

**Авторы:**  
**к.т.н. Ефремов В.А.,**  
**к.т.н. Мартынов М.В.,**  
 ООО «ИЦ «Бреслер»,  
 г. Чебоксары, Россия.  
**Буров А.В.,**  
**Гайдаш А.А.,**  
 АО «Тюменьэнерго»,  
 г. Сургут, Россия.

# АДАПТИВНАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

## ADAPTIVE DISTANCE PROTECTION OF TRANSMISSION LINE

**Аннотация:** в результате реализации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы в составе программы инновационного развития АО «Тюменьэнерго» ведущим отечественным разработчиком и производителем устройств релейной защиты и автоматики сетей 6-750 кВ ООО «ИЦ «Бреслер» разработан опытный образец устройства адаптивной дистанционной защиты линий электропередач 110-220 кВ.

**Ключевые слова:** адаптивная дистанционная защита, избиратель поврежденных фаз, фильтр аварийных составляющих, информационные модели энергосистемы.

**Ph. D. Efremov V.A.,**  
**Ph. D. Martynov M.V.,**  
 LLC "Research Center  
 "Bresler",  
 Cheboksary, Russia,  
**Burov A.V.,**  
**Gaidash A.A.,**  
 JSC "Tyumenenergo",  
 Surgut, Russia.

**Annotation:** the leading domestic developer and manufacturer of relay protection and automation of powergrids 6-750 kV LLC "RC "Bresler" developed a prototype device of adaptive distance protection of power lines 110-220 kV as a result of research and development work as part of the program of JSC "Tyumenenergo" innovative development.  
**Keywords:** adaptive distance protection, phase selector, emergency component filter, information powergrid model.

Вот уже более 20 лет на российском рынке релейной защиты и автоматики (РЗА) внедряются цифровые устройства защиты. А что они привнесли с собой? Сервис, диагностика, управляемость, удобство работы, спорный МЭК 61850... Можно долго перечислять достоинства микропроцессорных РЗА (МП РЗА) перед электромеханикой (э/м) и только в самом конце списка следует добавить «еще и более совершенные алгоритмы». С точки зрения сегодняшнего уровня алгоритмизации РЗА будем различать «классические» и «адаптивные» защиты. «Классической» будем называть РЗА, которая для своего функционирования использует информацию только о текущих токах  $i(t)$ , напряжениях  $u(t)$  и их комбинации, например мощности  $p(t)$ .

Введем понятие «адаптивной» РЗА, которая адаптирует (изменяет) свои характеристики срабатывания в зависимости от параметров доаварийного (предшествующего) режима (например, [1,2]). В более общем случае прямая адаптация производится в дискретном пространстве, подразделенном на ячейки [3,4]. Способы косвенной адаптации в релейной защите ведут своё начало от широко известного реле Бреслера [5]. Их можно интерпретировать при помощи представлений об алгоритмических моделях объекта, осуществляющих преобразование наблюдаемых величин в напряжения и токи места предполагаемого повреждения [6,7].

Основное преимущество МП РЗА перед э/м РЗА – возможность использования инфор-

мации о предшествующем режиме. Даже в современных МП РЗА, реализованных по канонам «классических» РЗА такая информация практически не применяется. Использование сведений о предшествующем режиме  $i_{пред}(t)$  и  $u_{пред}(t)$  значительно увеличивает объем информации, который необходим для принятия решения.

Известно, что разница между текущим и предшествующим режимами определяется как аварийный режим, источником которого является место повреждения/коммутации. Таким образом, аварийные составляющие  $i_{ав}(t) = i(t) - i_{пред}(t)$ ,  $u_{ав}(t) = u(t) - u_{пред}(t)$ ; несут полную информацию об аварии: место (зона) повреждения, вид повреждения, поврежденные фазы.

**Адаптивная РЗА** базируется на аварийных составляющих. Некоторые элементы адаптивных РЗА – избиратель поврежденных фаз и вида повреждения на базе аварийных составляющих уже прошли многолетнюю апробацию в качестве избирателя поврежденных фаз (ИПФ) в устройствах однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) производства ООО «ИЦ «Бреслер». Более чем за десятилетнюю историю ИПФ не зафиксировано ни одного неселективного действия. Кроме того, ИПФ не требует расчета параметров срабатывания (уставок).

Адаптивная система релейной защиты строится на базе реле с двумя подведенными величинами, пример, адаптивная дистанционная защита (АДЗ). Для АДЗ необходимы

алгоритмы от всех видов повреждений с высокой чувствительностью срабатывания. Параметры срабатывания адаптивных систем зависят от величин предшествующего режима и автоматически подстраиваются под нагрузочный режим, т.е. АДЗ по принципу действия не требует расчета параметров срабатывания защит. Для таких систем важен алгоритм функционирования (алгоритм первичен), а характеристика срабатывания на плоскости всегда вторична и служит для отображения областей нахождения годографа сопротивлений в рассматриваемых режимах. Заметим, что, адаптация с помощью характеристик РС (уменьшения характеристики срабатывания при увеличении нагрузочного режима) с точки зрения теории автоматического управления не может считаться полностью адаптивной, так как при этом не происходит восполнения априорной информации апостериорной.

Одной из решаемых задач АДЗ является отображение на плоскости предельных границ годографов реле сопротивления в различных режимах (см. рис.1). (Годографы построены для реальной ЛЭП с углом передачи  $\pm 20$  эл.град соответственно).

В процессе изменения параметров нагрузочного режима происходит изменение характеристики адаптивного РС. Форма характеристики перестраивается в зависимости от положения точки замера в нагрузочном режиме, с учётом измерительных и априорных погрешностей должна иметь вид, представленный на рис. 2.

В процессе реализации НИ-ОКР в рамках совместной работы АО «Тюменьэнерго» и ООО «ИЦ «Бреслер» был разработан, испытан и введен в опытно-промышленную эксплуатацию опытный образец устройства адаптивной дистанционной защиты линий электропередач 110-220 кВ, который в качестве критерия повреждения использует безусловный признак – резистивность природы повреждения. Инновационное устройство было установлено на ВЛ 110 кВ Ленинская-

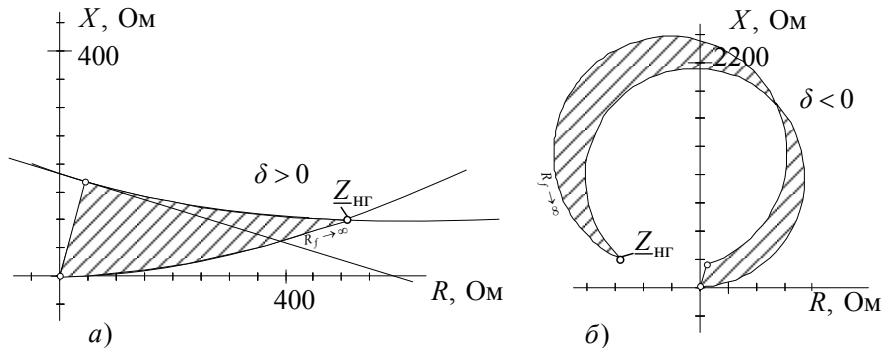


Рис. 1. Отображение на плоскости предельных границ годографов реле сопротивления в зависимости от направления передачи мощности на ЛЭП

а – прямая передача; б – обратная передача мощности

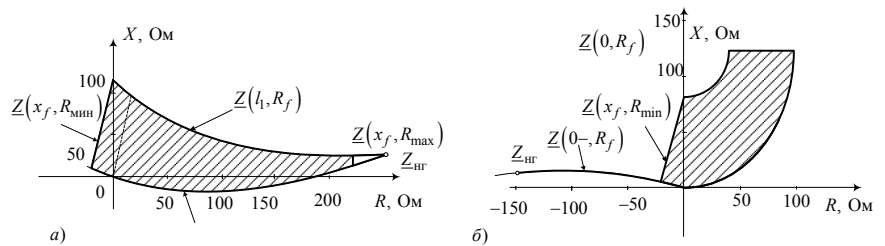


Рис. 2. Характеристика срабатывания адаптивного реле сопротивления с учётом погрешностей замера при прямой (а) и обратной (б) передаче мощности на ЛЭП

Лосинка-1 ПС 110/35/6 кВ Лосинка филиала АО «Тюменьэнерго» Нефтеюганские электрические сети.

В роли элементов реагирования могут выступать реактивные параметры, принимающие нулевое значение в месте повреждения. На основной гармонике параметр выглядит

$$\sigma(x) = Q_{f\Sigma}(x) = \sum_{\nu=A,B,C} \text{Im}[\dot{U}_{\nu}(x) \cdot I_{\nu}^*(x)], \quad (1^*)$$

где  $\dot{U}_{\nu}, \dot{I}_{\nu}$  – напряжение и ток поперечной ветви;  $\nu = A, B, C$  – обозначение фаз сети;  $x$  – координаты контролируемой линии.

Общий критерий идентификации повреждения в ЛЭП должен заключаться в требовании  $\sigma^2(x) \rightarrow \min$ . Основная идея реализованного алгоритма АДЗ заключается в определении знаков аварийной реактивной мощности по концам защищаемой зоны:  $Q(0) = \text{Im} \left[ \sum_{\nu=A,B,C} \text{Im}[\dot{U}_{\nu\text{ав}}(0) \cdot I_{\nu\text{ав}}^*(0)] \right]$ ,

$$Q(l_3) = \text{Im} \left[ \sum_{\nu=A,B,C} \text{Im}[\dot{U}_{\nu\text{ав}}(l_3) \cdot I_{\nu\text{ав}}^*(l_3)] \right], \text{ где}$$

$l_3$  координата конца зоны. При разных знаках реактивной мощности по концам зоны фиксируется срабатывание АДЗ т.е. выполняется условие  $\text{sign}(Q(0)) \neq \text{sign}(Q(l_3))$  [8].

В алгоритм, реагирующий на знаки реактивной мощности по концам зоны защиты, внесены ряд инновационных решений, которые позволили усовершенствовать его.

В результате теоретических исследований и практических исследований был создан алгоритм АДЗ [9], в котором удалось достичь:

- повышения чувствительности защиты;
- минимального объема расчетов параметров срабатывания защиты при вводе защиты в работу и отсутствия таковых операций при дальнейшей эксплуатации, в т.ч. и при изменении параметров защищаемого объекта или изменении его режимов работы;

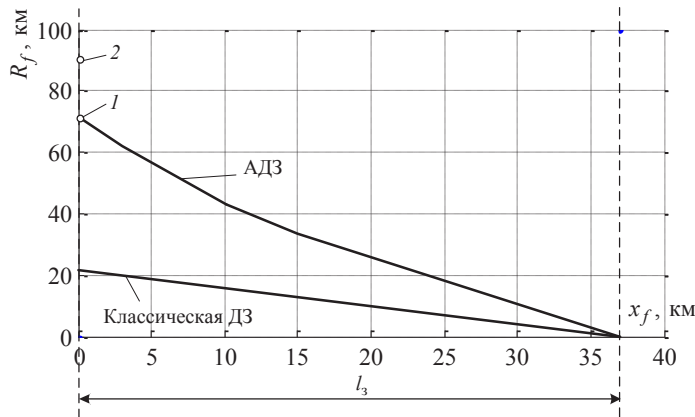


Рис. 3. Объектная характеристика адаптивной и «классической» дистанционной защиты

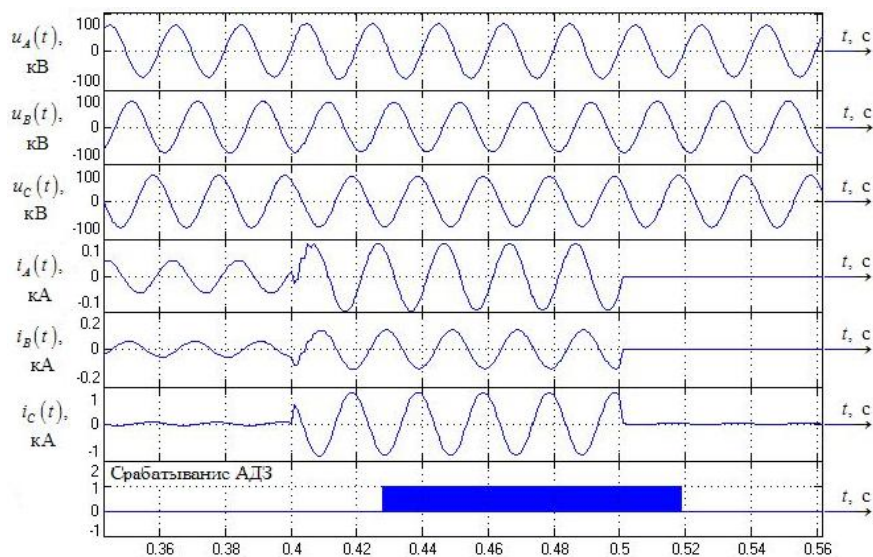


Рис. 4. Осциллограмма работы АДЗ при  $x_f = 0.1$  км,  $R_f = 70$  Ом

– отсутствия «мертвой зоны» защиты при близких металлических трехфазных КЗ.

**Повышение чувствительности защиты.** Опираясь на резистивную природу повреждения теоретически можно рассматривать АДЗ с чувствительностью к переходным сопротивлениям величины сотни и тысячи Ом, т.е. АДЗ пригодна для целей диагностики ЛЭП. Однако универсализм алгоритма функционирования, а также конечная чувствительность измерительных цепей защиты ограничивают возможности АДЗ. На рис.3 приведены объектные характеристики адаптивного и «классического» РС для ВЛ 110 кВ «Ленинская-Лосинка-1».

Практически по всей длине ЛЭП можно наблюдать значительное (не менее чем в 3 раза) увеличение чувствительности к переходным сопротивлениям по сравнению с «классической» ДЗ. На рис.4 показана осциллограмма работы защиты при  $K_C^{(1)} x_f = 0.1$  км,  $R_f = 70$  Ом, что соответствует точке 1 на рис. 3. Следует отметить, что при увеличении переходного сопротивления в месте КЗ до срабатывания защиты из-за недостаточной чувствительности не происходит, что соответствует положению точки 2 на рис. 3.

Отсутствие необходимости расчета уставок. Одна из проблем РЗА, которая усугубилась в последнее время с внедрением МП РЗА и, как следствие, с резким увеличением функциональности защит, является задача расчета параметров срабатывания (уставок) защит.

Эта задача требует решения двух взаимосвязанных задач:

- моделирование (расчет) режимов сети;
- расчет параметров срабатывания защит.

Задача усложняется и тем, что указанные подзадачи считаются разными организациями. Для расчета режимов необходимы параметры эквивалентных систем, которые для расчетных подразделений энергосистем может представить системный оператор.

Поэтому разработка защит, которые требуют минимума расчета параметров срабатывания (ИПФ - отстройка

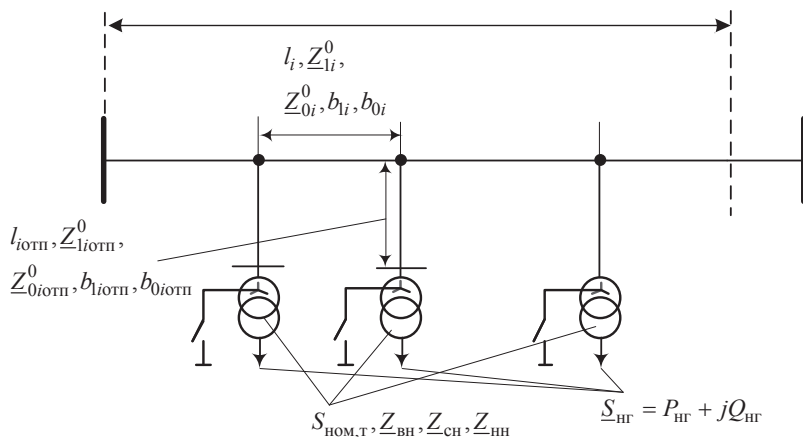


Рис. 5. Параметры, необходимые для задания алгоритмической модели 1 ступени в терминале защиты



**Ефремов  
Валерий Александрович**

В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Адаптивный дистанционный принцип и средства его реализации» в Санкт-Петербургском техническом университете. Доцент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского госуниверситета, Директор Центра применения продукции ООО "ИИЦ "Бреслер".



**Мартьянов  
Михаил Владимирович**

Защитил в 2014 г. кандидатскую диссертацию на тему «Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи» в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова. Инженер-исследователь ООО "ИИЦ "Бреслер".

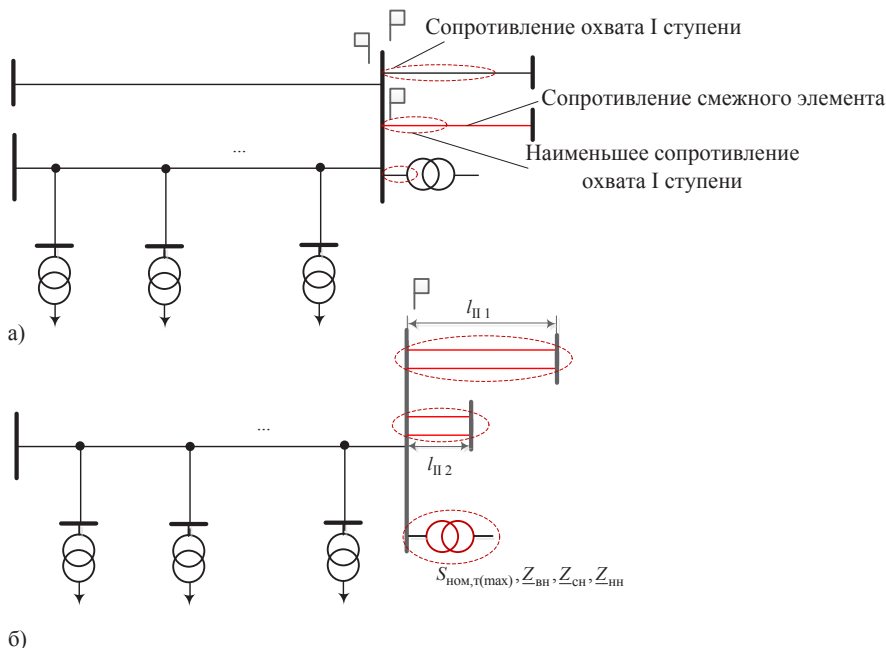


Рис. 6. Условия выбора параметров алгоритмической модели II ступени:

а – выбор минимального значения сопротивления охвата I ступени защит смежных элементов для задания уставки охвата II ступени; б – выбор минимального значения сопротивления смежных двухцепных ВЛ в режиме работы двух цепей и минимального сопротивления смежного трансформатора наибольшей мощности

от небалансов измерительных цепей) или ввода только информации о параметрах защищаемого объекта (например, для АДЗ ЛЭП необходимы длина линии, марки провода троса, тип опор, способ заземления троса или уже рассчитанные погонные параметры), является не только актуальной задачей с точки зрения выполнения организационных задач, но и решает проблему с квалификацией персонала по расчету параметров срабатывания защит. На рис.5 приведены все необходимые параметры 1-й ступени АДЗ для ли-

нии с отпайками «Ленинская-Лосинка-1».

Для 2-й ступени АДЗ требуется согласование со ступенями ДЗ (ТЗНП) смежной подстанции «Ленинская». На рис.6 показаны условия выбора параметров алгоритмической модели II ступени. Для третьей ступени задаются сопротивления охвата смежного резервируемого элемента.

Отсутствие «мертвой» зоны при близких трехфазных КЗ. На рис.7 показаны годографы сопротивления «классического» РС при близких трехфазных КЗ у шин подстанции.

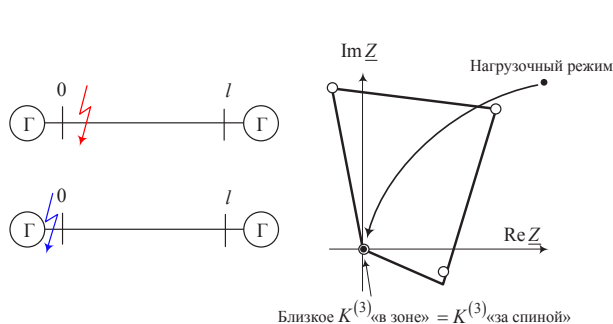


Рис. 7. Работа «классического» реле сопротивления при близких трехфазных КЗ

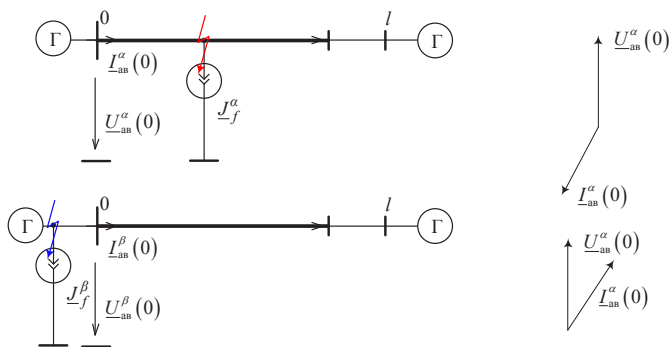


Рис. 8. Определение направления на близкое металлическое трехфазное КЗ по аварийным составляющим



**Гайдаш**

**Андрей Александрович**

В 2006 г. окончил Омский Государственный Технический Университет (ОмГТУ), электротехнический факультет, кафедру «Электрическая техника». Начальник службы РЗА филиала АО "Томьэнерго" Нефтеюганские электрические сети.



**Буров**

**Андрей Викторович**

В 1997 г. окончил Уральский Государственный Технический Университет (УГТУ-УПИ), электротехнический факультет, кафедру «Автоматизированное управление электро энергетическими системами». Начальник службы РЗА АО "Томьэнерго".

Известно, что у ДЗ при  $|\dot{U}_p| \rightarrow 0$  РС может потерять направленность.

Решение проблемы «мертвой» зоны при близких трехфазных КЗ в АДЗ показано на рис.8. Для определения направленности использованы аварийные составляющие токов и напряжений. Аварийная составляющая напряжения при близких КЗ практически равна фазному напряжению, что позволяет с большим запасом селективно определять направленность на КЗ.

На рис.9 показана осциллограмма работы защиты при близком трехфазном КЗ в зоне, на рис.10 – при близком трехфазном металлическом КЗ «за спиной».

**Выводы:**

1. Разработанный алгоритм адаптивной защиты ООО «ИЦ «Бреслер» обладает большей чувствительностью к КЗ через переходные сопротивления нежели алгоритм «классической» ДЗ.

2. Определение направления на источник КЗ по аварийным составляющим позволяет исключить «мертвую» зону защиты при близких трехфазных КЗ.

3. Алгоритм АДЗ не требует расчета параметров срабатывания измерительных органов, а лишь задания зоны охвата ступеней. Это исключает потребность в данных об эквивалентах питающих сетей и что значительно упрощает процедуру параметрирования защиты.

**Литература:**

1. Патент США № 5796258. Adaptive quadrilateral characteristic distance relay, 1998 / L. Yang.
2. Патент США № 7872478. Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines, 2011 / M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski.
3. Патент РФ № 2247456. Способ релейной защиты энергообъекта. БИ, 2005, № 6 / Ю.Я. Лямец, Е.Б. Ефимов, Г.С. Нудельман.
4. Патент РФ № 2248077. Способ дистанционной защиты линии электропередачи. БИ, 2005, № 7 / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Е.Б. Ефимов, В.А. Ефремов.
5. Авторское свидетельство СССР № 66343. Устройство для защиты высоковольтных линий передачи от замыканий между фазами, 1944 / А.М. Бреслер.
6. Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи. – Электричество, 1996, № 12, С. 2-7.
7. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты. – Электричество, 1999, № 3, С. 8-15.
8. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линии электропередачи // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр./ Чебоксары. Изд. ЧГУ, 1992., с. 9-32.
9. Заявка на изобретение РФ №2015136614. Способ дистанционной защиты линии электропередачи, 2015, МПК H02H3/40.

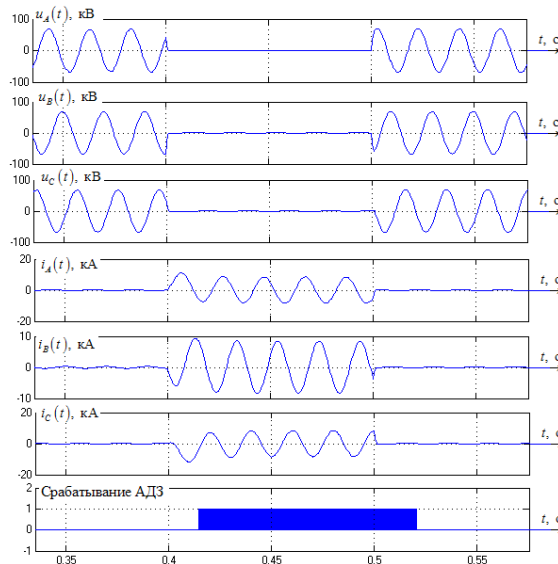


Рис. 9. Работа защиты при близком трехфазном металлическом КЗ в зоне

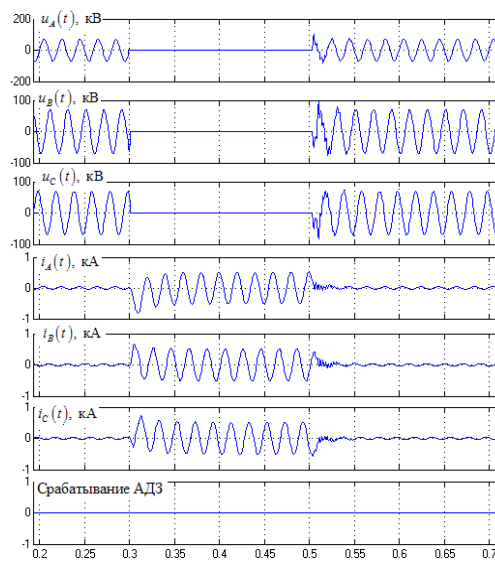


Рис. 10. Работа защиты при близком трехфазном металлическом КЗ «за спиной»