

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЦИФРОВЫХ ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ЦИФРОВЫХ РЭС

Мокеев* А.В., Пискунов** С.А., Ульянов** Д.Н., Хромцов* Е.И.

Аннотация

Рассматриваются примеры применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) для реализации защит с абсолютной селективностью для понизительных подстанций (ППС) 35-220 кВ и распределительных пунктов (РП) 6-20 кВ.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, цифровая подстанция, релейная защита.

Введение

Одна из важнейших тенденций автоматизации подстанций и сетей связана с интеграцией технологий цифровой подстанции (ЦПС) и синхронизированных векторных измерений [1]. Основные преимущества использования СВИ связаны со снижением требований к объему передаваемой информации, так как требуется передача всего шести синхронизированных векторов (синхровекторов) тока и напряжения для расчета на любом уровне управления и защиты десятков параметров режима по конкретному присоединению. На базе синхровекторов отдельных присоединений может быть произведена оценка параметров схемы замещения энергосистемы. Это открывает новые возможности для построения распределенных систем защиты и автоматики (WAPS) подстанций и электрических сетей.

Архитектура систем РЗА понижающих ПС и РП

Интеграция технологий ЦПС и СВИ позволит повысить основные характеристики РЗА, прежде всего связанные с быстродействием, чувствительностью и надежностью функционирования.

* Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: a.mokeev@narfu.ru, e.khromtsov@narfu.ru
ООО "Инженерный центр "Энергосервис", Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: a.mokeev@ens.ru, e.khromtsov@ens.ru

** ООО "Инженерный центр "Энергосервис", Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: s.piskunov@ens.ru, d.ulyanov@ens.ru

Следует выделить следующие основные предпосылки интеграции указанных технологий:

- постоянно возрастающие возможности современной микропроцессорной техники, позволяющей реализовать более эффективные алгоритмы РЗА;
- применение современных датчиков тока и напряжения, в которых отсутствуют или минимизированы погрешности вследствие насыщения, остаточной намагниченности, феррорезонанса;
- наличие горизонтальных связей между устройствами РЗА позволяет организовать обмен быстрыми дискретными и аналоговыми сообщениями и значительно упрощает реализацию защит с абсолютной селективностью;
- идентификация параметров схемы замещения и параметров эквивалентной энергосистемы на основе данных СВИ позволяет значительно повысить чувствительность токовых защит;
- применение многофункциональных устройств с поддержкой СВИ на различных уровнях управления подстанции позволит реализовать распределенные системы РЗА с эффективным резервированием даже в случае частичной или полной деградации коммуникационной сети на подстанции.

В настоящее время большинство микропроцессорных устройств РЗА среднего напряжения включают чаще всего традиционный набор защит, прежде всего токовых ступенчатых защит. Гораздо реже используются дистанционные и дифференциальные защиты. Использование СВИ позволит более широко применять защиты с абсолютной селективностью на основе токового или дистанционного принципов. Использование дополнительных признаков (критериев) распознавания повреждения [2-4] на основе синхровекторов позволит повысить быстродействие и чувствительность устройств РЗА.

Несмотря на наличие программируемой логики и встроенных часов реального времени, логические операции в РЗА выполняются по-прежнему без привязки ко времени. В этой связи для совершенствования РЗА различного функционального назначения перспективно использование темпоральной логики (temporal logic), или по-другому, временной логики, которая используется для описания последовательностей явлений для их взаимосвязи по временной шкале [5]. Имеется опыт использования темпоральной логики в устройствах регулирования напряжения в энергосистемах [6]. Использование временной логики в устройствах защиты и автоматики, при реализации оперативных блокировок позволит повысить эффективность устройств РЗА.

На основе 6 синхровекторов тока и напряжения может быть рассчитано на любом уровне управления и защиты более 50 параметров режима присоединения, а при использовании дополнительно еще 6 эквивалентных синхровекторов – около 200 параметров режима [7]. При использовании эквивалентных синхровекторов становится возможным

расчет параметров по симметричным составляющим с учетом влияния высших гармоник. На основе данных СВИ появляется возможность производить оценку параметров схемы замещения электрической сети, в том числе параметров эквивалентной энергосистемы. Кроме того, появляется возможность распознавания режимов, в том числе связанных с процессами пуска и самозапуска электродвигателей.

Интеграция технологий ЦПС и СВИ открывает новые возможности для построения распределенных многоуровневых систем защиты и автоматики подстанций и электрических сетей. Создание распределенных систем РЗА позволит более широко использовать защиты с абсолютной селективностью с реализацией известных или новых принципов защиты. Актуальными вопросами для создания указанных систем являются реализация в преобразователях аналоговых сигналов (ПАС), интеллектуальной коммутационной аппаратуре и локальных устройствах РЗА функций измерения синхровекторов тока и напряжения с требуемой точностью и быстродействием. При этом отпадает необходимость вычислять синхровекторы в каждом устройстве-подписчике, что резко понижает требуемый уровень вычислительной мощности централизованных устройств РЗА.

Рассматриваемая в докладе распределенная система РЗА подстанции основана на использовании совмещенной шины процесса и шины подстанции с преимущественным применением синхровекторов (SP) вместо выборочных значений (SV) токов и напряжений, а также замещением значительной части MMS-сообщений. Это позволит снизить трафик передачи данных и обеспечит повышение темпа передачи синхровекторов. Другой важной задачей является повышение быстродействия устройств РЗА с поддержкой СВИ [8].

Использование обмена синхровекторами и GOOSE-сообщениями между защитами на подстанции позволит реализовать распределенную обработку данных между защитами отдельных присоединений и реализовать защиты с абсолютной селективностью. Например, в устройстве релейной защиты вводов за счет использования информации о синхровекторах токов присоединений среднего напряжения и синхровекторов напряжений на шинах подстанции возможна реализация защиты шин с абсолютной селективностью. Использование наряду с дифференциальным током дополнительной информации о синхровекторах тока присоединений позволит повысить быстродействие и чувствительность защиты шин [8].

На рис.1 приведена архитектура распределенной системы РЗА для ППС (РП). Основу автоматизации распределительного устройства среднего напряжения составляют цифровые КРУ с использованием цифровых комбинированных датчиков тока и напряжения (ЦКДТН), интеллектуальных выключателей (ИВ) со встроенной резервной защитой, цифровых датчиков положения (ЦДП), температуры (ЦДТ), датчиков для дуговой защиты (ЦДО) и т.д. Все перечисленные компоненты внутри КРУ, а

также устройство РЗА, соединяются между собой посредством резервируемой низкоуровневой детерминированной шины процесса.

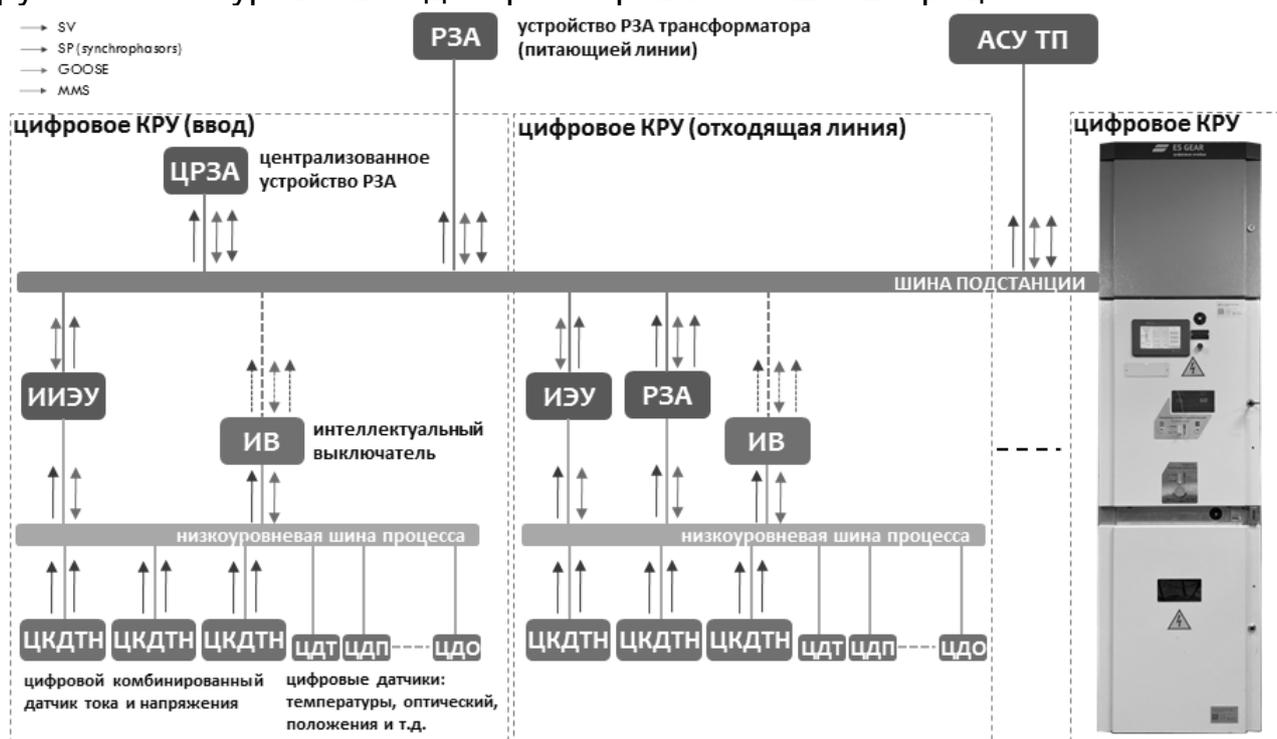


Рис. 1. Структурная схема трехуровневой системы РЗА ППС (РП)

ЦКДТН является не только источником информации для ИЭУ различного функционального назначения, но и способен выполнять функции ряда ИЭУ за счёт измерения синхровекторов тока и напряжения, использование которых позволит существенно снизить требования к микроконтроллерам или сигнальным процессорам как локальных устройств РЗА среднего напряжения, так и централизованного устройства РЗА (ЦРЗА). Функции ЦРЗА целесообразно возложить на устройство ввода (рис.1) с реализацией функций защиты шин с абсолютной селективностью на основе информации синхровекторов тока со всех присоединений распределительного устройства среднего напряжения, а также функций резервирования защит отходящих присоединений [9].

На базе решения ЦПС согласно рис.1 становится возможной реализация как трехуровневой распределенной системы защиты и автоматики (интеллектуальный выключатель, локальное устройство РЗА, централизованная система РЗА), так и двухуровневой системы защиты (возможные варианты: интеллектуальный выключатель и централизованная система РЗА, интеллектуальный выключатель и локальное устройство РЗА).

Реализация быстродействующих систем РЗА

При использовании синхровекторов тока и напряжения отдельного присоединения могут легко быть вычислены параметры режима сети, необходимые для реализации токовых и дистанционных защит, а при использовании дополнительной информации о синхровекторах с других

присоединений – дифференциальная защита трансформатора, линии, шин.

Применение токовых ступенчатых защит часто ограничено вследствие недостаточной чувствительности отдельных ступеней защиты. Чувствительность таких защит может быть существенно повышена за счет оценки параметров схемы замещения подстанции и параметров эквивалентной энергосистемы [8]. Токовые защиты при этом будут близки по чувствительности к дистанционным защитами. Но это тема отдельного исследования.

Использование СВИ и быстрых коммуникаций в рамках ЦПС позволит шире использовать дистанционный и дифференциальный принципы выполнения защиты с использованием дополнительных признаков распознавания аварий и реализацией защиты с абсолютной селективностью на основе информационного обмена между защитами [8]. Массовое производство недорогих микроконтроллеров с поддержкой операций с плавающей запятой при использовании СВИ делает еще более перспективным использование дистанционного принципа выполнения защиты. При этом при использовании дистанционного принципа за счет информационного обмена также можно реализовать защиту с абсолютной селективностью. При полной деградации коммуникационной сети становится невозможной работа защиты с абсолютной селективностью. Поэтому осуществляется переход устройств защиты в автономный режим работы с относительной селективностью. Это позволяет снизить требования к надежности коммуникаций на подстанции и между подстанциями.

Рассмотрим вопросы совершенствования защит линии (трансформатора) и защиты шин. Указанные подходы могут быть распространены и на другие присоединения подстанции и между подстанциями.

Ток срабатывания дифференциальной токовой защиты в простейшем случае должен быть отстроен от максимального тока небаланса. В случае применения традиционных трансформаторов тока ток срабатывания защиты должен превышать 40 % трехфазного тока короткого замыкания в конце линии в максимальном режиме энергосистемы. Из указанного порога срабатывания и значения требуемого коэффициента чувствительности следует, что отношение минимального трехфазного тока короткого замыкания ($KЗ$) к максимальному току $KЗ$ должно составлять более 0,69. Это существенно ограничивает область применения простых дифференциальных защит. Для повышения чувствительности защит чаще всего применяют дифференциальные защиты с торможением [10]. Другой способ повышения чувствительности дифференциальной защиты связан с использованием адаптивного торможения [11]. При этом используется величина торможения, вычисляемая на основе оценки фактических погрешностей измерения тока по концам линии и погрешности синхронизации времени. Такой способ снижает указанное выше соотношение между токами короткого замыкания до значения 0,26. Еще

один способ повышения чувствительности дифференциальных защит связан с использованием нелинейного фильтра тока намагничивания [14].

В случае же применения современных датчиков тока и использования синхрофазоров тока более предпочтительным вариантом следует признать повышение чувствительности за счет сравнения фаз [10,12,13], в данном случае фаз, получаемых на основе синхрофазоров тока. Применение современных датчиков тока и напряжения в сочетании с использованием информации о синхровекторах тока и напряжения позволяет реализовать эффективную защиту с абсолютной селективностью. Преимущества применения цифровых датчиков тока для дифференциальных защит связаны прежде всего с существенно лучшими их метрологическими характеристиками (снижение тока небаланса), отсутствием остаточной намагниченности и насыщения магнитопровода при больших кратностях тока.

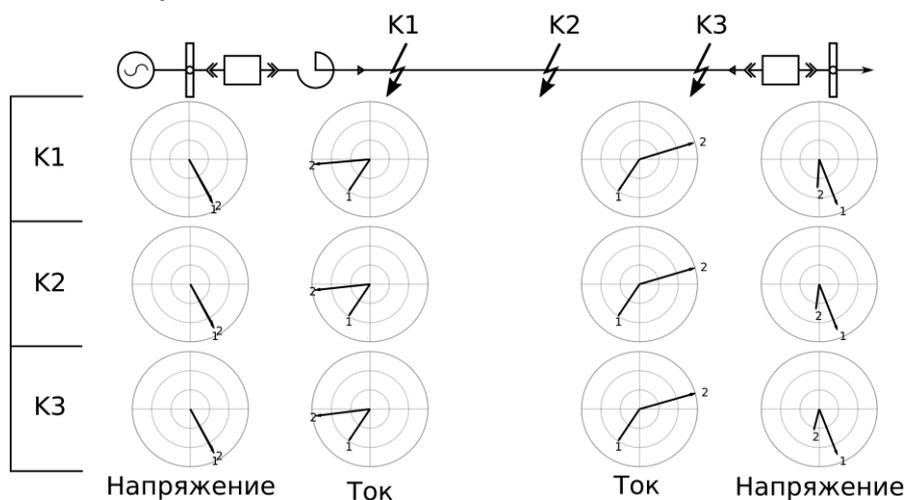


Рис. 2. Защита кабельной линии

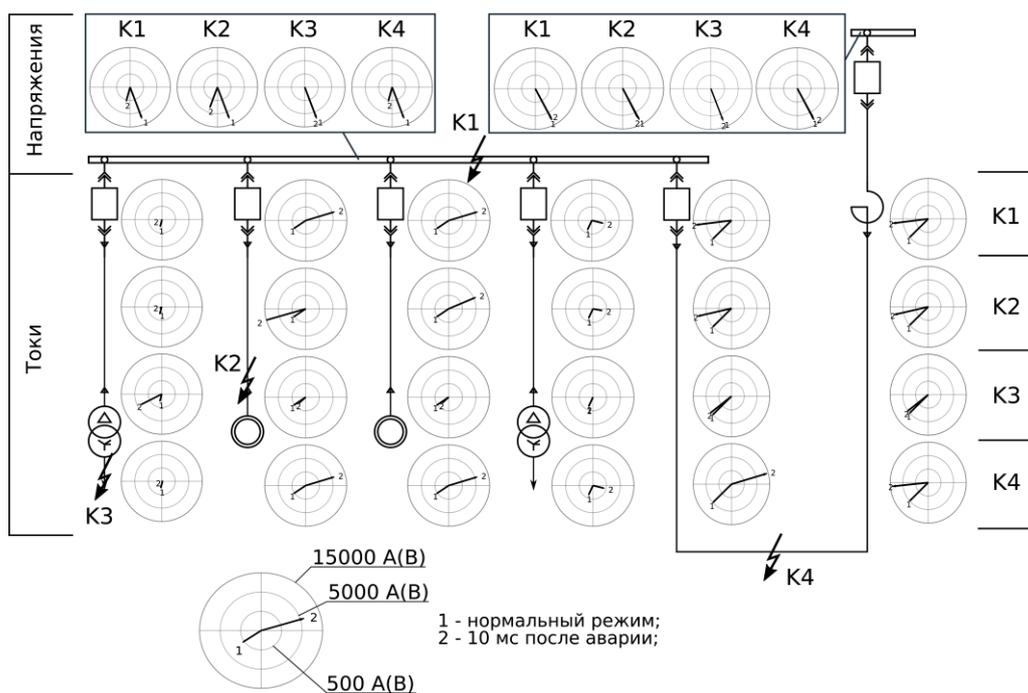


Рис. 3. Защита шин, питающей кабельной линии и отходящих присоединений

Эффективность рассматриваемой защиты питающей линии с абсолютной селективностью может быть продемонстрирована на примере, приведенном на рис.2 и рис.3. Представлено распределительное устройство 6 кВ одного из крупных предприятий Архангельской области. Для упрощения показана только одна секция шин РП, подключенная к шинам генераторного напряжения заводской ТЭЦ. Отходящие от шин присоединения включают 3 двигателя по 3 МВт (показано только 2), трансформатор 3,2 МВА с преобладанием двигательной нагрузки, трансформатор 1 МВА с очень низкой долей двигательной нагрузки.

Ориентация синхровекторов для наглядности показана относительно синхровектора тока ввода, который в свою очередь для наглядности направлен в нормальном режиме к шинам. Цифрами указаны синхровекторы в следующие моменты времени: 1 – нормальный режим, 2 – по истечении 10 мс после КЗ. Моделирование системы электроснабжения производилось с помощью MATLAB/Simulink с учетом токов подпитки двигателей 6 и 0,4 кВ.

На рис.2 приведены синхровекторы тока и напряжения при кз в начале, середине и в конце кабельной линии. Как следует из представленного рис.2, сравнение модулей и фаз синхровекторов тока позволяет реализовать эффективную защиту с абсолютной селективностью. Дополнительно для повышения чувствительности защиты может быть использована информация о синхровекторах напряжения на шинах генераторного напряжения и шинах РП.

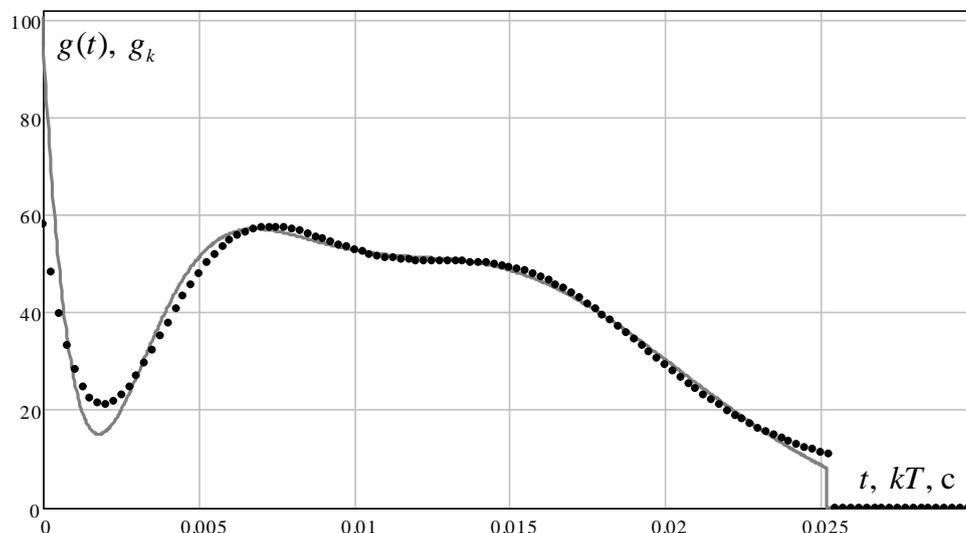


Рис. 4. Импульсные функции аналогового и цифрового фильтров

Для эффективного использования СВИ в устройствах РЗА требуется, как указывалось выше, использовать отличные от применяемых в УСВИ цифровые фильтры. Для данной задачи был специально синтезирован аналоговый фильтр-прототип (кривая 1, рис.4) с помощью метода синтеза, основанного на расширенных спектральных представлениях сигналов и при использовании методов нелинейной оптимизации с ограничениями [15]. Для получения описания цифрового фильтра можно

воспользоваться известными способами перехода. Но, как показали исследования, для фильтров с ярко выраженной несимметричной импульсной характеристикой лучше использовать прямой синтез цифровых фильтров. На рис.4 приведена импульсная функция цифрового фильтра при тех же условиях синтеза, что и для фильтра 1 на рис. 4 при частоте дискретизации 80 точек на период промышленной частоты.

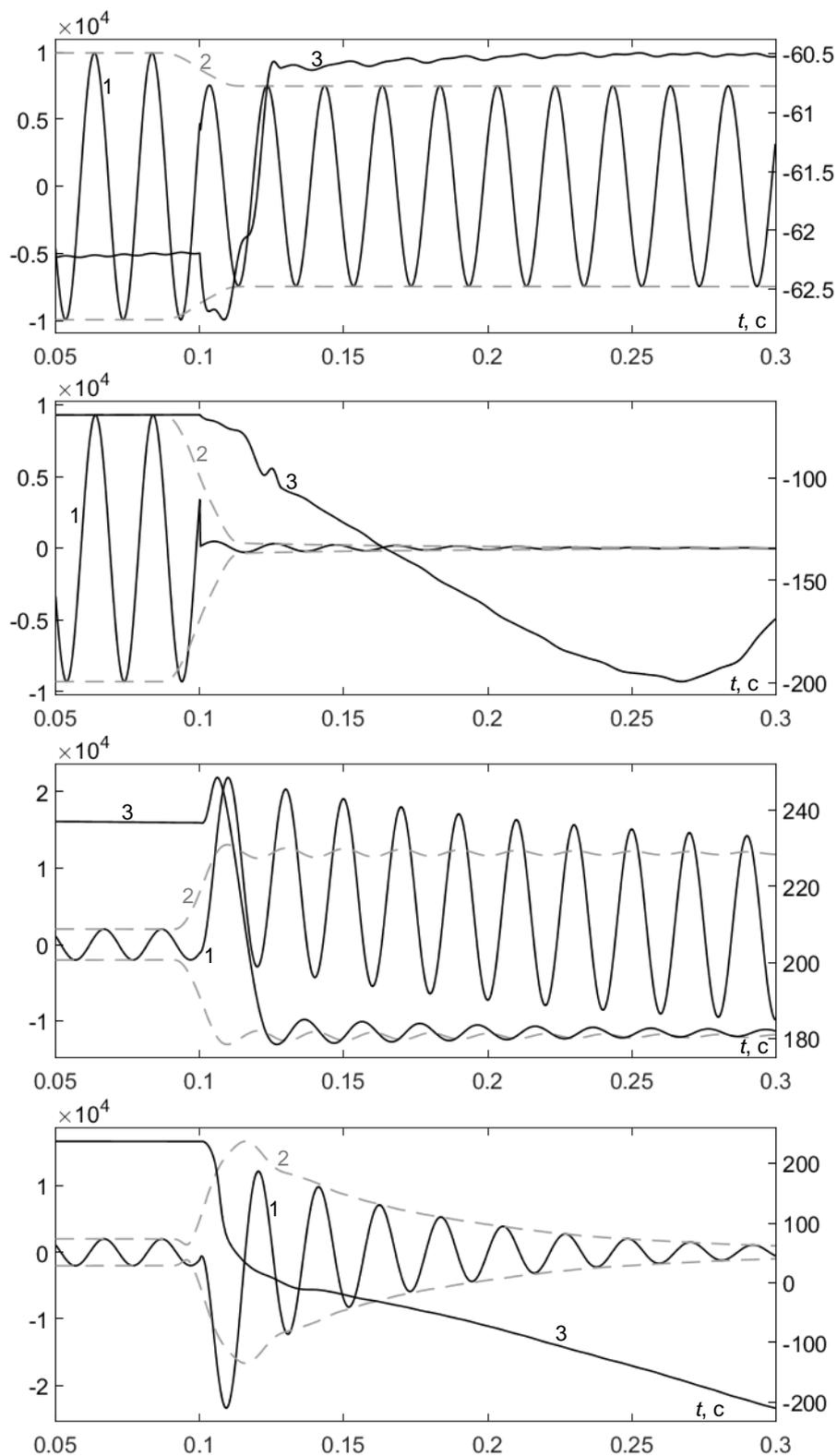


Рис. 5. Графики токов, напряжений, модулей и аргументов синхровекторов

На рис.5 приведены графики напряжения и тока вначале $u_1(t)$, $i_1(t)$ и в конце линии $u_2(t)$, $i_2(t)$, а также графики соответствующим напряжениям и токам (кривые 1) модулей (кривые 2) и аргументов (кривые 3) синхровекторов при коротком замыкании в середине защищаемой линии. Для наглядности огибающая тока в конце линии, определяемая на основе модуля синхровектора тока, сдвинута влево по оси времени на значение, равное групповому времени задержки фильтра.

Как показали исследования, устойчивое срабатывание защиты кабельной линии обеспечивается с большим запасом по истечении течения 10 мс после возникновения КЗ. При этом длительность импульсной функции фильтра равна 27 мс (рис.4).

В работе [8] показано, что за счет использования синхровекторов может быть реализована защита шин с абсолютной селективностью, сочетающая дифференциальный принцип с контролем аргументов (фаз) и модулей синхровекторов присоединений (рис.3). В дифференциальной защите шин используется только разность тока ввода и суммы токов остальных присоединений. Поэтому использование дополнительной информации об амплитудах и фазах токов присоединений на основе СВИ позволяет повысить чувствительность и быстродействие защиты.

Выводы

Перспективность использования технологии СВИ для релейной защиты понизительных подстанций и РП связана с возможностью широкого внедрения быстродействующих защит с абсолютной селективностью, а также увеличения функциональных возможностей защит. При создании локальных и распределенных систем РЗ с поддержкой технологии СВИ особое внимание следует уделять моделированию защищаемого объекта и защиты, синтезу быстродействующих алгоритмов устройств РЗА.

Литература

1. Héctor J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. Pullman: Schweitzer Engineering Laboratories, 2010, 361 p.
2. Шнеерсон Э.М., Либих Т. Современные методы фиксации поврежденных фаз и удаленности коротких замыканий // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. конф., М.: ВВЦ, 2004, с. 40-42.
3. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Кержаев Д.В., Романов Ю.В. Многомерная релейная защита // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматика энергосистем: сб. докл. XIX конф., М.: Н-ИИА, 2009, с. 105-111.
4. Нагай И.В. Построение многопараметрических защит дальнего резервирования с повышенной распознаваемостью повреждений // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. XX конф., М.: Н-

ИИА, 2010, с.264-266.

5. Emerson E.A. Temporal and modal logic. In J. van Leeuwen, editor, Handbook of Theoretical Computer Science. Elsevier Science Publishers B.V., 1990, pp. 996–1072.

6. Mi Zeng-Qiang, Zhao Hong-Shan, Wang Hai-Ping, Li Ying. Linear Temporal Logic Control of Power Systems // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005, pp. 1-5.

7. Мокеев А.В. и др. Расширение функциональных возможностей синхронизированных векторных измерений // Оперативное управление в электроэнергетике. 2016,1, с. 39-47.

8. Мокеев А.В., Хромцов Е.И. Многофункциональные устройства с поддержкой СВИ для цифровых подстанций и цифровых сетей // Релейная защита и автоматизация, 2019. № 4, с. 20-25.

9. Булычев А.В. и др. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019, № 1, с. 70-76.

10. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992, 528 с.

11. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения. М.: Энергоиздат, 2005, 273 с.

12. Кужеков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1983, 184 с.

13. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: МЭИ, 2002, 296 с.

14. Ванин В.К. Попов М.Г., Попов С.О. Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2011, №3, с. 27-32.

15. Mokeev A.V. Filter synthesis for PMU // IEEE International Conference SIBCON-2017. Astana, 2017, pp. 1-6.