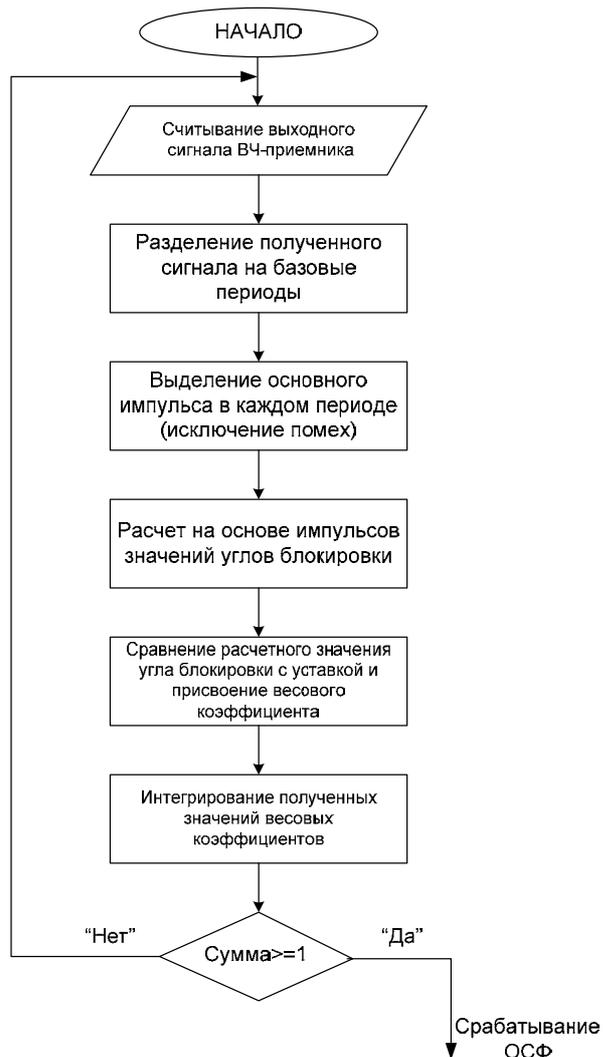


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы ОСФ

Следует заметить, что при внутреннем КЗ и отсутствии помех во входном сигнале единичный импульс в выходном сигнале ВЧ-приемника, соответствующий полупериоду тока манипуляции (без учета погрешностей), встречается один раз в один базовый период. Таким образом, появление двух и более импульсов в одном базовом периоде свидетельствует о наличии помех во входном сигнале ОСФ. Выделение наибольшего по длительности импульса из базового периода практически полностью исключает влияние помех на работы ОСФ. Исключение помех из входного сигнала ОСФ является основой метода комплексной оценки входного сигнала ОСФ.

Принцип интегрирования, использованный при реализации предлагаемого алгоритма работы ОСФ, заключается в получении зависимости измеренного угла блокировки от времени срабатывания ОСФ. Принцип интегрирования предполагает двух основных задач: сравнение расчетного угла блокировки с уставкой и присвоение весового коэффициента в результате сравнения; суммирование полученных весовых коэффициентов за каждый интервал сравнения. Таким образом, если расчетный угол блокировки оказался более 90 эл. град., значение весового коэффициента принимается равным 1, ОСФ срабатывает после одного периода сравнения; если расчетный угол больше значения уставки, но меньше 90 эл. град., значение весового коэффициента принимается либо 0,35, либо 0,5, в зависимости от близости расчетного значения к границам диапазона. Время срабатывания ОСФ при значении угла блокировки менее 90 эл. град. составляет от 40 – 60 мс. В случае если расчетное значение угла блокировки получается меньше величины уставки, значение весового коэффициента принимается равным –0,5. ОСФ срабатывает при сумме весовых коэффициентов больше или равной 1.

При переходе внешнего КЗ во внутреннее с углом блокировки более 90 эл. град. время срабатывания ОСФ составляет 60 мс от начала внутреннего КЗ. Затягивание срабатывания вызвано отстройкой от режима реверса мощности.

Из-за неидентичного переходного процесса в органах манипуляции ДФЗ при реверсе мощности возможны два периода, в течение которых токи по концам линии направлены от шин в линию. Следует заметить, что при отключении внешнего КЗ токи в первичной сети всегда имеют односторонний характер. Кратковременное появление двух пауз в ВЧ-сигнале, длительность которых превышает соответствующее значение угла блокировки более 90 эл. град., вызвано погрешностью в работе вторичной аппаратуры.

Поэтому для отстройки от режима реверса мощности интегральная сумма, позволяющая надежно отстроиться от рассматриваемого режима, должна иметь запас в два периода.

Моделирование алгоритма работы ОСФ. Оценка алгоритма производится на основе математической модели ЭЭС, заданной с помощью программного обеспечения MATLAB, приложения Simulink. Реализованная модель ЭЭС представлена на рис. 2. Рассматриваются следующие режимы работы ЭЭС: внутреннее КЗ; внешнее КЗ; реверс мощности при отключении внешнего КЗ; переход внешнего КЗ во внутреннее.

Режим перехода внешнего КЗ во внутреннее подразумевает первоначально возникновение внешнего КЗ, затем отключение внешнего КЗ. При отключении внешнего КЗ возникают перенапряжения, которые могут приводить к пробое изоляции, т.е. возникновению КЗ на защищаемой линии.

При моделировании указанных режимов были получены фазные токи с обеих сторон моделируемой линии. На основании полученных значений фазных токов при возникновении КЗ были смоделированы действия ВЧ-передатчиков, которые управляются сигналами органов манипуляции полуккомплектов ДФЗ.

Особого внимания заслуживают следующие режимы работы: переход внешнего КЗ во внутреннее и реверс мощности при отключении внешнего КЗ. Эти режимы охватывают все из вышеперечисленных режимов. На рис. 3 показаны входные сигналы ВЧ-приемников при указанных режимах работы ЭЭС, а также соответствующие им расчеты углов блокировки по предложенному алгоритму работы ОСФ. Значения, указанные по осям абсцисс временных диаграмм (рис. 4, 6), соответ-

ствуют временным отсчетам. Следует учесть, что при принятых допущениях входные сигналы органов сравнения фаз полукомплектов ДФЗ идентичны, при этом отличие полученных значений углов блокировки от идеальных объясняется присутствием в используемой математической модели ЭЭС погрешностей, связанных с различием фаз ЭДС частей системы и неравенством углов сопротивлений этих частей.

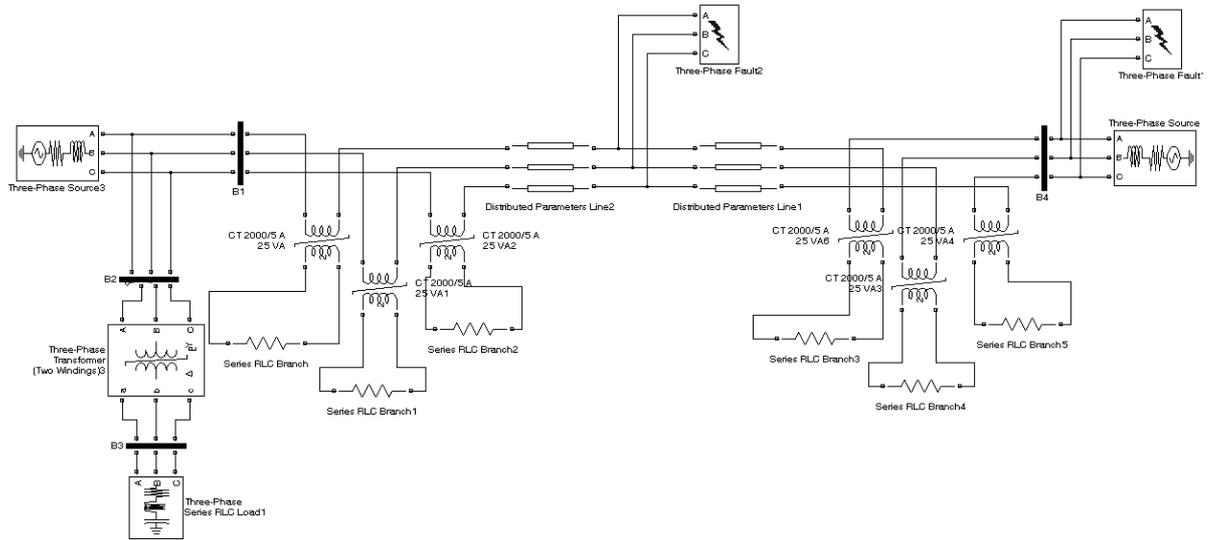


Рис. 2. Модель ЭЭС для оценки алгоритма работы ОСФ

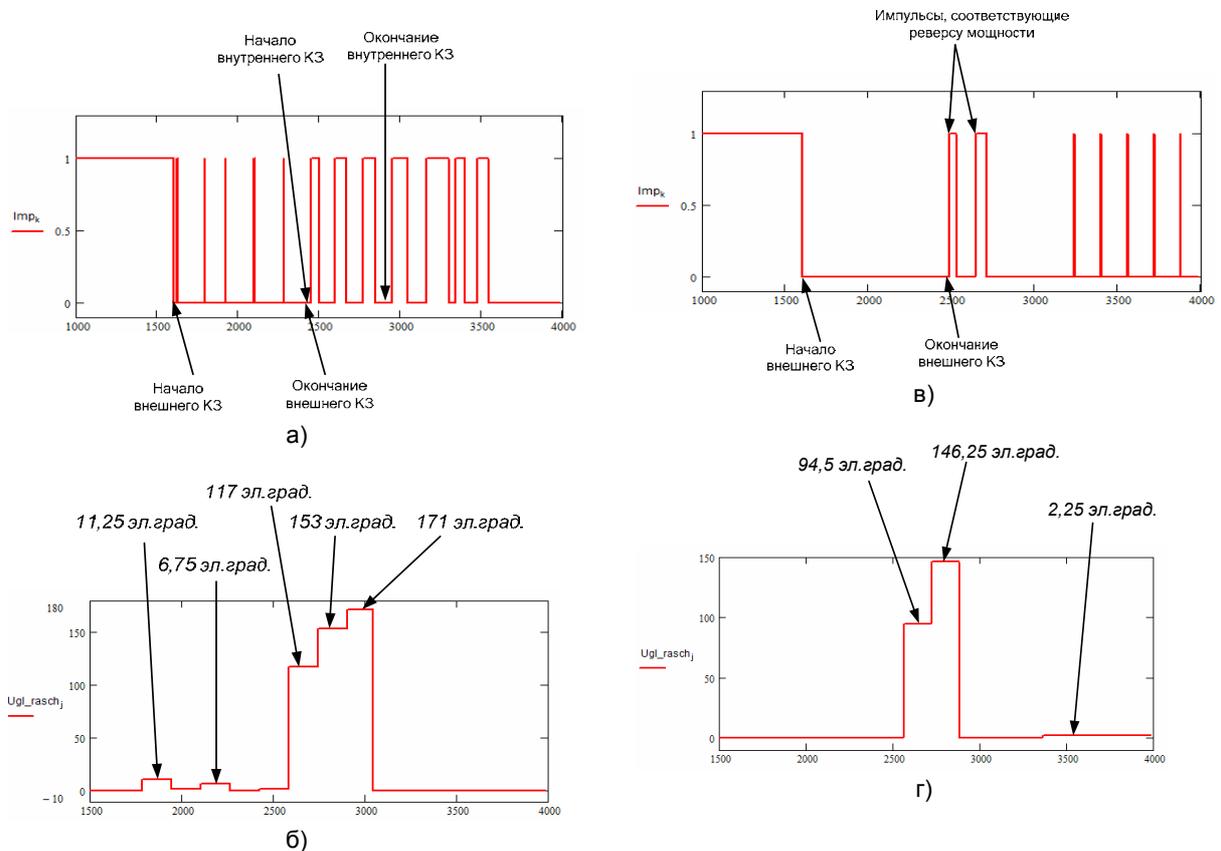


Рис. 3. Временные диаграммы входных сигналов ОСФ и расчет углов блокировки: а, б – в режиме перехода внешнего КЗ во внутреннее; в, г – в режиме реверса мощности

Конечная цель предложенного алгоритма, как указано выше, заключается в сравнении расчетного угла блокировки с уставкой, суммировании полученных весовых коэффициентов и формировании сигнала срабатывания ОСФ. Результаты работы алгоритма для рассматриваемых режимов при принятых значениях весовых коэффициентов приведены на рис. 4.

Следует уточнить, что после формирования сигнала отключения внутреннего КЗ (рис. 4,а), результат работы алгоритма ОСФ игнорируется, так как в функционально-логической схеме ДФЗ предусматривается подхват указанного сигнала до момента возврата грубых пусковых органов. Указанное обеспечивает надежное отключение КЗ внутри защищаемой линии.

При принятом пороге срабатывания ОСФ (на основе диаграмм рис. 4) алгоритм обеспечивает отстройку от режима реверса мощности. Однако указанная отстройка приводит к затягиванию отключения КЗ на время более 60 мс при переходе внешнего КЗ во внутреннее.

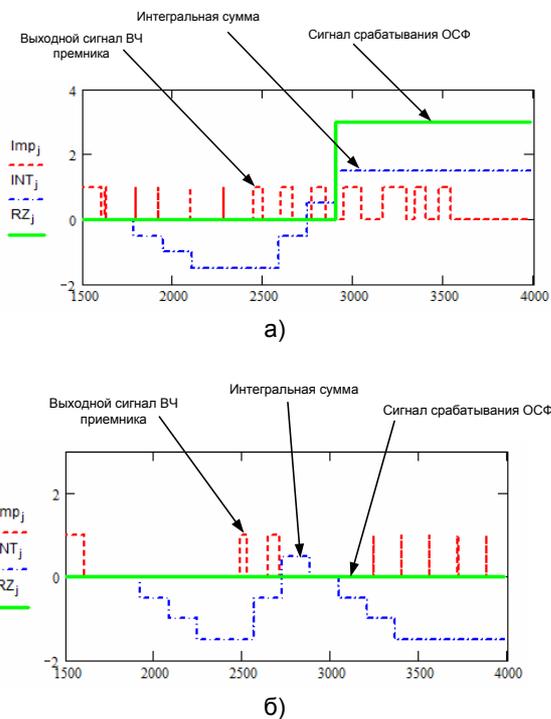


Рис. 4. Временные диаграммы работы алгоритма ОСФ: а – для сигнала, получаемого при переходе внешнего КЗ во внутреннее; б – для сигнала, формируемого при реверсе мощности

Как было указано выше, рассматриваемый алгоритм позволяет отстроиться от помех, возникающих во входном сигнале ОСФ. Для доказательства этой способности необходимо рассмотреть механизм образования помех во входном сигнале, оценить их длительность и частоту появления.

Согласно [4], помехи в ВЧ-тракте, образованном воздушной линией (ВЛ) электропередачи, появляются из-за наличия на проводах ВЛ высокого напряжения промышленной частоты и воздействуют на приемники каналов связи наряду с обычными видами помех (от грозových разрядов,

радиостанций и других каналов передачи информации). При этом все виды помех, возникающих на ЛЭП, делятся на помехи, генерируемые ЛЭП при нормальном режиме, и помехи, возникающие при коммутационных операциях выключателями и разъединителями и в аварийных ситуациях.

Надежная работа ДФЗ, прежде всего, должна быть обеспечена при КЗ, т.е. исключить ложную работу при внешнем КЗ и надежное срабатывание при внутреннем КЗ. Таким образом, для решения поставленной задачи рассматривались помехи, возникающие при КЗ, а также при коммутационных операциях.

На основании [4], помехи при коммутационных операциях имеют значительный уровень и обуславливаются переходными процессами, возникающими при пробое промежутка между контактами выключателя и разъединителя и при восстановлении изоляционных свойств этого промежутка. При этом наибольшее напряжение помех и длительность их существования обуславливаются операциями включения и отключения отрезков сборных шин и высоковольтного оборудования разъединителями. Пиковое напряжение помех, измеренное на ВЧ-кабеле в полосе частот пропускания ФП, может достигать до единиц киловольт, а длительность существования помех – до нескольких секунд. На рис. 5 приведена осциллограмма напряжения помех при отключении высоковольтного выключателя.

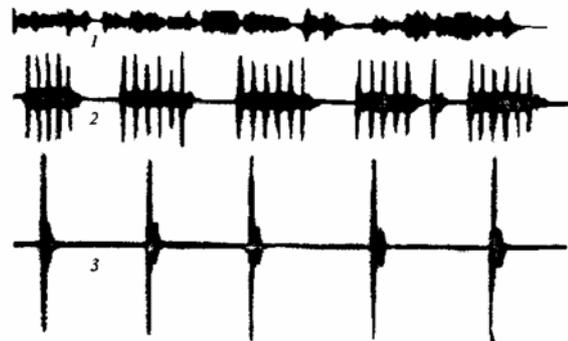


Рис. 5. Осциллограмма напряжения помех при отключении разъединителя: 1 – в начале операции отключения; 2 – в середине; 3 – в конце

Помехи, вызываемые КЗ, обусловлены горением дуги в месте КЗ. Как правило, КЗ на ВЛ отключается устройствами релейной защиты, а в нашем случае – ДФЗ, за время 30–70 мс. Согласно [4], для оценки длительности и уровня указанных помех следует выделить три фазы КЗ:

- первая фаза характеризуется пиковым напряжением помех на выходе ВЧ-кабеля 100 В и более, а на выходе полосового фильтра с полосой пропускания около 4 кГц – до +15 – +30 дБ;

- вторая фаза характеризуется резким уменьшением уровня помех относительно первой фазы. Помехи носят характер редких всплесков (1–2 всплеска за период 50 Гц) с пиковым уровнем в полосе 4 кГц, не превышающим 0,5 дБ;

- третья фаза обусловлена отключением тока КЗ выключателем и гашением дуги в месте КЗ. Интенсивность помех в этой фазе их существования примерно такая же, как и в первой фазе.

На основании приведенных данных [4] можно сделать вывод о существовании помех продолжительное время. Уровень помех сравним с уровнем высокочастотного сигнала, формируемого ВЧ-передатчиками по концам линии, поэтому пренебрегать этими помехами нельзя. Однако длительность единичной помехи, вносящей искажение во входной сигнал ОСФ, в каждом из приведенных режимов не превышает 2–3 мс. Исследуемый алгоритм, благодаря использованию метода комплексной оценки входного сигнала ОСФ, позволяет исключить из расчета дополнительные кратковременные импульс-помехи при внутреннем КЗ, а при внешнем КЗ принять наибольший из встречающихся за базовый период импульсов. При этом наибольший из этих импульсов, длительность которого не превышает 2–3 мс, не должен приводить к срабатыванию ОСФ при внешнем КЗ и в целом ДФЗ.

Для подтверждения корректной работы алгоритма при внешнем и внутреннем КЗ в условиях существования помех в математическую модель ВЧ-приемника был введен блок автоматической генерации импульс-помех. На рис. 6 показаны входные сигналы ОСФ, полученные при моделировании вышеуказанных режимов с учетом помех, а также конечные результаты расчета по углу блокировки.

На основании приведенных временных диаграмм (рис. 3, 6) можно сделать вывод о практически полном совпадении расчетных углов блокировки. Указанное, в свою очередь, подтверждает отстройку предложенного алгоритма работы ОСФ от помех в выходном сигнале ВЧ-приемника.

Заключение

Реализация ДФЗ на МП элементной базе позволяет обеспечить надежное функционирование защиты в различных режимах работы ЭЭС. В частности, при разработке алгоритма работы ОСФ используется метод комплексной оценки входного сигнала ОСФ, а также интегральный принцип. Применение указанных принципа и метода позволяет надежно отстроиться от режима реверса мощности, а также избежать влияния помех во входном сигнале ОСФ на конечное значение угла блокировки.

Сложными с точки зрения работы ДФЗ являются режимы перехода внешнего КЗ во внутреннее и режим реверса мощности. Использование предложенного алгоритма работы ОСФ, в каждом из указанных режимов, подтверждает следующее:

- формирование сигнала срабатывания ОСФ при реверсе мощности не происходит, поскольку импульсы, появляющиеся во входном сигнале ОСФ, длительность которых превышает 5 мс, что соответствует значению угла блокировки более 90 эл. град., имеют кратковременный характер. Общее число подобных подряд идущих импульсов не превышает двух. Следовательно, интегральная сумма не достигает порогового значения и сигнал, таким образом, блокируется;

- формирование сигнала отключения КЗ при переходе внешнего КЗ во внутреннее затягивается на время более 60 мс и является допустимым, поскольку за счет этого исключаются ложные срабатывания защиты при реверсе мощности. Должно пройти как минимум три периода сравнения, преж-

де чем интегральная сумма достигнет порога срабатывания.

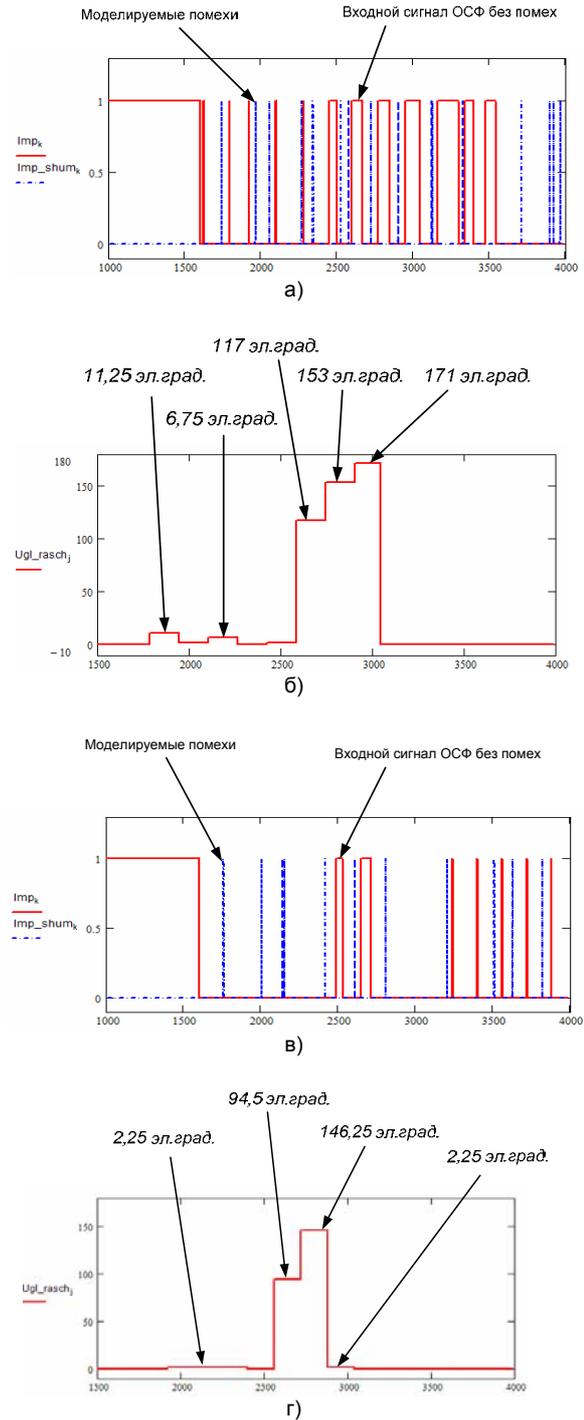


Рис. 6. Временные диаграммы входных сигналов ОСФ при наличии помех в разных режимах работы ЭЭС и расчет углов блокировки: а, б, в, г – см. рис. 3

Помехи, возникающие во входном сигнале ОСФ из-за дуги при КЗ или при коммутации первичного оборудования, исключаются за счет использования предложенного метода комплексной оценки входного сигнала ОСФ в алгоритме работы ОСФ. Сравнение происходит по длительности импульсов, входящих в один базовый период. В результате к расчету принимается наибольший, что

обеспечивает правильный расчет при внутреннем КЗ и отсутствие ложного срабатывания при внешнем, в связи с тем, что максимальная длительность указанных помех не превышает 2–3 мс.

Список литературы

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992.

2. Особенности совместного использования микропроцессорного и электромеханического полуккомплектов дифференциально-фазной защиты ВЛ / Н.А. Дони, А.Н. До-

ни, В.Л. Иванов, А.И. Левиуш // Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики: Тез. докл. науч.-техн. конф. 24–26 апреля 2007 г. – Екатеринбург, 2007. – С. 19–20.

3. Дони А.Н., Дони Н.А. Особенности выполнения микропроцессорной ДФЗ ВЛ 110–750 кВ: Мат-лы SIGRE Relay protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems. September 10–12, 2007. – Moscow–Cheboksary, 2007.

4. Шкарин Ю.П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи. Ч. 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001 [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 8(32)].

Бобров Сергей Евгеньевич,
ЗАО «Радиус-Автоматика» (г. Зеленоград, Москва),
инженер 2 категории,
телефон 8-960-506-87-56.