

Способы выявления асинхронного хода в неполнофазных режимах

В.Е. ГЛАЗЫРИН, О. В. ТАНФИЛЬЕВ, С.М. ШАЮК
ЗАО «Институт Автоматизации Энергетических Систем»,
Новосибирский Государственный Технический Университет
Россия
tanfiliev@ngs.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Противоаварийная автоматика, асинхронный ход, автоматика ликвидации асинхронного режима, неполнофазный режим, несимметричный режим.

1 ВВЕДЕНИЕ

Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) является одной из важнейших в составе комплекса противоаварийного управления в энергосистемах. Неликвидированный своевременно двухчастотный асинхронный режим может стать причиной дальнейшего развития аварии с нарушением питания ответственных потребителей или с переходом в многочастотный асинхронный режим. Устройства автоматики ликвидации асинхронного режима должны полноценно функционировать в условиях возможного многообразия схем и режимов электроэнергетической системы. Одним из таких режимов, который практически может иметь место, является неполнофазный режим работы линий электропередачи. В то же время известные методы построения устройств ликвидации асинхронного режима ориентированы для функционирования только в симметричном режиме. Важность учета неполнофазных режимов заключается также и в том, что в таком режиме, при прочих равных условиях, увеличивается вероятность нарушения устойчивости и последующего возникновения асинхронного режима.

Предметом исследования является неполнофазный асинхронный режим и способы его выявления. В настоящее время для выявления асинхронного режима при наличии несимметрии в сети используются простейшие алгоритмы, не обладающие достаточной эффективностью.

Наиболее полно состояние электроэнергетической системы отражают параметры прямой последовательности. Поэтому для работы алгоритмов АЛАР в несимметричных режимах предлагается применить способ выявления АР на основе анализа изменения сопротивления, получаемого как отношение напряжения и тока прямой последовательности.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ХОДА

2.1 Причины возникновения неполнофазного асинхронного хода

Неполнофазный асинхронный режим является результатом наложения двух режимов – неполнофазного и асинхронного режимов. Возникновение неполнофазного режима, как правило, сопровождается развитием асинхронного режима, при работе межсистемных связей с перетоками мощности, близкими к допустимому пределу.

Неполнофазный режим в энергосистеме может существовать как кратковременно, так и достаточно длительно [1]. Кратковременный неполнофазный режим в энергосистеме может возникнуть в следующих случаях:

- недовключение или неполное отключение всех трех фаз при неисправностях выключателей;
- пофазное отключение в цикле автоматического повторного включения;
- механическое повреждение линии (обрыв фазы).

Длительный неполнофазный режим может возникнуть в следующих случаях:

- работа двумя фазами в сети с глухозаземленными нейтралями при пофазном ремонте линии;
- работа двумя фазами в сети с глухозаземленными нейтралями при плавке гололеда.

Наиболее вероятной причиной возникновения подобного режима является отключение фазы ЛЭП в цикле ОАПВ. Поскольку выдержка времени ОАПВ имеет значительную величину [2], за это время может возникнуть АР, например, при внезапном отключении крупного генератора в приемной системе.

Неполнофазный асинхронный режим может возникнуть и при механическом повреждении линии. Теоретически возможен вариант перегорания одного провода ЛЭП в месте соединения строительных кусков провода. Соединение обычно выполняется на опоре между двумя натяжными гирляндами в свисающей петле. При плохом контактном соединении кусков и достаточной нагрузке место соединения может выгореть без перехода в короткое замыкание на опору (это возможно если разорванные части петли не приблизятся к опоре и если осталась в работе параллельная ЛЭП). Тогда напряжение между частями разорванной петли не будет велико и дуга погаснет.

Существует еще несколько вариантов возникновения асинхронного режима с несимметрией. Сюда можно отнести режимы пофазного ремонта линий. Достаточно редко применяемый в энергосистемах Сибири и Дальнего Востока режим плавки гололеда одной фазой и передаче мощности по оставшимся двум фазам также может стать причиной возникновения неполнофазного асинхронного хода [1,3].

2.2 Моделирование неполнофазного асинхронного хода

Из рассмотренных выше возможных причин возникновения неполнофазных режимов ясно, что, во всех случаях преобладает однократная продольная несимметрия вида «обрыв одной фазы». Также при механическом повреждении линии возможно возникновение режима, при котором в работе остается только одна фаза. Отключение двух фаз в сочетании с АПВ не нашло в практике применения из-за значительного уменьшения передаваемой по линии мощности. Поэтому вопрос об исследовании режимных параметров в неполнофазном асинхронном режиме при несимметрии вида «обрыв двух фаз» носит теоретический характер. Следует отметить, что в докладе не рассматриваются сложные виды несимметрии, поскольку возникновение таких режимов в сочетании с асинхронным ходом представляется событием весьма маловероятным.

Поскольку для работы алгоритмов АЛАР предлагается использовать параметры прямой последовательности, необходимо проанализировать изменения режимных параметров в условиях неполнофазного асинхронного хода в сравнении с симметричным АР. Для анализа была выбрана простейшая двухмашинная система (рис. 1), комплексная схема замещения которой представлена на рис. 2.

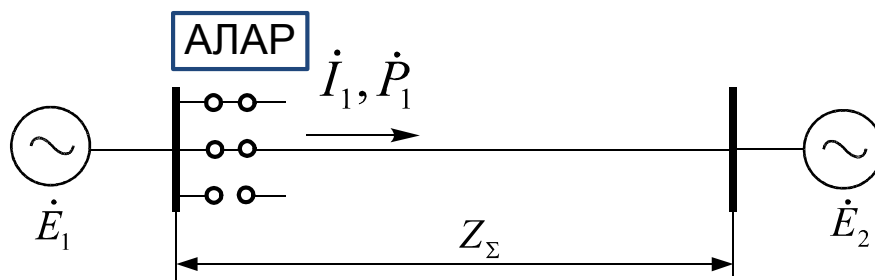


Рис. 1: Схема простейшей двухмашинной системы

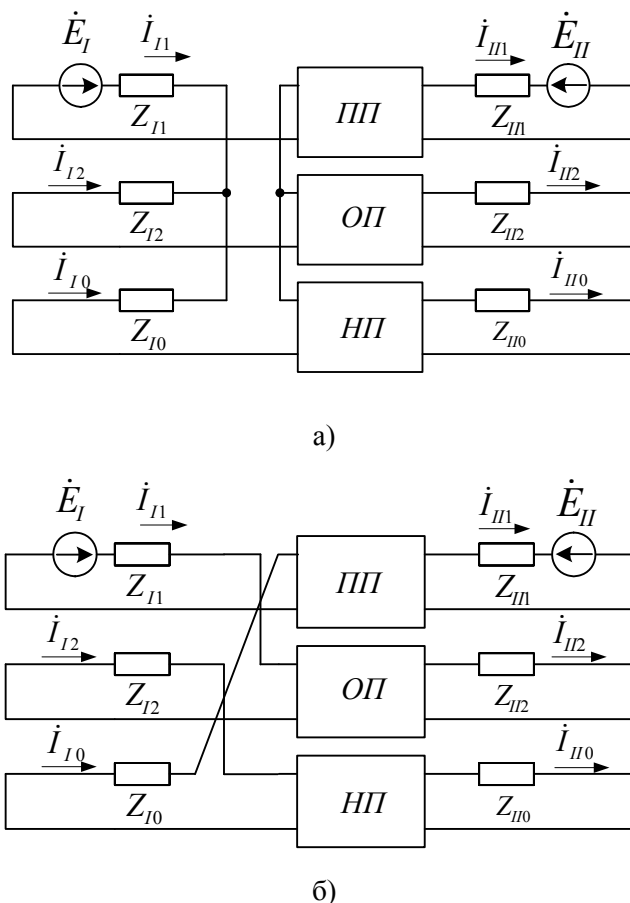


Рис. 2: Комплексная схема замещения для режима работы двумя фазами (а) и одной фазой (б)

Особое внимание при исследовании уделялось тем изменениям, которые происходят с годографом вектора сопротивления прямой последовательности при переходе в неполнофазный режим, необходимые для разработки мероприятий по обеспечению совместности функционирования автоматики в симметричных и несимметричных режимах. Рассмотрены особенности изменения сопротивления прямой последовательности при асинхронном ходе в случае неполнофазного режима на связях с параллельными линиями.

Анализ полученных выражений показал, что при несимметричном АР годограф вектора сопротивления \dot{Z}_1 может быть представлен семейством окружностей, радиусы (R) и удаленности от начала координат (ρ) которых зависят:

- от соотношения модулей ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 (k);
- от вида несимметрии, а именно от величины дополнительного сопротивления несимметричного повреждения $Z_{\Delta L}^{(n)}$.

При переходе из симметричного режима в несимметричный происходит искажение годографа вектора сопротивления прямой последовательности (рис.3), при этом изменяется величина (радиус) годографа R и положение годографа относительно начала координат ρ , а значит, изменяется и положение электрического центра качаний ЭЦК (рис.4). В таблице 1 представлены основные закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в различных режимах, а также величины тех изменений, которые происходят с годографами вектора сопротивления при переходе в соответствующий режим.

Режим	Параметры			
	Измеряемое сопротивление	Добавочное сопротивление	Радиус	Смещение
	\dot{Z}_1	$Z_{\Delta L}^{(n)}$	R	ρ
Симметричный	$-\dot{Z}_{11} + \frac{\dot{Z}_1}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	-	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot Z_1$	$\left(\frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{11}}{Z_1} \right) \cdot Z_1$
Работа двумя фазами	$-\dot{Z}_{11} + \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\Delta L}^{(1)}}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	$\frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_0}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0}$	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)})$	$\left(\frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{11}}{Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)}} \right) \times$ $\times (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(1)})$
Работа одной фазой	$-\dot{Z}_{11} + \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\Delta L}^{(2)}}{1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-j\delta}}$	$\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0$	$\frac{k}{k^2 - 1} \cdot (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)})$	$\left(\frac{k^2}{k^2 - 1} - \frac{Z_{11}}{Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)}} \right) \times$ $\times (Z_1 + Z_{\Delta L}^{(2)})$

Табл. 1: Закономерности изменения сопротивления прямой последовательности в различных режимах

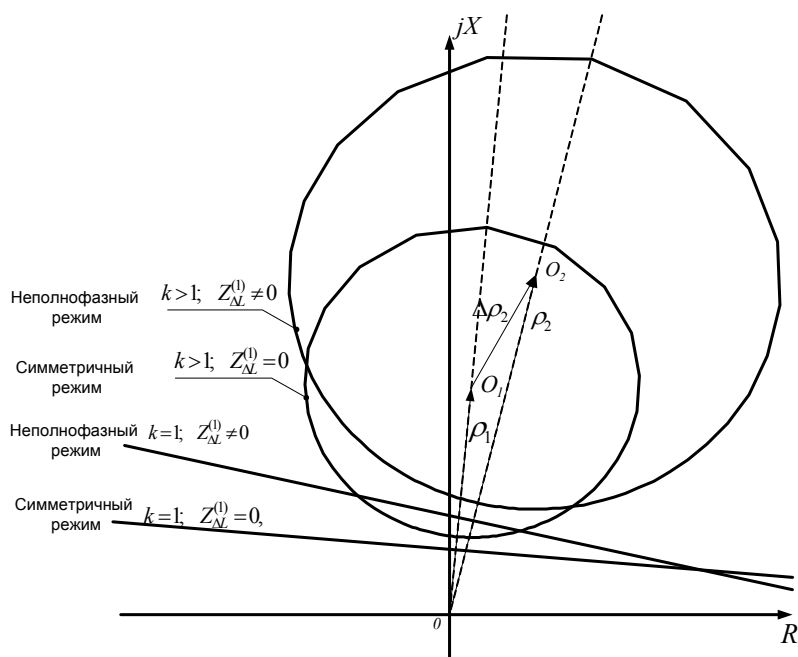


Рис. 3: Нодограф $Z_1 = f(\delta)$ при симметричном и несимметричном АР

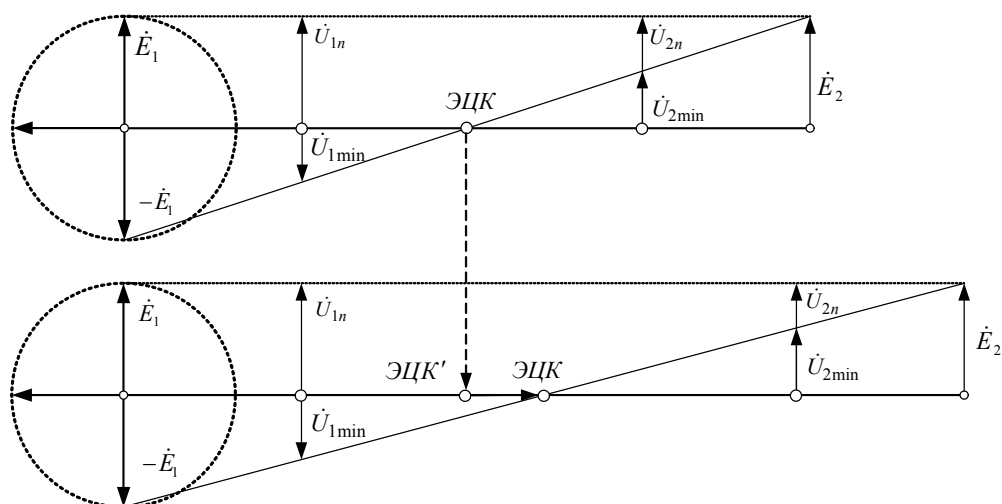


Рис. 4: Смещение электрического центра качаний в неполнофазном асинхронном режиме

2.3 Моделирование неполнофазного асинхронного хода в сложной многомашинной системе

Полученные закономерности дают лишь представление о возможности выявления АР в неполнофазных режимах. Четкое представление о возможности выявления АР в неполнофазных режимах можно получить лишь при исследовании сложной многомашинной схемы. В качестве схемы для более детального анализа закономерностей изменения сопротивления прямой последовательности в местах установки устройств АЛАР была выбрана объединенная энергосистема, включающая в себя каскад Таймырских ГЭС и Норильский энергетический комплекс.

Анализ асинхронных ходов в энергосистеме при работе одной из линий в неполнофазном режиме необходимо начинать с анализа неполнофазных режимов. Поскольку отключение двух фаз в сочетании с АПВ не нашло в России практического применения, рассматривался только один вид несимметричного повреждения – обрыв одной фазы.

Для этого в пакете ARM-TKZ были составлены расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, рассчитаны дополнительные сопротивления несимметричного повреждения рассматриваемых воздушных линий 220кВ для нормальных и ремонтных схем в условиях различного состава оборудования на ТЭЦ и ГЭС энергосистемы, а также для смежного участка. В пакете MUSTANG несимметричные режимы моделировались по принципу эквивалентности прямой последовательности, то есть в месте повреждения последовательно включалось добавочное сопротивление несимметричного повреждения.

Анализ полученных годографов сопротивления прямой последовательностей показал следующее:

- выбранные уставки АЛАР для симметричных режимов требуют корректировки;
- в неполнофазном режиме на поврежденной линии (на линии, где существует неполнофазный режим) годограф вектора сопротивления прямой последовательности смещается выше (ниже, при отношении модулей ЭДС $k < 1$), чем годограф сопротивления, полученный для симметричного режима при тех же условиях, а радиус годографа при этом увеличивается;
- годограф вектора сопротивления для неповрежденных линий при внутреннем АР расположен вблизи области между годографами, построенными в полной схеме и неполной схемах симметричного режима;
- электрический центр качаний имеет наибольшее удаление от места установки комплекта АЛАР в случае неполнофазного режима данной линии;
- наибольшее удаление ЭЦК имеет место при отключении параллельных линий и работе одной линией в неполнофазном режиме. Поэтому при внутреннем АР рассматриваемые режимы являются расчетными, а при внешнем не являются, поскольку в данном случае это является благоприятным фактором для отстройки от внешних АР;

- сопротивление ЭЦК $\dot{Z}_{ЭЦК}$ для поврежденных линий (в неполнофазном режиме) существенно больше сопротивление ЭЦК $\dot{Z}_{ЭЦК}$ для неповрежденных линий;
- для отстройки от внешнего АР при неполнофазном режиме расчетными режимами являются неполнофазные режимы на линиях своего сечения, за исключением той линии, где установлен комплект АЛАР;

На основании полученных годографов можно выделить три подхода к реализации универсального алгоритма АЛАР, работающего и в симметричных, и в неполнофазных режимах:

Первый подход заключается в том, что на основании заранее рассчитанных режимов – симметричных и несимметричных, определяются общие для этих режимов уставки.

Второй подход заключается в следующем: по факту перехода одного режима в другой, осуществляется смена групп уставок (для симметричных и несимметричных режимов), тем самым производится адаптация к неполнофазному режиму одной из линий.

Третий подход основан на том, что электрический центр качаний имеет наибольшее удаление от места установки комплекта АЛАР в случае неполнофазного режима данной линии. Поскольку в неполнофазном режиме для неповрежденных линий расчетные режимы не существенно отличаются от симметричных, то для них можно использовать группу уставок симметричных режимов. Для поврежденной линии необходимо корректировать уставки, в связи с чем, необходим дополнительный алгоритм выбора поврежденной линии (линии, работающей в неполнофазном режиме).

3 АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ ОСНОВНОГО УСТРОЙСТВА АЛАР К УСЛОВИЯМ НЕСИММЕТРИИ

В основе алгоритма лежит выявление факта перехода из одного режима в другой (из симметричного в несимметричный). Основными признаками несимметричного режима является появление параметров обратной и нулевой последовательностей. Появление только нулевой и отсутствие обратной последовательности возможно лишь при замыкании одной фазы на землю в сетях с изолированной нейтралью (с малым током замыкания на землю).

Таким образом, достаточно реализовать пусковой орган, реагирующий на появление тока \dot{I}_2 или напряжения \dot{U}_2 обратной последовательности. Для избежания ложной работы предусмотрен дополнительный алгоритм блокировки при обрывах в измерительных цепях (рис. 5).

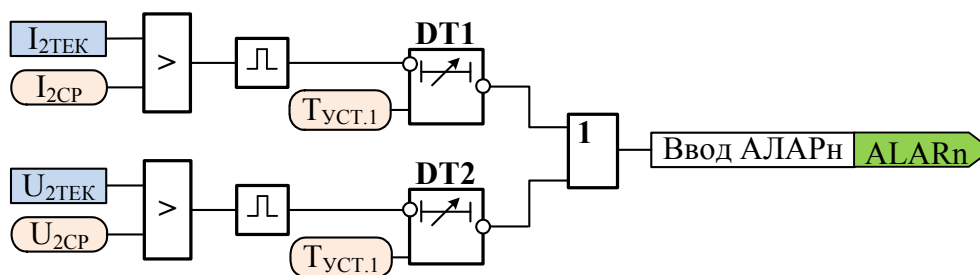


Рис. 5: Блок-схема алгоритма адаптации алгоритма АЛАР к неполнофазному режиму

Также необходимо учесть, что в неполнофазном (несимметричном) АР ток \dot{I}_2 и напряжение \dot{U}_2 обратной последовательности периодически изменяются, аналогично току прямой последовательности (рис.6).

Для исключения ложной работы и частых изменений групп уставок предлагается дополнительно ввести задержку на возврат органа тока и напряжения обратной последовательности. Задержка на возврат должна быть больше того времени, в течение которого отсутствуют условия для срабатывания пускового органа.

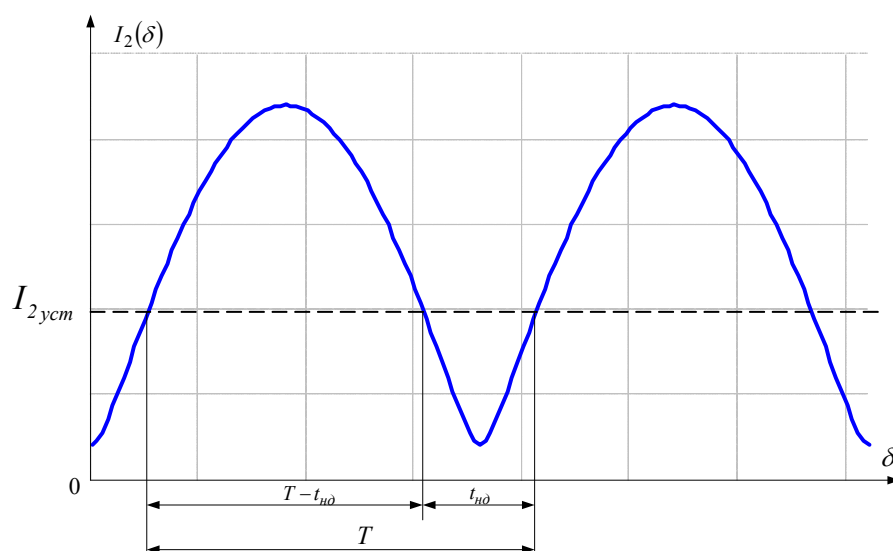


Рис. 6: Изменение тока обратной последовательности в асинхронном ходе и неполнофазном режиме

4 ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ АЛАР ДЛЯ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА

Разработанные принципы были положены в основу при создании алгоритмов адаптации АЛАР к неполнофазным режимам. Для проверки работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов осуществлена их реализация в виде программ, работа которых проверялась на технических средствах локальной противоаварийной автоматики, разработанных ЗАО "ИАЭС".

Испытания алгоритмов автоматики ликвидации асинхронных режимов и ее адаптации к неполнофазным режимам производились на электродинамической модели (ЭДМ) кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Для испытаний алгоритмов АЛАР на ЭДМ рассматривались две схемы, моделирующие электроэнергетическую систему. В качестве первой схемы была принята простейшая система генератор – трансформатор – одноцепная линия – шины бесконечной мощности; в качестве второй схемы была принята трехмашинная электроэнергетическая система, по своей топологии приближенная к энергосистеме Норильско-Таймырского энергетического комплекса (рис.7).

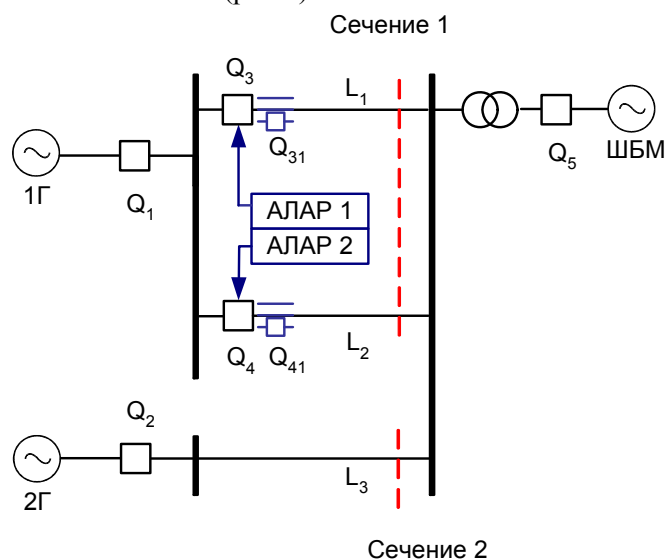


Рис. 7: Тестовая схема для испытания МП-АЛАР в неполнофазном асинхронном режиме

В ходе испытаний проводились следующие опыты:

- Проверка срабатывания АЛАР при асинхронном ходе с ЭЦК и неполнофазном режиме на контролируемом участке.
- Проверка срабатывания АЛАР при асинхронном ходе с ЭЦК на контролируемом участке, и при неполнофазном режиме на параллельной линии.
- Проверка несрабатывания АЛАР при асинхронном ходе с ЭЦК на смежном участке, а неполнофазном режиме на контролируемом участке.
- Проверка срабатывания АЛАР при ЭЦК в месте установки устройства.
- Проверка несрабатывания АЛАР в режиме синхронных качаний при неполнофазном режиме одной из линий.
- Проверка несрабатывания АЛАР при несимметричном КЗ.

В несимметричном режиме также проводились испытания, целью которых была проверка действия алгоритма, осуществляющего смену группы уставок при переходе из симметричного режима в неполнофазный и обратно.

В результате испытаний установлено, что система корректно работает как в симметричных режимах, так и при неполнофазном режиме одной из линий. Правильно работают первая и вторая ступени АЛАР при асинхронном режиме и обеспечена надежная отстройка от трехфазных КЗ и синхронных качаний.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные технические решения существенно расширяют функциональные возможности АЛАР. Разработанный алгоритм выявления асинхронных ходов, основанный на контроле сопротивления замера прямой последовательности, обеспечивает селективную работу АЛАР как в симметричных, так и в неполнофазных режимах. Принципы адаптации к неполнофазным и несимметричным режимам были использованы при создании устройства МП АЛАР разработки ЗАО "ИАЭС". Обоснованность полученных результатов работы подтверждает практика их успешного применения в устройствах АЛАР, установленных на различных подстанциях Сибири.

6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методические указания по применению неполнофазных режимов работы основного электрооборудования электроустановок 330-1150 кВ : РД 153-34.3-20.670-97: утв. РАО «ЕЭС России» 01.12.1997.
- [2] Беркович, М. А. Основы автоматики энергосистем / М. А. Беркович, А. Н. Комаров, В. А. Семенов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 432 с.
- [3] Методические указания по плавке гололеда переменным током : МУ 34-70-027-82 / Мин-во энергетики и электрификации СССР. – М. : Изд-во СПО Союзтехэнерго, 1983. – Ч. 1. – 64 с.