

На правах рукописи



Елкин Сергей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ
АСИНХРОННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВ
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

2.4.3 – Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре релейной защиты и автоматизации энергосистем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Климова Татьяна Георгиевна**
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры релейной защиты и
автоматизации энергосистем ФГБОУ ВО
«НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Сацук Евгений Иванович**
доктор технических наук, начальник службы
внедрения противоаварийной и режимной
автоматики АО «СО ЕЭС»

Иванов Игорь Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрических систем» ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР»)

Защита состоится «13» января 2023 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МЭИ.119 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, ауд. Г-200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
_____ к.т.н., доцент



Монаков Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в электроэнергетической системе (ЭЭС) существуют отдельные участки с высокой вероятностью возникновения асинхронных режимов (АР). Возникновение АР приводит к возможности повреждения первичного оборудования станций. Для выявления АР применяется автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР). Существующие алгоритмы устройств АЛАР в ряде случаев не обеспечивают селективное выявление и ликвидацию АР. Указанное справедливо для сложных схем контролируемых участков сети, включающих в себя ответвления с отборами мощности. В таких схемах топология сети может изменяться в процессе эксплуатации, что приводит к деактуализации выбранных уставок алгоритма АЛАР. Указанное может стать причиной некорректной работы противоаварийной автоматики (ПА).

Это приводит к необходимости дальнейшего развития устройств выявления АР. В соответствии с этим наиболее перспективным представляется применение алгоритмов АЛАР, использующих информацию о параметрах электроэнергетического режима работы ЭЭС в нескольких точках. Кроме того, рассматриваемая информация может быть использована для учёта возможных изменений параметров ЭЭС в рамках заложенной модели сети в существующих алгоритмах АЛАР. Для контроля параметров режима работы ЭЭС в нескольких точках могут быть использованы устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ), которые в настоящее время находят широкое применение на территории Российской Федерации в рамках системы мониторинга переходных режимов (СМНР). УСВИ содержат необходимую информацию о параметрах электроэнергетического режима работы ЭЭС в нескольких точках, необходимой для работы предлагаемого алгоритма АЛАР.

В данных условиях совершенствование методов выявления АР работы ЭЭС с применением синхронизированных векторных измерений (СВИ) оказывает большое влияние на повышение эффективности использования АЛАР и представляет собой значимую и научно-техническую задачу, решение которой рассматривается в рамках диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в исследование выявления АР работы ЭЭС, а также применения СВИ, внесли советские и российские учёные: В.Г. Наровлянский, Н.И. Овчаренко, Я.Е. Гоник, Е.С. Иглицкий, Д.Р. Любарский, Н.А. Дони, Г.В. Меркурьев, Г.А. Мелешкин, В.А. Веников, Ю.Е. Гуревич, А.А. Горев, А.В.

Мокеев, Ф.Л. Коган, М.А. Беркович, В.А. Семенов, С.А. Совалов, А.А. Хачатуров, С.А. Лебедев, П.С. Жданов, А.Б. Барзам, И.З. Глускин, Б.И. Иофьев и многие другие. Из зарубежных следует отметить работы учёных: *R.H. Park, P. Kundur, P.M. Anderson, A.G. Phadke, Liwei Wang, Y.R. Rodrigues* и другие.

В ряде зарубежных и отечественных публикаций отражены результаты работ по применению более совершенных методов выявления АР работы ЭЭС. Один из подходов предполагает применение непосредственных измерений электрических параметров с применением СВИ для нужд ПА.

Несмотря на большое количество работ, посвященных совершенствованию методов выявления АР, данная задача остается актуальной, а некоторые вопросы и проблемы требуют дальнейших исследований.

Цель работы

Совершенствование комплекса ПА в части выявления АР работы ЭЭС на основе разработки и исследования предложенных автором методов, использующих СВИ.

Задачи исследования

1. Выделить перспективные направления совершенствования комплекса ПА в части выявления АР работы ЭЭС при наличии данных от УСВИ.
2. Разработать новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ.
3. Разработать новую структуру совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
4. Разработать новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд противоаварийной автоматики в части выявления АР работы ЭЭС.
5. Разработать гибридный комплекс АЛАР на основе совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.

Объектом исследования являются электроэнергетическая система, межсистемные связи в энергосистемах, на которых возможно возникновение асинхронного режима, а также устройства локальной ПА выявления и ликвидации асинхронного режима работы энергосистемы.

Предметом исследования являются методы выявления асинхронных режимов работы ЭЭС.

Методология и методы исследования

Теоретические основы исследования базируются на фундаментальных положениях теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, теории релейной защиты, теории автоматического регулирования.

При решении поставленных задач использованы методы математического анализа, математический аппарат теоретических основ электротехники, методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ.
- 2) Структура совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
- 3) Новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд ПА в части выявления АР работы ЭЭС.

Научная новизна результатов исследования

- 1) Разработан новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ.
- 2) Разработана структура совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
- 3) Разработан новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд ПА в части выявления АР работы ЭЭС.

Теоретическая значимость работы

- 1) Разработан новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ.
- 2) Разработана структура совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
- 3) Разработан новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд ПА в части выявления АР работы ЭЭС.

Практическая значимость работы

- 1) Разработан гибридный комплекс АЛАР, предназначенный для селективного выявления и ликвидации асинхронного режима в рамках контролируемого участка.
- 2) Разработанные методы выявления асинхронного режима работы ЭЭС внедрены в производственную деятельность компании ООО «Ти Би Энерджи» и учитываются при разработке проектных решений.

Степень достоверности результатов исследования

Степень достоверности и обоснованности результатов исследования определяется использованием традиционных и многократно проверенных методов математического описания параметров режима и характеристик элементов ЭЭС; использованием верифицированных моделей частей ЭЭС;

критическим сопоставлением результатов диссертации с данными, полученными другими методами по теме диссертации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Представленные в диссертационной работе научные положения соответствуют области исследований специальности 2.4.3 «Электроэнергетика» по следующим пунктам:

– п. 16 *«Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»*: реализация гибридного комплекса АЛАР, предназначенного для селективного выявления и ликвидации асинхронного режима в рамках контролируемого участка.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: научно-техническая конференция молодых специалистов «РЕЛАВЭКСПО-2019», II, III, IV международные молодёжные научно-технические конференции IEEE «Релейная защита и автоматика» в 2019, 2020, 2021 годах, а также на научных семинарах кафедры «Релейной защиты и автоматизации энергосистем» «НИУ «МЭИ».

Публикации

Основные материалы диссертации отражены в пяти печатных работах, включая две статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК, а также три статьи, проиндексированные в международной базе «SCOPUS».

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «РЗиАЭ» «НИУ «МЭИ» за консультации и замечания по отдельным аспектам диссертационной работы и лично к.т.н. Колобродову Е.Н., к.т.н. Арцишевскому Я.Н. и к.т.н. Кузнецову О.Н.

Структура диссертации

Диссертация содержит: введение, четыре главы, заключение, список литературы, включающий 90 наименований, и 3 приложения. Общий объём работы составляет 147 страниц (включая приложения на 38 страницах). Диссертация содержит 77 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко изложено состояние проблемы, сформулированы цель и задачи

исследования. Отмечен вклад известных ученых и специалистов научных, учебных и проектных организаций в исследовании вопросов, связанных с выявлением и ликвидацией асинхронных режимов.

В первой главе рассмотрены теоретические основы возникновения и развития асинхронного режима работы энергосистемы. Обозначены его отличительные признаки, применяющиеся для выявления и ликвидации асинхронных режимов в рамках существующих устройств АЛАР.

Приведены результаты оценки работы имеющихся устройств АЛАР, применяемых на территории РФ. Обозначены достоинства и недостатки каждого из обозначенных устройств. Общим, существенным недостатком применяемых локальных устройств АЛАР является наличие вероятности некорректной работы алгоритма по причине косвенного расчёта вектора напряжения с противоположной стороны контролируемого участка на основе заложенной в устройства модели сети. В случае появления отличий между актуальной топологией ЭЭС и моделью сети в устройстве АЛАР возникает погрешность в расчёте указанного вектора.

Рассмотрены основные понятия и обобщенная структура применения СВИ в рамках СМНР.

Предложено использование векторных измерений с УСВИ для нужд ПА с целью выявления АР работы ЭЭС посредством прямого измерения угла передачи между векторами напряжения по концам контролируемого участка сети.

Выводы по первой главе:

1) В настоящее время ликвидация АР выполняется устройствами АЛАР, использующими алгоритм косвенного измерения угла между векторами напряжений.

2) Для решения рассмотренных проблем алгоритмов АЛАР необходимо увеличение объема используемой автоматикой информации, включающей массивы данных о параметрах ЭЭС в различных точках.

3) Применение данных СВИ представляется перспективным способом совершенствования алгоритма АЛАР.

Во второй главе рассмотрена возможность применения СВИ с УСВИ для нужд ПА в части выявления и ликвидации асинхронного режима. На рисунке 1 приведен вариант установки УСВИ для фиксации измерений векторов напряжения с целью выявления АР в рамках контролируемых участков ЭЭС.

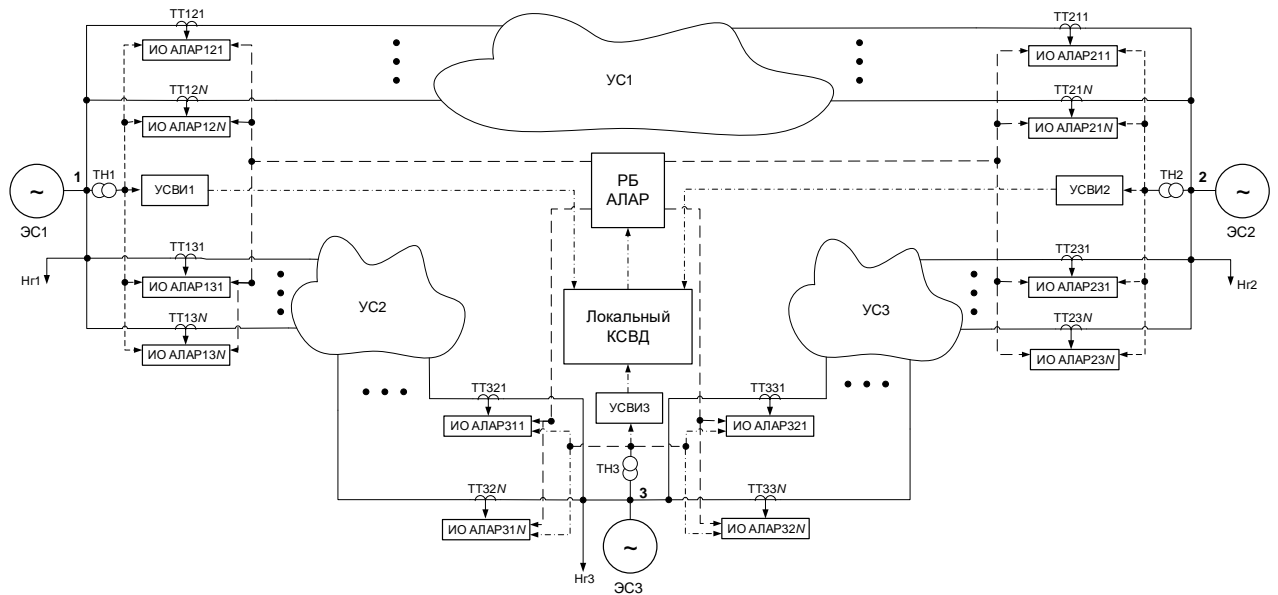


Рисунок 1 – Вариант установки УСВИ в контролируемых узлах

Предложено использование расчётного блока РБ АЛАР, выполняющего расчёт углов δ в контролируемых сечениях на основании полученных данных о замерах векторов напряжения в точках подключения ЭС1 – ЭС3. При этом подразумевается, что РБ АЛАР – это дополнительный программный модуль в составе концентратора синхронизированных векторных данных (КСВД), который осуществляет расчёт углов δ в рамках участков сети УС1–УС3 и формирование сигналов фиксации АР в контролируемых сечениях. Формируемые сигналы направлены на выявление АР с учётом знака скольжения на основании полученных от КСВД данных.

На основании полученных данных о векторах напряжения с УСВИ1–УСВИЗ РБ АЛАР выполняет расчёт угла δ для каждого из контролируемых участков сети (углы $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ для участков сети УС1, УС2, УС3 соответственно). С учётом того, что АР является симметричным режимом, в расчёте углов $\delta_1 - \delta_3$ предлагается использовать векторы напряжения прямой последовательности

$$\delta_1 = \arg(U_{11}) - \arg(U_{12}), \quad (1)$$

$$\delta_2 = \arg(U_{11}) - \arg(U_{13}), \quad (2)$$

$$\delta_3 = \arg(U_{12}) - \arg(U_{13}), \quad (3)$$

где $\underline{U}_{11}, \underline{U}_{12}, \underline{U}_{13}$ – комплексные значения напряжения прямой последовательности со стороны установки УСВИ1, УСВИ2, УСВИ3 соответственно.

По факту проворота в РБ АЛАР осуществляется формирование сигнала фиксации АР. Данные сигналы по ВЧ-каналу или волоконно-оптической линии

связи (ВОЛС) передаются на энергообъекты, между которыми зафиксирован АР. В результате, на шинах ПС, имеющих связи с ЭС1 – ЭС3, по каналу связи передаётся сигнал, указывающий на факт возникновения асинхронного режима в контролируемом сечении.

Для подтверждения наличия АР на отходящем от ПС присоединении предусмотрены исполнительные органы АЛАР (на рисунке 1 ИО АЛАРН, где N – порядковый номер), устанавливаемые на каждое присоединение, входящее в сечение. ИО АЛАР представляет собой орган по сопротивлению прямой последовательности, характеристика срабатывания которого приведена на рисунке 2.

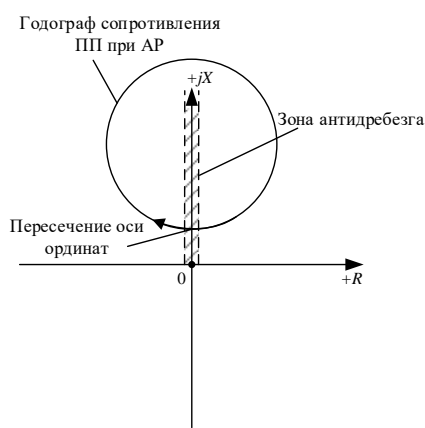


Рисунок 2 – Характеристика срабатывания ИО АЛАР и годограф сопротивления прямой последовательности при АР

Основной функцией ИО АЛАР является подтверждение возникновения АР по факту пересечения годографом сопротивления оси ординат в первом и втором квадрантах. Для обеспечения надежного срабатывания органа предусмотрена зона антидребезга. По факту фиксации пересечения оси ординат сигнал срабатывания ИО АЛАР будет удерживаться до момента выхода годографа сопротивления из рассматриваемой зоны.

Рассматриваемый метод выявления АР с применением алгоритмов АЛАР на прямых измерениях угла передачи (АЛАРп) не содержит задаваемых уставок, необходимых для корректной работы алгоритмов. Кроме того, применение рассматриваемых алгоритмов позволяет однозначно задать границы контролируемого участка сети, в рамках которого обеспечивается выявление и ликвидация АР посредством корректной установки УСВИ.

Проанализированы требования к ликвидации асинхронного режима работы. Обозначены проблемы, возникновение которых приводит к

некорректному выявлению АР предлагаемым методом, и приведены предложения по их решению:

1) *Задержка в приеме данных с УСВИ с противоположного конца контролируемого сечения, значение которой обуславливает минимальную длительность АР, которую способен зафиксировать АЛАР на прямых измерениях угла δ .* С учётом требования фиксации асинхронных режимов длительностью от 0,2 с до 10 с необходимо учитывать указанные задержки при приёме значений вектора напряжения с противоположного конца контролируемого участка.

В результате проведённой оценки максимально возможной задержки в передаче данных от УСВИ в КСВД установлена предельная длина контролируемого сечения, которая может достигать порядка 500-750 км с учётом использования оптоволоконного кабеля в качестве КС и задержек сетевого оборудования порядка 80 мс.

2) *Возникновение ЭЦК или КЗ вблизи установки УСВИ и алгоритма АЛАР на прямых измерениях угла δ .* В точке ЭЦК значение напряжения снижается практически до нулевых значений.

Возникновение ЭЦК вблизи установки УСВИ и алгоритма АЛАРп приводит к формированию большой погрешности при расчёте угла δ в связи с отсутствием достоверных данных об одном из двух векторов напряжения. Как следствие, указанная погрешность является причиной некорректного действия алгоритма АЛАРп.

Указанное не позволяет гарантировать корректное вычисление угла δ в рамках РБ АЛАР в пределах нормируемой погрешности, что может привести к ложной работе рассматриваемого алгоритма.

Для обеспечения корректной работы алгоритма АЛАРп в рассматриваемых режимах предлагается контролировать возникновение циклов АР по двум последовательным условиям для положительного (отрицательного) знака скольжения (см. рисунок 3):

а) по условию превышения (снижения) углом δ значения $\delta_1(\delta_2)$, гарантирующего дальнейший переход частей ЭЭС в асинхронный режим работы, с контролем монотонного нарастания (убывания) угла δ ;

б) по условию превышения (снижения) углом δ значения $\delta_2(\delta_1)$, гарантирующего наличие факта проворота одной части ЭЭС относительно другой, с контролем монотонного нарастания (убывания) угла δ .

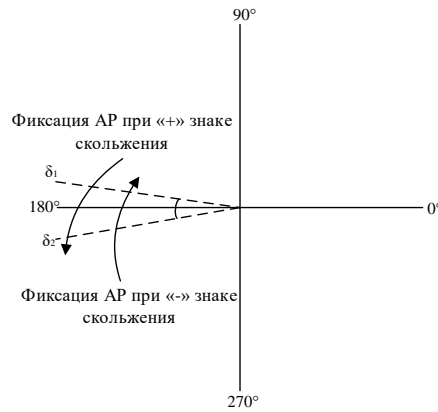


Рисунок 3 – Фиксация АР по условиям а) и б) изменения угла δ в зависимости от знака скольжения

Последовательное выполнение условий а) и б) в течение времени от 0,2 с до 10 с от момента выполнения одного из условий а) свидетельствует о формировании АР в рамках контролируемого участка ЭЭС с учётом знака скольжения по углу. При этом, при значениях угла δ_1 и δ_2 значения модулей векторов напряжения на концах контролируемого участка сети должно быть достаточным, чтобы оно находилось в нормированном диапазоне измерений УСВИ.

В результате проведенной оценки минимальных уровней напряжения, измеряемых УСВИ с нормированной погрешностью, обоснованы и рассчитаны значения углов δ_1 и δ_2 , равные 160° и 200° соответственно.

3) *Повреждение канала связи (КС) между УСВИ и/или КСВД, а также выход из строя одного или нескольких устройств УСВИ, КСВД.* Наличие неисправности КС, КСВД, или одного из УСВИ, расположенных в концевых точках контролируемого участка сети, приводит к отказу алгоритма АЛАРп в связи с невозможностью получения достоверных измерений векторов напряжения с удаленного конца для расчёта угла δ .

При этом, согласно ГОСТ Р 55105-2019 и ГОСТ Р 59371-2021, алгоритм АЛАР должен обеспечивать селективное выявление и ликвидацию АР независимо от состояния КС. Поэтому, в случае неисправности рассматриваемого оборудования и блокировки алгоритма АЛАРп требуется дополнительный алгоритм АЛАР. Предлагается в этом случае использовать один из существующих алгоритмов АЛАР на косвенных измерениях угла (АЛАРк), определяющий факт наличия или отсутствия АР в контролируемом сечении посредством косвенного контроля угла δ . Однако для АЛАРк необходимо решение проблемы неселективной работы алгоритма, отмеченной в рамках

главы 1 диссертации. Для этого предлагается использовать наборы данных распределенных замеров о нормальных нагрузочных режимах работы ЭЭС, полученных от УСВИ до обрыва КС, с целью актуализации параметров алгоритма АЛАРк и обеспечения его корректной работы.

Для обеспечения гарантированной работы комплекса ПА в случае неисправности КС отмечена необходимость комбинирования алгоритмов АЛАР. Предложена структура взаимодействия АЛАРп и АЛАРк в случае наличия или отсутствия повреждения КС или одного из УСВИ или КСВД. Указанная структура представлена функциональной схемой, изображённой на рисунке 4.

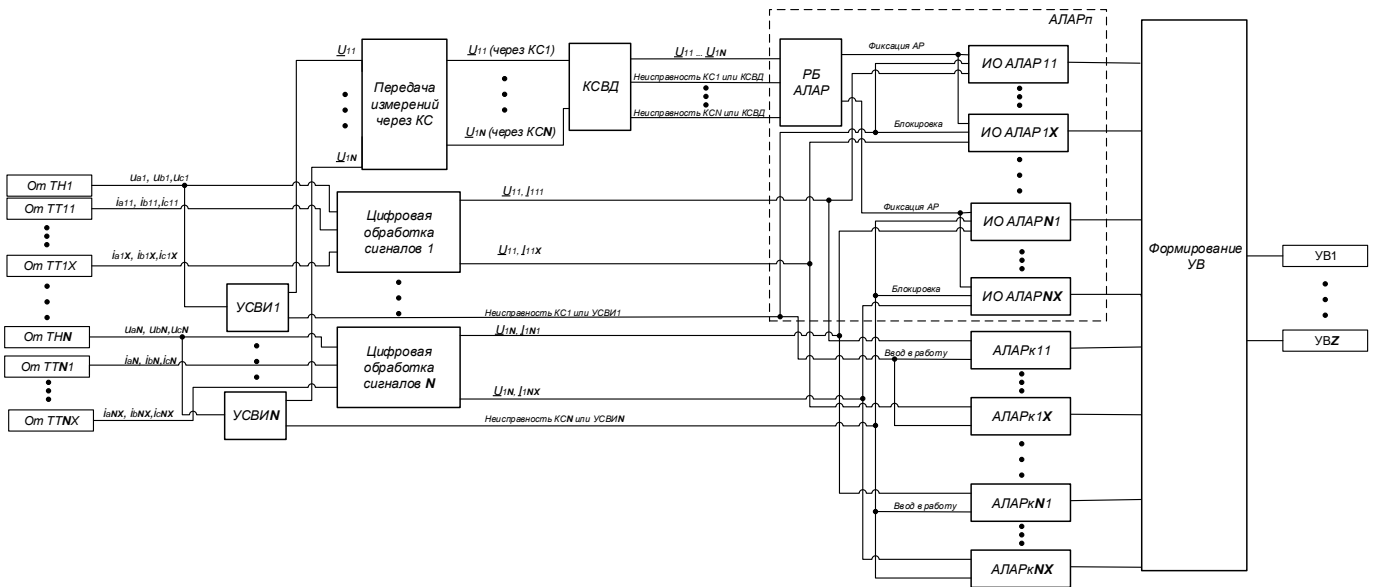


Рисунок 4 – Функциональная схема взаимодействия АЛАРп и АЛАРк

При отсутствии повреждений КС между УСВИ и КСВД или самих УСВИ или КСВД формирование управляющих воздействий осуществляется алгоритмом АЛАРп, производимым определение углов $\delta_1 - \delta_N$ по полученным СВИ в контролируемых точках и формирование управляющих воздействий (УВ), направленных на ликвидацию АР.

В случае возникновения неисправности КС между УСВИ и КСВД или самих УСВИ или КСВД приём и передача достоверных электрических параметров ЭЭС становятся невозможными. В связи с этим, по факту выявления неисправности производится переключение формирования УВ с алгоритма АЛАРп на алгоритм АЛАРк.

С учётом необходимости использования существующих алгоритмов АЛАРк для устранения проблемы некорректной работы рассматриваемых алгоритмов обозначена необходимость разработки метода определения

предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети.

Выводы по второй главе:

- 1) Разработан новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ.
- 2) Определены физические критерии допустимости применения разработанного метода с точки зрения временных задержек при передаче данных от УСВИ в КСВД.
- 3) Предложены технические решения, исключающие ложную работу разработанного метода при близком ЭЦК или симметричном КЗ.
- 4) Предложено совместное использование АЛАРп и АЛАРк для обеспечения ликвидации АР при фиксации неисправности КС, УСВИ или КСВД.
- 5) Разработана структура совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
- 6) Отмечена необходимость разработки метода определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд ПА в условиях нарушения устойчивости ЭЭС.

В третьей главе предложен метод оптимизации настройки алгоритма АЛАР на косвенных измерениях с использованием полученных от УСВИ данных о двухсторонних замерах параметров нормальных режимов работы ЭЭС.

В алгоритмах АЛАРк закладывается определенная модель участка сети, на основании которой производится расчёт вектора напряжения с противоположного конца. Большая часть таких моделей сводится к схеме замещения, представленной симметричным Π -образным четырёхполюсником с основными параметрами сопротивлений \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 (см рисунок 5).

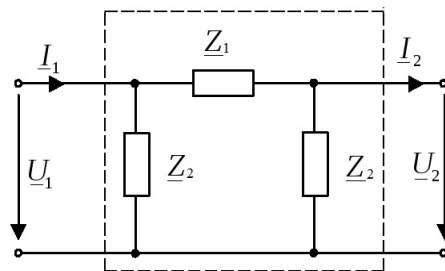


Рисунок 5 – Схема замещения рассматриваемого сечения, представленная симметричным Π -образным четырёхполюсником

Значение сопротивления \underline{Z}_1 характеризует сопротивление между двумя контролируемыми точками сети. Сопротивление \underline{Z}_2 определяет условную величину отбора мощности на рассматриваемом участке.

С учётом обилия различных режимов работы, наблюдаемых в рамках контролируемого участка сети, параметры \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 будут варьироваться в некотором диапазоне. С целью обеспечения гарантированной корректной работы алгоритма АЛАР во всех ранее наблюдаемых нормальных режимах работы ЭЭС предлагается определение предельных значений рассматриваемых параметров схемы замещения – минимальных и максимальных значений \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 .

Параметры $\underline{Z}_{1\min}$ и $\underline{Z}_{2\min}$ определяют границы минимальной зоны работы алгоритма АЛАРк, в рамках которой осуществляется выявление АР при условии нахождения ЭЦК в рассматриваемой зоне действия алгоритма. Рассматриваемая зона, с учётом обилия различных режимов работы, может быть меньше, чем контролируемый участок сети. Параметры $\underline{Z}_{1\max}$ и $\underline{Z}_{2\max}$ определяют границы максимальной зоны работы алгоритма АЛАРк, в пределах которой осуществляется выявление АР в рамках всего контролируемого сечения, но при этом существует вероятность расширения зоны действия алгоритма по приведенным параметрам в смежные участки. Указанная вероятность определяется количеством нормальных режимов работы ЭЭС, приводящих к излишнему расширению зоны действия локальной ПА. Пример образующихся зон действия алгоритма АЛАР приведен на рисунке 6.

Минимальная зона всегда гарантированно действует в рамках контролируемого участка сети, поэтому может формировать селективные управляющие воздействия на первом цикле асинхронного режима. В зону действия максимальной зоны в зависимости от режима могут входить смежные участки. В связи с этим действие максимальной зоны необходимо согласовывать с работой устройств АЛАР, установленных на смежных участках.

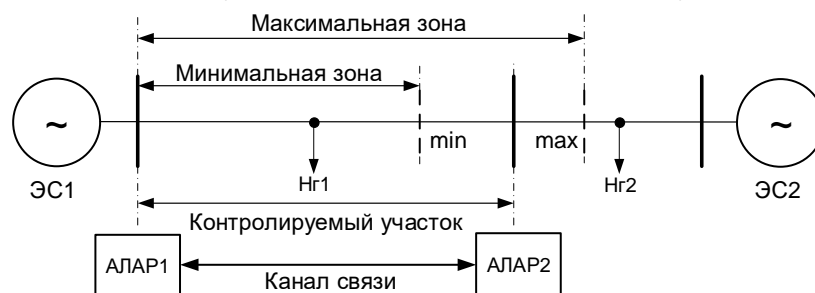


Рисунок 6 – Максимальная и минимальная зоны работы алгоритма устройства АЛАРк

В рамках контролируемого сечения, представленного сложной разветвленной схемой, возможно наличие большого количества различных нормальных режимов работы ЭЭС. Указанное приводит к недопустимому занижению минимальной зоны и расширению максимальной зоны действия алгоритма АЛАР. В этом случае предлагается выделение нескольких

минимальных и максимальных зон работы алгоритма устройства АЛАР на косвенных измерениях, обеспечивающих надёжную работу автоматики в рамках контролируемого участка. Каждая из выделяемых пар минимальной и максимальной зон соответствует определенной группе режимов работы ЭЭС, существование которых возможно в рассматриваемом сечении.

Для выделения пар зон предлагается определить четыре области (наборы) режимных параметров \underline{U}_1 , \underline{I}_1 , \underline{U}_2 , \underline{I}_2 . Количество предлагаемых наборов параметров определено возможным характером перетоков активной (Р) и реактивной (Q) мощности на контролируемом участке сети (см. рисунок 6): переток Р и Q от шин (I-й квадрант); переток Р в шины и Q от шин (II-й квадрант); переток Р и Q в шины (III-й квадрант); переток Р от шин и Q в шины (IV-й квадрант). При этом, направление вектора напряжения \underline{U}_1 принято сонаправленным действительной оси.

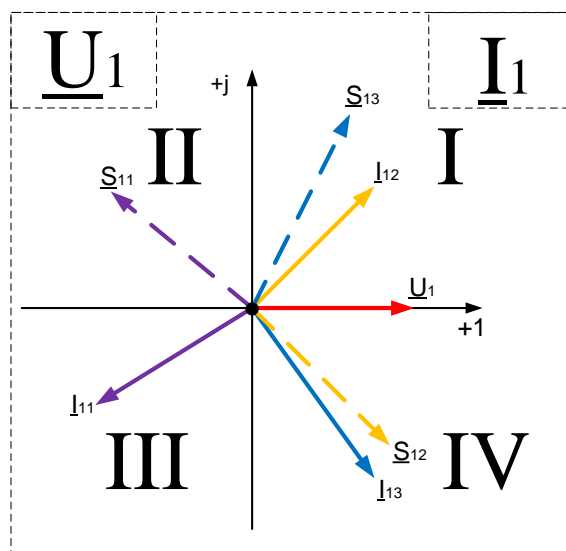


Рисунок 7 – Пример определения четырёх областей для режимных параметров $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ на комплексной плоскости

Далее для каждого зафиксированного набора значений параметров $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ фиксируются возможные вариации значений параметров $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ в соответствии с определёнными областями. Для каждой зафиксированной вариации значений производится расчёт минимальных и максимальных параметров сопротивлений \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 , определяющих минимальную и максимальную зоны действия алгоритма устройства АЛАРк в рамках конкретного выделенного набора режимных параметров. Указанное позволит обеспечить гарантированную работу рассматриваемого алгоритма в различных возможных наблюдаемых режимах работы ЭЭС на контролируемом участке сети.

В рамках третьей главы приведена методика расчета минимальных и максимальных значений сопротивлений. Критерием расчёта минимальных и максимальных значений \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 может быть сравнение расчетного значения угла вектора напряжения \underline{U}_2 , полученного с применением модели и векторов \underline{U}_1 и \underline{I}_1 , с измеренным значением угла вектора \underline{U}_2 .

Расчёт значений параметров эквивалентного четырёхполюсника (\underline{Z}_{1min} , \underline{Z}_{2min} , \underline{Z}_{1max} , \underline{Z}_{2max}) производится за счёт известных данных о нормальных режимах работы ЭЭС в рамках контролируемого участка сети, полученных с УСВИ.

В зависимости от количества накопленной информации о режимах в рамках контролируемого участка сети предлагаемый метод актуализации параметров схемы замещения алгоритма АЛАРк может быть использован следующим образом:

- на первом этапе, когда выполняется сбор и анализ массивов данных, полученных от УСВИ, предлагаемый метод может быть использован в качестве некой экспертной системы, задача которой сводится к выдаче рекомендаций персоналу в части настройки параметров устройства АЛАР на косвенных измерениях;

- на втором этапе, когда накоплено значительное количество информации о большинстве возможных нормальных режимов работы ЭЭС в рамках контролируемого сечения, предлагаемый метод может быть использован как элемент верхнего уровня автоматизированного управления, который на основании имеющейся информации о параметрах режимов работы производит непосредственный расчёт параметров схемы замещения, заложенной в алгоритм АЛАР.

Выводы по третьей главе:

- 1) Разработан новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд противоаварийной автоматики в части выявления АР работы ЭЭС.

- 2) Предложен новый метод анализа больших массивов данных замеров, полученных с УСВИ, для нужд верификации и проверки уставок АЛАР с возможностью разработки автоматизированной системы оптимизации настройки алгоритма АЛАРк.

В четвёртой главе приведена реализация комплекса АЛАР, включающего в себя алгоритмы АЛАРп и блока расчёта значений эквивалентных параметров схемы замещения для АЛАРк. Рассмотрена структура предлагаемых алгоритмов с выделением в рамках каждого из них основных функциональных блоков.

В рамках обозначенной главы приведена верифицированная модель участка ЭЭС, на которой выполнялась проверка корректной работы разработанного комплекса АЛАР в различных режимах работы. В качестве тестовой схемы принята схема, изображенная на рисунке 8. Достоверность измерений модели подтверждена сравнением значений электрических параметров в контрольных точках схемы, полученных по результатам предварительного расчёта по известным формулам ТОЭ, и аналогичных параметров, измеряемых в модели в указанных точках.

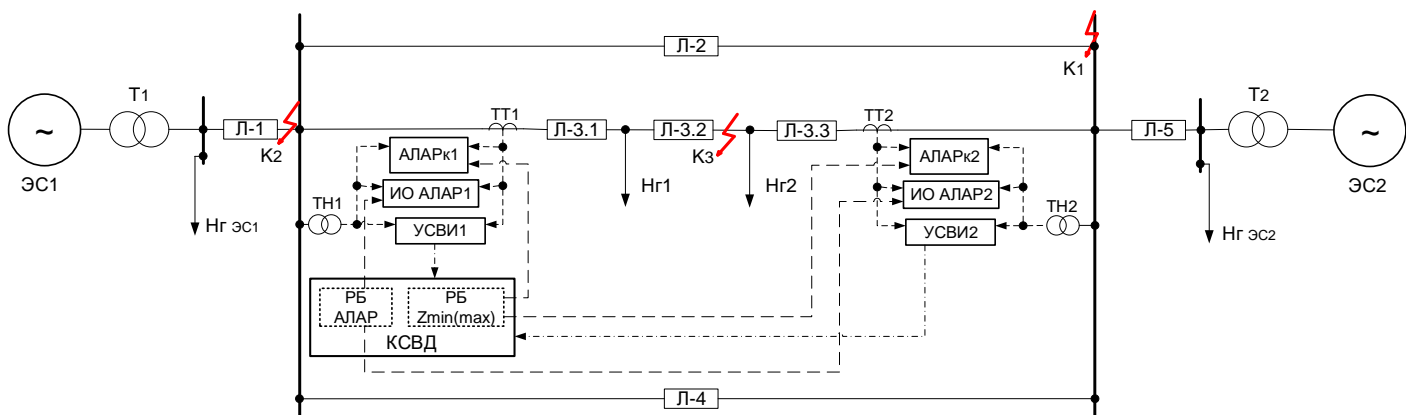


Рисунок 8 – Тестовая модель ЭЭС для проверки гибридного комплекса АЛАР в части выявления и ликвидации АР

Контролируемый участок представлен каскадом последовательно соединенных воздушных линий «Л-3.1» – «Л-3.3» с промежуточными отборами мощности «Нг1» и «Нг2» (см. рисунок 8). Контроль срабатывания алгоритмов АЛАР производился для устройств РБ АЛАР, ИО АЛАР1(2) и АЛАРк1(2).

В рамках испытаний была проверена работа алгоритмов АЛАР при внутреннем и внешнем АР относительно воздушных линий «Л-3.1» – «Л-3.3», с учётом различного направления перетоков активной мощности и состояния КС между УСВИ и КСВД.

По результатам испытаний сделан вывод о корректной и ожидаемой работе комплекса АЛАР в различных режимах работы ЭЭС.

Выводы по четвёртой главе:

- 1) Разработан гибридный комплекс АЛАР на основе совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС.
- 2) Проведены испытания разработанного комплекса АЛАР на верифицированной модели энергосистемы. По результатам испытаний сделан вывод о возможном применении комплекса АЛАР в качестве устройства ПА выявления и ликвидации асинхронного режима работы ЭЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время ликвидация АР выполняется устройствами АЛАР, использующими алгоритм косвенного измерения угла между векторами напряжения.

2. Для решения рассмотренных проблем алгоритмов АЛАРк необходимо увеличение объема используемой автоматикой информации, включающей массивы данных о параметрах ЭЭС в различных точках.

3. Разработан новый метод выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ, обеспечивающий селективное выявление АР в рамках контролируемого участка сети.

4. Установлена некорректная работа предлагаемого метода при наличии неисправности КС, КСВД, или одного из УСВИ, расположенных в концевых точках контролируемого участка сети. Предложено совместное использование АЛАРп и АЛАРк для обеспечения ликвидации АР при фиксации неисправности КС, УСВИ или КСВД.

5. Разработана структура совместного использования нового и традиционных методов выявления АР работы ЭЭС, обеспечивающая корректную работу комплекса ПА вне зависимости от состояния КС в соответствии с ГОСТ Р 55105-2019 и ГОСТ Р 59371-2021.

6. Разработан новый метод определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для нужд противоаварийной автоматики в части выявления АР работы ЭЭС.

7. Предложен новый метод анализа больших массивов данных замеров, полученных с УСВИ, для нужд верификации и проверки уставок АЛАР с возможностью разработки автоматизированной системы оптимизации настройки алгоритма АЛАРк.

8. Разработан гибридный комплекс АЛАР на основе совместного использования нового и традиционных методов ликвидации нарушения устойчивости. Подтверждена корректность тестовой модели участка ЭЭС, а также работоспособность предложенного технического решения на основе проведённых испытаний.

9. Таким образом, в работе достигнута цель исследования и решены поставленные задачи. Полученные результаты подтверждают корректность предложенных методов выявления АР работы ЭЭС и оптимизации процесса параметров настройки существующих устройств АЛАР, тем самым, обеспечивая надёжную и селективную работу комплекса ПА.

Перспективы дальнейших исследований по теме диссертации:

1. Возможно дальнейшее развитие предложенного метода выявления АР работы ЭЭС на основе СВИ, в рамках которого подразумевается определение критериев нарушения устойчивости ЭЭС, результатом которых однозначно является возникновение АР, с целью формирования превентивных управляющих воздействий, направленных на сохранение устойчивости энергосистемы. Для определения критериев предлагается применение полученных с УСВИ данных о параметрах режима работы ЭЭС в нескольких точках сети.

2. Возможно дальнейшее совершенствование предложенного метода определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети для алгоритмов АЛАРк, в рамках которого подразумевается проведение дополнительных исследований в части определения критериев, подтверждающих наличие электрической связи между контролируемыми точками сети, с применением данных с УСВИ.

3. Целесообразно рассмотреть возможность разработки унифицированного алгоритма АЛАРк для реализации автоматического расчёта параметров заложенной в него схемы замещения с применением предложенного метода определения предельных значений параметров схемы замещения контролируемого участка сети.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи и публикации в материалах конференций в изданиях, входящих в базы данных Web of Science (Core Collection), Scopus:

1. S.V. Yolkin, E.N. Kolobrodov, T.G. Klimova. Synchrophasor Measurements Application for Increasing of LAAM Safety and Adaptability. 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019, 2019. DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958273.

2. S.V. Yolkin, E.N. Kolobrodov, T.G. Klimova. LAAM complex realisation issues with using of PMU's data. 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2020, 2020. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301729.

3. S.V. Yolkin, E.N. Kolobrodov, T.G. Klimova. Direct angle calculation LAAM algorithm realisation issues. 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2021, 2021. DOI: 10.1109/RPA53216.2021.9628759.

Научные статьи, опубликованные в научных журналах, входящих в текущий Перечень ВАК России, за исключением журналов, входящих в Web of Science (Core Collection) и Scopus:

1. Елкин С.В., Колобродов Е.Н., Климова Т.Г. Применение векторных измерений для определения параметров АЛАР. Журнал «Релейная защита и автоматизация», научно-практическое издание, №02(35), июнь 2019, с. 28-30.

2. Елкин С.В., Колобродов Е.Н., Соловьев В.А., Климова Т.Г. Развитие СМПП – эффективный способ совершенствования комплекса выявления и ликвидации асинхронного режима. Журнал «Энергетик», практическое профессиональное издание, №9, сентябрь 2022, с. 29-34.

Прочие публикации, включая тезисы докладов конференций:

1. Елкин С.В., Колобродов Е.Н., Климова Т.Г. Применение векторных измерений для определения параметров АЛАР. Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019, с. 68-72.

2. Елкин С.В., Колобродов Е.Н., Климова Т.Г. Вопросы реализации комплекса АЛАР с использованием данных СВИ. Журнал для специалистов в области цифровой техники и технологий для электроэнергетики «Релейщик» №1(39), 2021 г, с. 18-21.