

Устройство автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов

Развитие инфраструктуры Московского мегаполиса является определяющим стимулом развития сети кабельно-воздушных линий высокого напряжения в ПАО «МОЭСК». Актуальные требования надежности электроснабжения определяют необходимость автоматического повторного включения линий электропередачи, выполненных неизолированными проводами.

Денис ДОГАДКИН, директор департамента электрических режимов ПАО «МОЭСК»,

Роман МАРИН, главный эксперт департамента электрических режимов ПАО «МОЭСК»,

Елена ШИРШОВА, главный эксперт департамента электрических режимов ПАО «МОЭСК»,

Григорий ИСМУКОВ, инженер-исследователь 1 категории ООО «Релематика»

Александр КУЛИКОВ, д.т.н.,

научный консультант ООО «Релематика»

Михаил ЛИНТ, к.т.н., директор по стратегическому развитию ООО «Релематика»

Андрей ПОДШИВАЛИН, к.т.н., заведующий отделом ООО «Релематика»

В Правилах устройства электроустановок [1] предписано: «...Должно предусматриваться автоматическое повторное включение (АПВ) воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линий всех типов напряжений выше 1 кВ. Отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован». Однако в электротехнической практике отсутствуют типовые технические решения, обе-

спечаивающие АПВ кабельно-воздушных линий электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения (например, 110 кВ и выше).

Опыт эксплуатации показывает, что короткие замыкания на кабельной части линий имеют устойчивый характер. Значит, целесообразно реализовать АПВ кабельно-воздушных ЛЭП при повреждениях на воздушных участках и запретить АПВ при повреждениях на кабельных участ-

ках. С точки зрения изложенной логики, применяемые на практике алгоритмы АПВ воздушных ЛЭП [2] неэффективны на комбинированных линиях электропередачи (КВЛ), так как могут приводить к значительным объемам повреждений и дорогостоящему ремонту кабельной части. Действительно, повторная подача высокого напряжения на высоковольтный кабель, проходящий в зоне жилых построек, может привести к существенному ущербу, травмированию и даже гибели людей. Следует отметить, что на высоковольтных кабелях, как правило, отсутствует явление самоустранения повреждения, и перед повторной подачей напряжения на кабель его необходимо испытывать.

Поэтому для эффективного АПВ высоковольтных кабельно-воздушных ЛЭП необходимо с высокой точностью определить, на каком из участков (воздушном или кабельном) произошло повреждение, и при устранении повреждения на воздушном участке реализовать АПВ ЛЭП.

Для обеспечения надежности сети 110 кВ и выше и минимизации затрат на аварийно-восстановительные работы ПАО «МОЭСК» организовано выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) по созданию устройства автоматического повторного включения с функциями определения места короткого замыкания кабельно-воздушных линий, а также контроля состояния поврежденного воздушного участка перед повторным включением КВЛ.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Для эффективного выполнения АПВ КВЛ были выделены следующие задачи: определение поврежденного участка КВЛ, определение места повреждения (ОМП), контроль состояния поврежденного участка в бестоковую паузу цикла АПВ. Успешное решение этих задач должно предотвратить включение на устойчивые КЗ.

Определение поврежденного участка КВЛ, как показало исследование, целесообразно выполнять методом сравнения токов по концам кабельных участков КВЛ.

Ни один другой метод не может сравниться по точности зоны с дифференциальным принципом. Схема токовой продольной дифференциальной защиты, однако, является во многих случаях неоправданно дорогим решением, в первую очередь, из-за высокой стоимости канала связи и его монтажа. В данной работе применены датчики тока (ДТ) — терминалы специального исполнения, установленные на кабельно-воздушных переходах ЛЭП. Требования к каналу связи между ними значительно снижены, а потому для связи полуккомплектов может применяться ряд беспроводных технологий, включая GPRS и другие протоколы соевой связи.

Измерение токов в местах сопряжения кабельного и воздушного участков является сложной технической задачей. В рамках настоящей работы апробировано и обосновано решение на основе трансформатора тока, закрепленного поверх изо-

ляции силового кабеля (пофазно) под опорным изолятором.

Центральное устройство комплекса АПВК имеет возможность сравнить токи, измеренные в разных точках КВЛ в момент КЗ. Таким образом, КЗ на кабельном участке КВЛ может быть надежно выявлено, при этом зона естественным образом ограничена местоположением трансформаторов тока.

Для решения задачи ОМП были рассмотрены традиционные и инновационные алгоритмы:

- ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР);
- локационный метод (активное зондирование);
- волновой метод (ВОМП).

В первом способе используются аварийные токи и напряжения, измеряемые в точках включения защиты линии. Дистанционный принцип на сегодняшний день используется повсеместно для решения задачи ОМП электрических сетей.

Локационный способ выполнен по принципу радиолокации, только в данном случае зондирующий сигнал распространяется по проводным каналам высоковольтной линии электропередачи. Оценка расстояния до места повреждения выполняется на основе времени пробега волны от места посылы зондирующего сигнала до места повреждения и обратно. В данном случае посыл и измерение сигнала выполнены в одном устройстве. Полученное время используется в расчете места повреждения:

$$x_f = vt_{3П}/2, \quad (1)$$

где x_f — расстояние до места повреждения, км; v — скорость распространения волны по ЛЭП, км/с; $t_{3П}$ — время между посылкой и приемом отраженного от места повреждения сигнала, с.

Локационная функция имеет важное преимущество перед остальными видами ОМП — она может работать как на включенной ЛЭП, так и на отключенной. Последнее свойство используется для диагностики воздушной части КВЛ. Активное зондирование запускается в бестоковую паузу. Если повреждение не самоустранилось, то функция выдаст запрет АПВ. Процент успешности АПВ в таком случае может быть повышен.

Локационная функция также может быть запущена вручную, например, перед опробованием линии. Функция выявит повреждение и выдаст расстояние до него. Это может быть КЗ, обрыв, включенный заземляющий нож на отпайке и другие ситуации, в которых подача напряжения на КВЛ недопустима.

Волновой метод реагирует на электромагнитную волну, возникшую в месте повреждения в результате КЗ. Измеряется время прихода волны в полуккомплекты ВОМП, установленные по концам ЛЭП (полуккомплекты должны быть синхронизированы с глобальным временем с помощью GPS/ГЛОНАСС). Последние производят расчет расстояния до места повреждения [3]:

$$x = L/2 + v \cdot (t_2 - t_1), \quad (2)$$

где L — длина ЛЭП, км; t_1 и t_2 — времена прихода электромагнитных волн на первый и второй концы ЛЭП.

В рамках НИОКР выполнено моделирование схемно-режимных ситуаций с использованием модели энергосистемы, реализованной на базе программно-аппаратного комплекса RTDS. В модели были учтены основные особенности ЛЭП ПАО «МОЭСК»: ответвления, индуктивная связь между ЛЭП, соотношение параметров ЛЭП и систем. Моделировались следующие режимы повреждений:

- установившиеся режимы с различными значениями потоков мощности;
- однофазные, междуфазные, двухфазные на землю и трехфазные КЗ;
- повреждения через переходные сопротивления.

Так как программно-аппаратный комплекс RTDS не позволяет моделировать волновые процессы в линиях электропередачи, исследование волнового и локационного методов проводилось на физических моделях.

По результатам испытаний было выяснено, что алгоритм ОМП по ПАР не обеспечивает достаточную надежность определения поврежденного участка КВЛ при коротких замыканиях вблизи переходов кабель-воздух, что ограничивает возможности его применения для целей АПВ на сложных КВЛ и КВЛ с короткими кабельными вставками. Кроме того, точность определения расстояния до места КЗ данным методом ниже, чем потенциальная точность локационного и волнового методов. Тем не менее, сделан вывод о целесообразности применения данного метода в качестве вспомогательного с целью достоверизации и контроля сигнала разрешения АПВ в составе АПВК.

В ходе НИОКР созданы и испытаны в лабораторных условиях макетный образец волнового устройства определения места повреждения, реализующий волновую функцию АПВК (волновое ОМП и активное зондирование), получивший наименование ВОЛНА2, и макетный образец трехфазного датчика тока ДТ.

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ АПВК

Лабораторные испытания макетных образцов подтвердили функциональность и технические характеристики основных узлов комплекса АПВК и позволили приступить к следующему, последнему этапу НИОКР — созданию опытного образца.

Было проведено предпроектное обследование нескольких КВЛ, по результатам которого был выбран и согласован с Московским РДУ объект для эксплуатационных испытаний опытного образца комплекса АПВК — КВЛ 110 кВ Костино — Горенки с отпайкой на ПС «Балашиха». Для привязки комплекса АПВК к объекту испытаний была разработана рабочая проектная документация, на основании которой выполнена конструкторская



Рис. 1. Терминалы ДТ, АУВ2 и ВОЛНА2, установленные в шкафу ПС «Горенки»: слева сверху — терминал АУВ2, справа — терминал ДТ, ниже — терминал ВОЛНА2

документация опытного образца и изготовлено оборудование.

Опытный образец АПВК состоит из трех шкафов:

1. Шкаф АПВК, установленный в общеподстанционном пункте управления (ОПУ) ПС 110 кВ «Костино» в составе:
 - терминал АУВ2 с функцией АПВ и ОМП по ПАР, сопряженной с функциями диагностики КЛ и ВЛ;
 - терминал ВОЛНА2;
 - элементы оптической связи с ПС 220 кВ «Горенки»;
 - элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС.
2. Шкаф АПВК, установленный в ОПУ ПС 220 кВ «Горенки» в составе:
 - терминал АУВ2 с функцией АПВ и ОМП по ПАР, сопряженной с функциями диагностики КЛ и ВЛ — центральное устройство комплекса;
 - терминал ВОЛНА2;
 - терминал ДТ;
 - элементы оптической связи с ПС 110 кВ «Костино»;
 - элементы радиосвязи со шкафом АПВК, установленным на открытом распределительном устройстве (ОРУ) ПС «Горенки»;
 - элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС.
3. Шкаф АПВК, установленный на ОРУ ПС «Горенки» в составе:
 - терминал ДТ;
 - элементы радиосвязи со шкафом АПВК, установленным в ОПУ ПС 220 кВ «Горенки»;
 - элементы синхронизации с глобальным временем GPS/ГЛОНАСС.

На рисунке 1 приведено фото терминалов ДТ, АУВ2 и ВОЛНА2, установленных в шкафу ПС «Горенки».

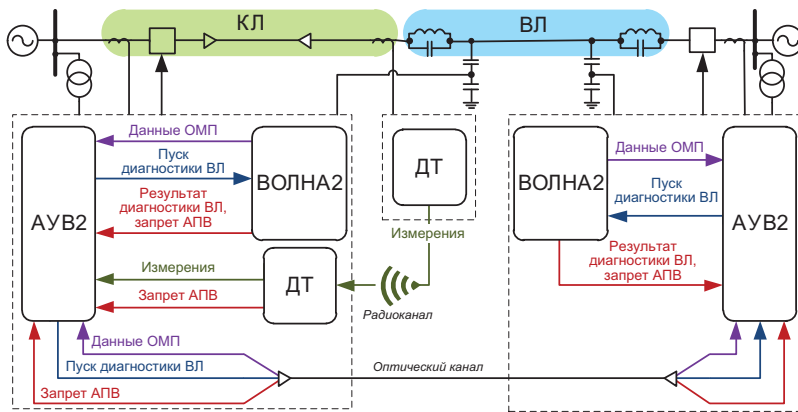


Рис. 2. Структурная схема подключения опытного образца АПВК на КВЛ Костино — Горенки с отп.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ АПВК

Оборудование опытного образца было доставлено на объекты летом 2015 года и смонтировано в соответствии с разработанной рабочей документацией (рисунки 2 и 3).

К шкафам АПВК в ОПУ ПС 220 кВ «Горенки» и ПС 110 кВ «Костино» были подведены токи и напряжения КВЛ 110 кВ Костино — Горенки с отп. В месте кабельно-воздушного перехода на ОРУ ПС 220 кВ «Горенки» были установлены накладные трансформаторы тока (рисунки 4а и 4б), их вторичные токи были заведены в шкаф АПВК наружной установки. В связи с тем, что не было возможности установить трансформаторы тока (ТТ) непосредственно поверх основной изоляции кабеля на вводе в переходную муфту, накладные ТТ установлены поверх экрана. При этом для компенсации токов, проходящих во время КЗ по экранной оболочке в каждой фазе на заземляющем спуске, установлен дополнительный ТТ.

Испытания проводились на 2-х этапах НИОКР: на этапе 2 испытывались терминалы, а на этапе 3 — комплекс АПВК в целом. Программа испытаний опытного образца АПВК включала следующие разделы:

- проверка работоспособности устройств АПВК;
- параметрирование и конфигурирование устройств АПВК;
- проверка устойчивой работы GPS/ГЛОНАСС приемников;
- проверка связи между устройствами АПВК;
- проверка работы устройств АПВК при имитации КЗ на кабельной части токами рабочего режима;
- проверка работы устройств АПВК на отключенной линии электропередачи в режиме имитации бестоковой паузы цикла АПВ в условиях неустранившегося КЗ;
- проверка работы ВОМП при коммутациях выключателей по концам КВЛ.

По разрешенным заявкам в соответствии с согласованной комплексной программой проведены испытания как отдельных терминалов ВОЛНА2 и ДТ, так и опытного образца АПВК в целом.

Наиболее сложная часть испытаний состояла в проверке работы устройств АПВК на отключенной линии электропередачи в режиме имитации бестоковой паузы цикла АПВ в условиях неустранившегося КЗ. Для каждой операции установки и снятия закоротки, имитировавшей повреждение, на отключенной линии выписывался отдельный заказ-наряд, и ремонтная бригада осуществляла работы с подъемом и спуском рабочих-высотников на опоре линии электропередачи (рисунки 5 и 6).

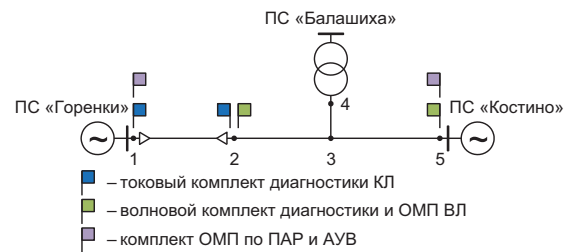


Рис. 3. Расстановка оборудования на КВЛ Костино — Горенки с отп.



Рис. 4. Для измерения токов перехода «кабель-воздух» использованы накладные трансформаторы тока, подключенные поверх экрана кабеля и на заземляющем спуске

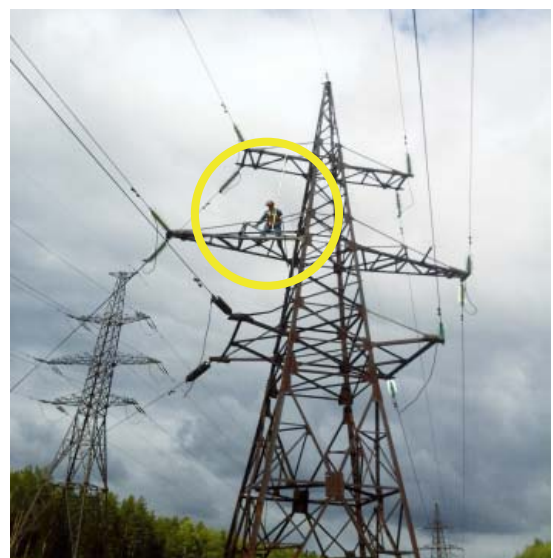


Рис. 5. Установка закоротки на линии с помощью переносного заземления

Табл. 1. Результаты испытаний локационной функции АПВК

№	Место повреждения	Вид повреждения	Дата и время	Сигнал запрета АПВ	Погрешность измерения расстояния до точки КЗ (лок. метод)
1	Опора № 111 со стороны ПС «Костино», 0,3 км от ПС «Горенки», 21 км от ПС «Костино»	Однофазное КЗ, нижний провод, фаза «А»	09.09.2015 16:08	+	200–600 м
2		Однофазное КЗ, средний провод, фаза «С»	09.09. 2015 15:00	+	
3		Междуфазное КЗ, верхний и средний провода, фазы «В» и «С»	09.09. 2015 17:34	+	
4		Двухфазное КЗ на землю, верхний и средний провода, фазы «В» и «С»	09.09. 2015 19:23	+	
5		Трехфазное КЗ без земли	10.09. 2015 11:01	+	
6	Опора № 84 со стороны ПС «Костино», 5,2 км от ПС «Горенки», 16,1 км от ПС «Костино»	Однофазное КЗ, нижний провод, фаза «А»	10.09. 2015 15:00	+	100–500 м
7	Опора № 2 со стороны ПС «Балашиха» 5,2 км от ПС «Горенки», 16,4 км от ПС «Костино»	Однофазное КЗ, верхний провод, фаза «В»	10.09. 2015 18:47	+	300 м
8		Однофазное КЗ, средний провод, фаза «С»	10.09. 2015 20:05	+	
9	Опора № 58 со стороны Костино, 9,9 км от ПС «Горенки», 11,4 км от ПС «Костино»	Однофазное КЗ, нижний провод, фаза «А»	11.09. 2015 10:42	+	100–800 м
10	Опора № 27 со стороны Костино, 16 км от ПС «Горенки», 5,3 км от ПС «Костино»	Однофазное КЗ, средний провод, фаза «С»	11.09. 2015 13:00	+	100–700 м

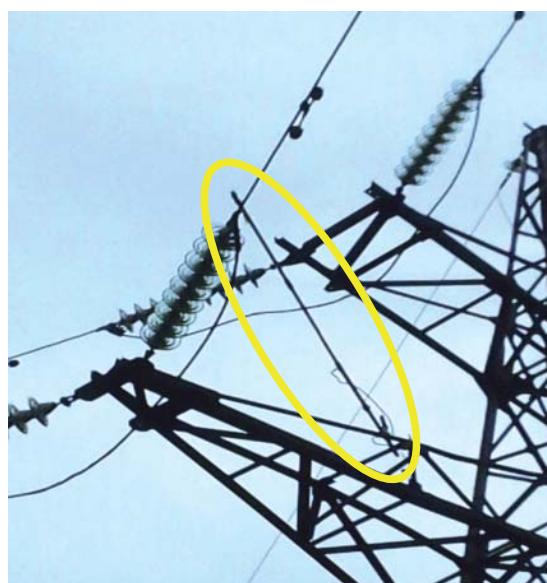


Рис. 6. Закоротка установлена, идет испытание

В таблице 1 приведены результаты испытаний локационной функции АПВК при имитации неустранившегося КЗ на воздушной части КВЛ Костино — Горенки с отп.

Функция диагностики ВЛ оперирует рефлектограммами, представляющими «портрет линии» с ее особенностями. Рефлектограммы опыта № 9 представлены на рисунках 7 и 8 со стороны ПС «Горенки» и ПС «Костино» соответственно. По рисунку 7 видно, что повреждение проявляется в точке 10,2 км в виде значительного отклонения аварийной рефлектограммы относительно

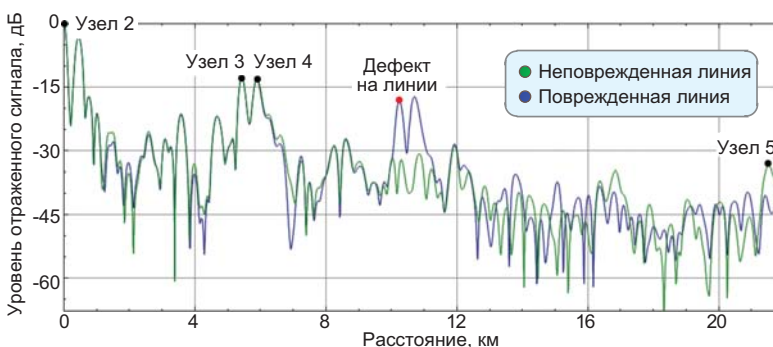


Рис. 7. Рефлектограмма опыта — опора № 58 со стороны ПС «Балашиха», однофазное КЗ фаза «А», замер со стороны ПС «Горенки»

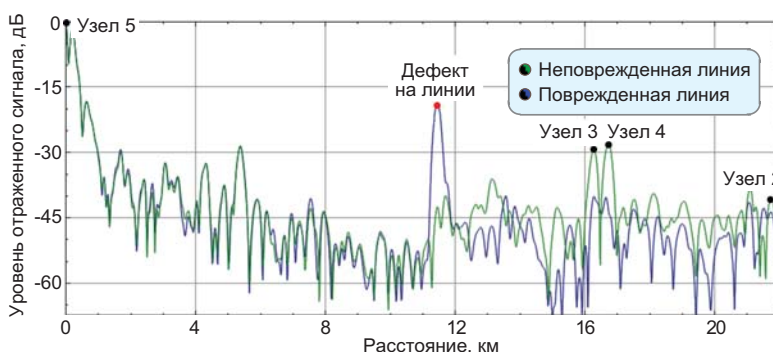


Рис. 8. Рефлектограмма опыта — опора № 58, однофазное КЗ, фаза «А», замер со стороны ПС «Костино»

рефлектограммы неповрежденной линии. Эта точка соответствует месту установки переносного заземления. То же прослеживается на другой стороне на расстоянии 11,5 км.

Повреждения кабельного участка имитировались в нагрузочном режиме работы линии. Для этого создавался искусственный небаланс входящих и исходящих токов кабеля. Результаты

Табл. 2. Результаты работы функции диагностики КЛ

Моделируемый режим	Дата и время	Способ испытания	Результат работы функции диагностики КЛ
Повреждение КЛ	11.09.2015 15:45	Линия в транзите, зашунтирован ток фазы «А» в шкафу АПВК в релейном зале ПС «Горенки». Выполняется ручной пуск АПВК.	Повреждение на КЛ
Повреждение КЛ	11.07.2015 17:39	Чувствительность пусковых органов комплекта АПВК повышена для пуска в нагрузочном режиме. Зашунтирована фаза «С» на ОРУ ПС «Горенки». Линия включается в транзит.	Повреждение на КЛ
Отсутствие повреждения КЛ	11.09.2015 17:56	Линия в транзите. Выполняется ручной пуск АПВК.	КЛ не повреждена

работы функции диагностики КЛ приведены в таблице 2. При наличии признаков повреждения функция диагностики кабельного участка формировала запрет АПВ и не запрещала его в противном случае.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ АПВК

Методика тестирования волновой функции ВОМП разрабатывалась с учетом технологических ограничений, не позволивших проводить опыты реальных коротких замыканий. Для формирования волнового процесса, который давал бы возможность проверить функционирование волновой функции, использовалась волна напряжения при опробовании КВЛ. Соответственно, источником волнового процесса в линии в проведенных опытах являлся выключатель на одном из ее концов.

Волновая функция АПВК была настроена на фактическую длину воздушной части линии Костино — Горенки. Затем линия была выведена из работы, и путем поочередной коммутации выключателей проверялись срабатывание волновых органов и точность расчета расстояния. В таких условиях результат расчета всегда должен попадать на тот конец, со стороны которого была коммутация. Волновая функция показала высокую точность определения расстояния до места повреждения. Результаты опытов с метками времени GPS и погрешностями ОМП приведены в таблице 3.

ВЫВОДЫ

1. Классическое АПВ не является эффективным решением для КВЛ, КЗ в кабельной части не само-

устраняются, повторные включения усугубляют последствия повреждения. ПАО «МОЭСК» была поставлена задача разработки специального устройства АПВ КВЛ. Она была успешно решена в рамках НИОКР «Автоматическое повторное включение с функцией контроля состояния линий электропередачи».

2. В результате НИОКР сформировано техническое решение, не имеющее аналогов как в Российской Федерации, так и за рубежом. Разработанный комплекс АПВК проводит диагностику состояния кабельной и воздушной частей линии и выполняет АПВ только в случае уверенности в его успешности.
3. Диагностика кабельной части выполнена с использованием измерений токов в местах кабельно-воздушных переходов. При повреждении выносные шкафы комплекса АПВК передают аварийные данные в центральное устройство, которое определяет, поврежден ли кабель.
4. Комплекс АПВК дополнен функцией ОМП на трех принципах: помимо традиционного способа по параметрам аварийного режима, здесь реализованы инновационные пассивный и активный волновые способы двухсторонних и односторонних измерений. Последний способ делает возможной диагностику воздушной части линии в бестоковую паузу.
5. Опытный образец комплекса АПВК прошел испытания в различных режимах работы КВЛ в лаборатории и на реальном объекте ПАО «МОЭСК», в том числе при повреждениях кабельной и воздушной частей, подтвердил свою работоспособность и соответствие требуемым характеристикам. 

Табл. 3. Результаты опытов

№	Моделируемый опыт	Место коммутации выключателя	Дата и время	Разность меток времени по концам линии, мкс	Результат ОМП, км	Погрешность ОМП, км
1	КЗ вблизи ПС «Горенки»	ПС «Горенки»	10.09.2015 21:45	-69,5	0,1	0,1
2	КЗ вблизи ПС «Костино»	ПС «Костино»	11.09.2015 15:45	71,5	21,2	0,1
3	КЗ вблизи ПС «Горенки»	ПС «Горенки»	11.09.2015 15:56	-70,5	0	0

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7-е (утв. Приказом Минэнерго от 08.07.2002. № 204.
2. Богорад А.М., Назаров Ю.Г. Автоматическое повторное включение в энергосистемах. М.: «Энергия», 1969.
3. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 19.