

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЧУВАШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Н. УЛЬЯНОВА»

На правах рукописи

Петров Владимир Сергеевич

**ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ
ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТЕЙ 110-750 КВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Антонов Владислав Иванович

Чебоксары – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр
ВВЕДЕНИЕ	5
1 ВИДЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЭС И ВХОДНЫЕ СИГНАЛЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ. КРАТКИЙ ОБЗОР	13
1.1 Виды перенапряжений в ЭЭС	13
1.2 Резонансные перенапряжения и входные сигналы цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения	15
1.3 Характеристики электрической изоляции высоковольтного оборудования, и их использование в цифровой системе АОПН.....	21
1.4 Учет процессов восстановления электрических свойств изоляции в цифровой системе АОПН	25
1.5 Обзор существующих устройств автоматического ограничения повышения напряжения	26
1.6 Управление техническими мероприятиями по ликвидации перенапряжения .	31
2 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ АОПН	36
2.1 Контролируемая величина	36
2.2 Повышение точности оценки максимального значения электрического напряжения	36
2.3 Точность оценки максимального значения напряжения	41
2.4 Ограничения классического способа оценки действующего значения.....	45
2.5 Новый способ оценки действующего значения	51

2.6 Точность нового способа оценки действующего значения	57
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН .	61
3.1 Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции	61
3.2 Новый способ оценки остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования	63
3.3 Новый способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения	64
3.4 Новый способ учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования после ликвидации перенапряжения.....	72
4 ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА.....	79
4.1 Влияние локального искажения на оценку контролируемой величины	79
4.1.1 Механизм влияния локального искажения на оценку максимального значения напряжения	79
4.1.2 Механизм влияния локального искажения на оценку действующего значения напряжения	82
4.2 Влияние локального искажения на оценку остаточного ресурса электрической изоляции	84
4.3 Способ восстановления контролируемой величины	86
5 РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОГО УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	107

5.1 Режимные и технологические требования к цифровой системе АОПН	107
5.2 Основные технические требования к современной цифровой системе АОПН.....	108
5.3 Функционально-логическая схема новой цифровой системы АОПН.....	109
5.4 Приведение фазных напряжений к относительным величинам	114
5.5 Функционально-логическая схема способа коррекции локального..... искажения.....	116
5.6 Функционально-логическая схема способа формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.....	117
5.7 Блок логики.....	123
5.8 Измерительный орган контроля величины и направления реактивной мощности и величины активной мощности	127
5.9 Блокировка при включении линии	130
5.10 Функция УРОВ АОПН	131
5.11 Аппаратные средства реализации цифровой системы АОПН	133
5.12 Испытания на программно-аппаратном комплексе RTDS	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Допустимые в условиях эксплуатации кратковременные повышения напряжения частоты 50 Гц для электрооборудования классов напряжения от 110 до 750 кВ.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Типовой бланк уставок цифровой системы АОПН в составе терминалов серии ЭКРА 200.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Межсистемные связи представляют собой протяженные магистральные ЛЭП. Это определяет высокую вероятность опасного повышения напряжения на них при различных оперативных переключениях, особенно, при включении на холостой ход. С целью предотвращения повреждения высоковольтного электрооборудования в этих режимах применяются специальные устройства автоматического ограничения повышения напряжения (АОПН). Основное предназначение устройств АОПН заключается в приведении в действие различных технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения (например, включение шунтирующих реакторов).

Требования к электрической прочности изоляции электрооборудования регламентируются ГОСТ 1516.3-96. Устройства АОПН в своей работе должны их учитывать. Однако технические характеристики применяемых в настоящее время в энергосистемах устройств АОПН (например, устройств с использованием реле РН-58, устройств с РНВК, шкафа ШП 2704) не в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ 1516.3-96. Главным образом это связано с тем, что упомянутые устройства имеют всего две ступени действия и не могут полноценно учитывать зависимость допустимой продолжительности нахождения высоковольтного оборудования под перенапряжением от уровня напряжения (предусмотренную вольт-временной характеристикой, приведенной в ГОСТ 1516.3-96).

Задача учета вольт-временной характеристики в какой-то мере решена в микропроцессорных устройствах АОПН (например, устройствах фирмы Basler Electric), но остается ряд нерешенных научных и технических задач, возникающих при разработке и эксплуатации цифровой системы АОПН.

Согласно ГОСТ 1516.3-96, учет процессов восстановления ресурса изоляции после исчезновения перенапряжения в АОПН должен осуществляться в зависимости от уровня существовавшего перенапряжения. Однако в известных в настоящее время устройствах АОПН восстановление ресурса электрической

изоляции контролируемого высоковольтного оборудования либо вовсе не учитывается, либо учет осуществляется с фиксированной интенсивностью во всем диапазоне возможных перенапряжений. В первом случае это может привести к повреждению высоковольтного оборудования, поскольку оно остается под напряжением при исчерпанном ресурсе изоляции, особенно при действии серии перенапряжений. Во втором случае учет восстановления ресурса электрической изоляции является паллиативным, поскольку заданная интенсивность восстановления может не соответствовать реальному процессу. Это может приводить к преждевременному отключению электрооборудования или, так же, как и в первом случае, к продолжению его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

Также недостаточно высока эффективность применения технических мероприятий из-за несовершенства реализации контроля их успешности, особенно в случае возникновения перемежающихся перенапряжений.

Кроме того, важной является задача повышения точности оценки контролируемой величины (задачи повышения точности оценки максимального и действующего значений напряжения) в различных режимах сети. Необходимость решения этой задачи вызвана особенностью структуры входного сигнала и его цифрового представления.

Столь же важна задача обеспечения устойчивости функционирования АОПН в условиях возникновения локальных искажений во входных сигналах, поскольку они влияют на оценку контролируемой величины, и, в конечном счете, на оценку цифровой системой АОПН остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Для повышения точности цифровой системы АОПН в этих условиях должен быть предусмотрен специальный алгоритм восстановления отсчетов с локальными искажениями.

В связи с вышеизложенным разработка цифровой системы АОПН с повышенной точностью измерения контролируемой величины, усовершенствованным алгоритмом учета ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования, эффективным способом

управления техническими мероприятиями и повышенной устойчивостью функционирования является весьма актуальной.

Целью данной работы является разработка теоретических и инженерных основ усовершенствованной цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ.

В диссертационной работе для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1 Анализ процессов электроэнергетической системы, сопровождающихся повышениями напряжения (перенапряжениями), с целью выявления наиболее опасных для электрооборудования и сложных для функционирования цифровой системы АОПН.

2 Обзор существующих принципов построения систем АОПН и выявление основных тенденций их развития.

3 Повышение точности оценки ресурса электрической изоляции высоковольтного электрооборудования цифровой системой АОПН за счет совершенствования алгоритмов оценки контролируемой величины (максимального и действующего значений напряжения).

4 Совершенствование методов оценки ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования за счет нового способа учета процессов его расхода и восстановления.

5 Совершенствование методов формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.

6 Повышение устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локальных искажений входных сигналов.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись методы математического моделирования, теоретических основ электротехники, основы теории техники высоких напряжений и теории цифровой обработки сигналов. Исследования проводились в программных средах Matlab, Mathcad и Excel.

Достоверность полученных результатов основных научных положений и выводов работы подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований на программно-аппаратном комплексе испытаний в реальном масштабе времени RTDS.

Основные положения, выносимые на защиту.

1 Способы повышения точности оценки контролируемой величины цифровой системой АОПН (способы оценки максимального и действующего значения напряжения), обладающие повышенной точностью измерения при отклонении частоты сети от номинального значения, а также при наличии в сигнале высших гармоник.

2 Новые алгоритмы цифровой системы АОПН на основе предложенного в работе способа учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого электрооборудования после исчезновения перенапряжения и способа формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Предложенные способы исключают преждевременное отключение электрооборудования, а также продолжение его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

3 Способ повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала (способ восстановления контролируемой величины).

Научная новизна работы.

1 Предложенные способы оценки максимального и действующего значений напряжения отличаются от известных повышенной точностью измерения в режимах со значительным содержанием гармоник, а также при отклонении частоты сети от номинального значения.

2 Предложенные способ учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования и способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения отличаются от известных повышенной точностью оценки

ресурса электрической изоляции и эффективностью применения технических мероприятий по ликвидации затянувшихся перенапряжений.

3 Разработанный способ повышения устойчивости функционирования АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала отличается от известных более высокой эффективностью.

Теоретическая и практическая ценность работы.

1 Предложенные способы оценки максимального и действующего значений напряжения могут быть использованы в различных измерительных органах устройств РЗ и А (например, в цифровых защитах с одной подведенной величиной).

2 Предложенные способ учета восполнения ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного электрооборудования и способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения могут быть применены в цифровой системе автоматического ограничения повышения напряжения.

3 Разработанный способ повышения устойчивости функционирования АОПН в условиях локальных искажений входного сигнала может быть применен при разработке различных цифровых систем противоаварийной автоматики и релейной защиты.

4 Предложенные в работе способы развивают теоретические положения релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: 4-ой международной научно-технической конференции “Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем” (Российский национальный комитет CIGRE, г. Екатеринбург, 3-7 июня 2013 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” (г. Чебоксары, 5-7 июня 2014 г.); V международной научно-практической заочной конференции “Энергетика и энергоэффективные

технологии” (г. Липецк, 15-16 декабря 2011); X всероссийской научно-технической конференции ”Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем” (г. Чебоксары, 6-8 июня 2013 г.); VII и VIII международных молодежных научных конференциях “Тинчуринские чтения” (г. Казань, 25-27 апреля 2012 г., 27-29 марта 2013 г.); VI открытой молодёжной научно-практической конференции “Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы” (г. Казань, 16-17 ноября 2011 г.).

Реализация результатов работы. Результаты работы положены в основу разработки микропроцессорного устройства АОПН на базе терминалов серии ЭКРА 200 предприятия «ЭКРА» (г. Чебоксары) в составе шкафа противоаварийной автоматики, подготовленного к серийному выпуску.

Теоретические положения цифровой обработки сигналов и алгоритмы АОПН, разработанные в диссертации, используются в учебном процессе по дисциплинам «Цифровая обработка электроэнергетических сигналов» и «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» магистерской программы «Автоматика энергосистем», направления подготовки магистров 140400.68 – «Электроэнергетика и электротехника» в ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Результаты исследований изложены в пяти главах диссертационной работы.

В первой главе дана классификация перенапряжений в ЭЭС. Показано, что наиболее сложным для функционирования цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения и опасным для оборудования режимом электроэнергетической системы является параметрический резонанс на второй гармонике. Цифровая обработка в АОПН сигналов электрической сети в этом режиме усложняется из-за вероятного отклонения частоты сети от номинальной величины. Сигналы в указанном режиме должны быть приняты в качестве тестовых при разработке и испытаниях цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения. Описаны характеристики электрической изоляции высоковольтного оборудования, а также представлено их использование в цифровой системе АОПН. Проведен обзор существующих устройств АОПН:

дана их классификация, выделены их достоинства и недостатки. Сформулированы научные и технические задачи совершенствования цифровой системы АОПН.

Во второй главе показано, что в цифровой системе АОПН измерения контролируемого напряжения (отсчеты) известны лишь в дискретные моменты времени, поэтому определение максимального значения непосредственно из измерений невозможно. Это приводит к появлению значительной погрешности в оценке максимального значения напряжения. Рассмотрение классического способа оценки действующего значения показало, что он не обеспечивает необходимого уровня точности измерений в режимах работы цифровой системы АОПН. Для повышения точности предложены новые способы оценки максимального и действующего значения напряжения. Предложенные способы защищены патентами РФ № 2525832 и 2521745.

В третьей главе введено понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции и ввода технических мероприятий в действие при ликвидации перенапряжения. Предложен новый способ оценки остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования в темпе процесса. Новый способ позволяет своевременно принять меры, направленные на ограничение, снижение напряжения или отключение высоковольтного оборудования при перенапряжениях. Предложен новый способ формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Способ позволяет обоснованно применять технические мероприятия по ликвидации затянувшихся перенапряжений. Предложен новый способ учета восстановления ресурса электрической изоляции контролируемого электрооборудования с учетом уровня перенапряжения, существовавшего до его ликвидации. Способ исключает преждевременное отключение электрооборудования и продолжение его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

В четвертой главе рассматриваются задачи повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН при локальных искажениях входного сигнала. Исследовано влияние локального искажения на оценку остаточного ресурса электрической изоляции. Обоснована необходимость использования специального алгоритма коррекции отсчетов с локальными искажениями. Предложен новый способ коррекции локального искажения во входной величине.

В пятой главе рассматриваются практические приложения предложенных в настоящей работе научных и технических решений при разработке современной микропроцессорной системы АОПН на линейке многофункциональных терминалов серии ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары. Представлена функционально-логическая схема предлагаемой цифровой системы АОПН и описаны ее основные модули. Разработка подготовлена к серийному производству. Устройство соответствует стандартам ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС», а также требованиям Правил устройства электроустановок.

1 ВИДЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЭС И ВХОДНЫЕ СИГНАЛЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ. КРАТКИЙ ОБЗОР

1.1 ВИДЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЭС

Источники перенапряжений в электрической сети можно разделить на внешние и внутренние (рисунок 1.1 [54]). Внешними источниками перенапряжений являются грозовые атмосферные разряды, влияние расположенных поблизости сетей более высокого напряжения, а также электромагнитный импульс, сопровождающий термоядерный взрыв. Внутренними источниками перенапряжения являются, как правило, изменение режима работы электроустановок, отключение линий, трансформаторов, установок продольной емкостной компенсации [54]. Перенапряжения, вызванные внутренними источниками, в свою очередь, делятся на коммутационные и резонансные. Коммутационные перенапряжения возникают в момент отключения электрических цепей и существуют короткое время (доли секунд) [14]. Резонансные перенапряжения возникают, как правило, только при подключении линии к источнику напряжения с одной стороны [49], например, при включении линии в процессе синхронизации различных частей энергосистемы или при действии АПВ (автоматического повторного включения) на одной стороне линии, а также при аварийном отключении линии с одной стороны. При этом перенапряжения в указанных режимах могут существовать длительное время и достигать значительных величин [14].

Для электрической изоляции опасными являются как перенапряжения от внешних, так и внутренних источников [14, 57, 62, 66, 78, 87]. Ограничение перенапряжений от внешних источников и коммутационных перенапряжений не может быть достигнуто изменением режима электрической сети. Поэтому перенапряжения от внешних источников ограничиваются стержневыми (на

подстанциях) и тросовыми (на ВЛ) молниеотводами, а также вентильными и трубчатыми разрядниками и ограничителями перенапряжения (ОПН) [28, 29, 33], а основным средством ограничения коммутационных перенапряжений являются разрядники и ОПН [3, 46, 79].

Резонансные перенапряжения представляют собой аварийные режимы работы электрической сети и могут быть ограничены путем изменения ее режима и структуры, например, путем включения шунтирующих реакторов [32, 63]. Именно для работы при резонансных перенапряжениях в электрической сети и предназначены цифровые системы АОПН.

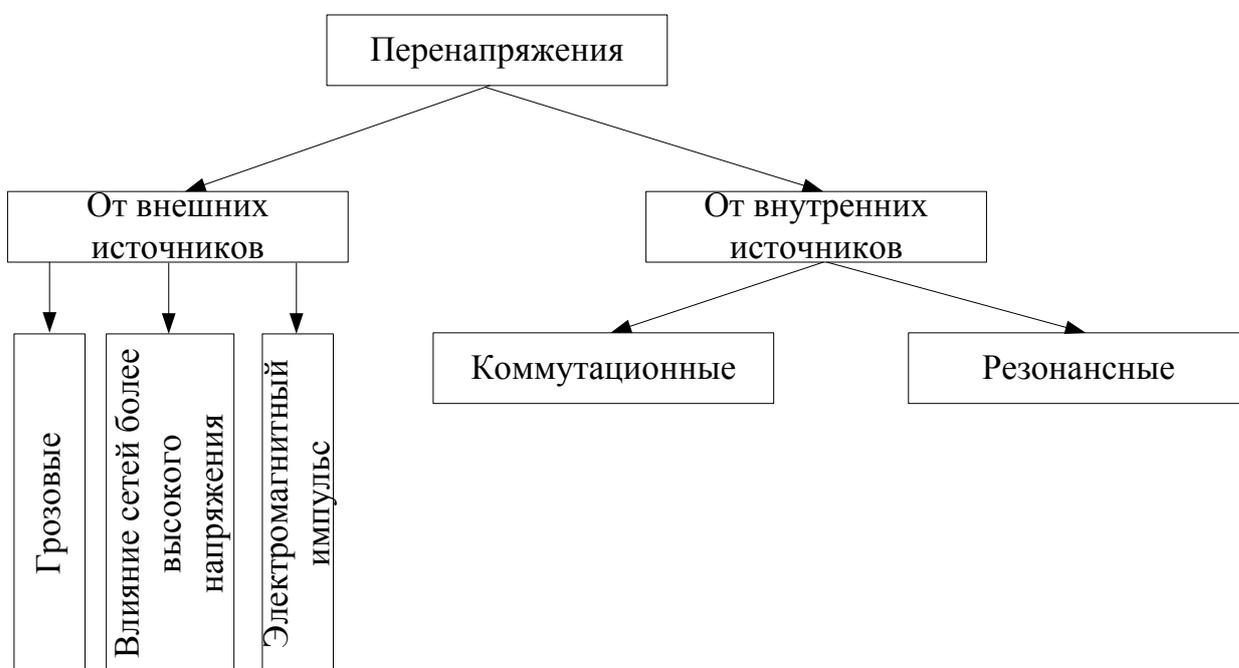


Рисунок 1.1 – Классификация перенапряжений

Таким образом, для обеспечения правильности функционирования цифровой системы АОПН необходимо исследовать принципы ее построения и работу в режимах с наиболее тяжелыми случаями резонансного перенапряжения.

1.2 РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ВХОДНЫЕ СИГНАЛЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Резонансные перенапряжения могут возникать при отключении линии с одной стороны вследствие емкостного эффекта [67, 69], суть которого заключается в том, что ЛЭП на холостом ходу ведет себя как емкость. Это хорошо видно, если представить линию T-образной схемой замещения. В этом случае напряжение на разомкнутом конце значительно возрастает.

Оценить, насколько напряжение U_k на разомкнутом конце линии повышается, можно рассмотрев схему замещения ЛЭП на холостом ходу (рисунок 1.2, при пренебрежении активным сопротивлением линии) [42]:

$$U_k = |\underline{I}(-jX_c)| = |\underline{E}|k_n,$$

где $k_n = \frac{X_c}{X_c - (X_{эс} + \frac{X_{л}}{2})}$ – коэффициент перенапряжения;

\underline{I} – ток в ЛЭП;

\underline{E} – ЭДС системы;

X_c – емкостное сопротивление;

$X_{л}$ – индуктивное сопротивление;

$X_{эс}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление системы.

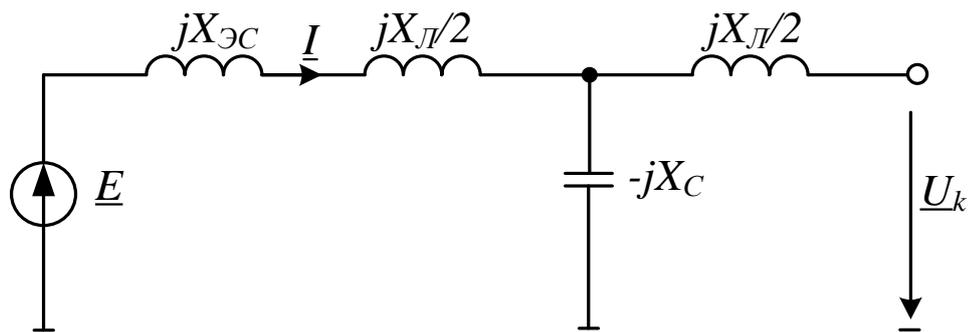


Рисунок 1.2 – Схема замещения ЭЭС

Как видно из последней формулы, чем ближе величина емкостного сопротивления X_C к величине суммарного индуктивного сопротивления системы и линии, тем ближе режим к резонансному и тем больше коэффициент перенапряжения $k_{п}$, и, соответственно, напряжение на разомкнутом конце линии U_k . Коэффициент перенапряжения может достигать 2 [42].

К резонансным перенапряжениям также относятся феррорезонансные перенапряжения и параметрический резонанс. Они связаны с изменением нелинейной индуктивности и проявляются в случаях, когда сопротивление остальной части схемы относительно ненагруженного или малонагруженного трансформатора носит емкостный характер [9].

Насыщение магнитопровода ферромагнитного элемента приводит к появлению нечетных высших гармоник. Они возникают при повышении напряжения основной гармоники на выводах трансформатора выше $1.2U_{ном}$ [23]. Так, при номинальном напряжении ток намагничивания не превышает 2–4% от номинального тока трансформатора, а при увеличении напряжения выше номинального значительно возрастает, достигая значений номинального тока трансформатора при насыщении магнитопровода [9]. При этом происходит искажение формы кривой тока. В результате возрастает доля высших гармоник. Прохождение несинусоидального намагничивающего тока через элементы схемы создает несинусоидальное напряжение. Следовательно, на трансформаторе и в других точках электропередачи появляются напряжения высших гармоник [9].

В цепях с нелинейной индуктивностью возможны резонансы как на высших, так и на дробных гармониках (субгармониках).

Субгармоники в нормальном режиме отсутствуют и проявляют себя только при резонансе, возникающем в результате переходного процесса после коммутации. Феррорезонанс на субгармониках возникает при частотах собственных колебаний $f_0 \ll 50$ Гц, и возможен на электропередачах с продольной емкостной компенсацией [9, 23]. Субгармонический резонанс устраняется путем кратковременного шунтирования устройства продольной емкостной компенсации выключателем или разрядником [23].

В установившемся режиме наиболее вероятным является возникновение резонанса на второй, третьей и пятой гармониках [31]. Резонанс на высших четных гармониках по природе своего происхождения принципиально отличается от резонанса на нечетных гармониках [23]. Как уже упоминалось, нечетные гармоники существуют и при отсутствии резонансных условий, и резонанс лишь приводит к значительному их увеличению. Четные гармоники в нерезонансных условиях принципиально отсутствуют и проявляют себя только при определенных видах резонанса (например, при параметрическом резонансе [37]).

Третья гармоника напряжения, вызванная насыщением магнитопровода трансформатора, проявляет себя в сети как нулевая последовательность. И, как показано в [31, 36], при параметрах схемы нулевой последовательности реальных ЛЭП резонанс на третьей гармонике возможен на узком диапазоне длин линий (525 – 540 км). Кроме того, из-за демпфирующего эффекта коронирования проводов линии резонанс на третьей гармонике не может иметь существенного значения в реальных условиях работы ЭЭС.

Резонанс на пятой гармонике, также обусловленной насыщением стали трансформатора, возможен либо при коротких участках линий (~ 100 км), либо при весьма длинных участках (~ 700 – 750 км) [31]. В первом случае появление пятой гармоники напряжения значительного уровня затруднено из-за незначительного насыщения магнитопровода силового трансформатора. Второй случай резонанса возможен только при длинах участков, весьма редко

встречающихся на практике [31]. Кроме того, чем выше номер гармоники, тем большее демпфирующее влияние оказывают потери на корону. Последнее хорошо видно из эмпирической формулы Ф. Пика, определяющей потери на корону P_k [53]:

$$P_k = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{d}} (U_\phi - U_0)^2 10^{-5},$$

где f – частота, Гц;

δ – относительная плотность воздуха;

r_0 – радиус провода, см;

d – расстояние между проводами, м;

U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, кВ;

U_0 – расчетная величина напряжения, близкая к критическому значению напряжения короны, кВ:

$$U_0 = 21,2\delta r_0 \ln\left(\frac{d}{r_0}\right) m_1 m_2,$$

где m_1 – коэффициент гладкости провода;

m_2 – коэффициент погоды.

Из формулы Ф. Пика видно, что потери на корону растут пропорционально росту частоты.

Из вышесказанного следует, что резонансные явления на третьей и пятой гармониках несущественны и могут не приниматься во внимание при разработке цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения.

Проведенные в электрических системах эксперименты [56] показали, что вторая гармоника, пренебрежимо малая в установившемся режиме, существует в течение длительного переходного режима параметрического резонанса (порядка 1,5 с), медленно уменьшаясь от периода к периоду, и имеет соизмеримый с

первой гармоникой уровень [31, 53]. Параметрический резонанс на второй гармонике возникает при включении линии электропередачи на холостой ход и обусловлен изменением нелинейной индуктивности из-за наличия в магнитном потоке трансформатора медленно затухающей апериодической составляющей [37]. Возникновение второй гармоники при включении линии 750 кВ на холостой ход впервые было обнаружено экспериментально [13], а позже было зафиксировано еще и ложное срабатывание дифференциально-фазной защиты также при включении линии на холостой ход (ЦДУ ЕЭС СССР Бондаренко А.Ф.), что приводило к срыву включения электропередачи в работу [37]. Пояснение физической сущности процесса параметрического резонанса дано в [37].

На рисунке 1.3 показана кривая напряжения при параметрическом резонансе. В наиболее тяжелом случае резонанса амплитуды синфазных первой и второй гармоник соизмеримы. При этом максимальное значение указанного сигнала достигает 1,76 от величины первой гармоники.

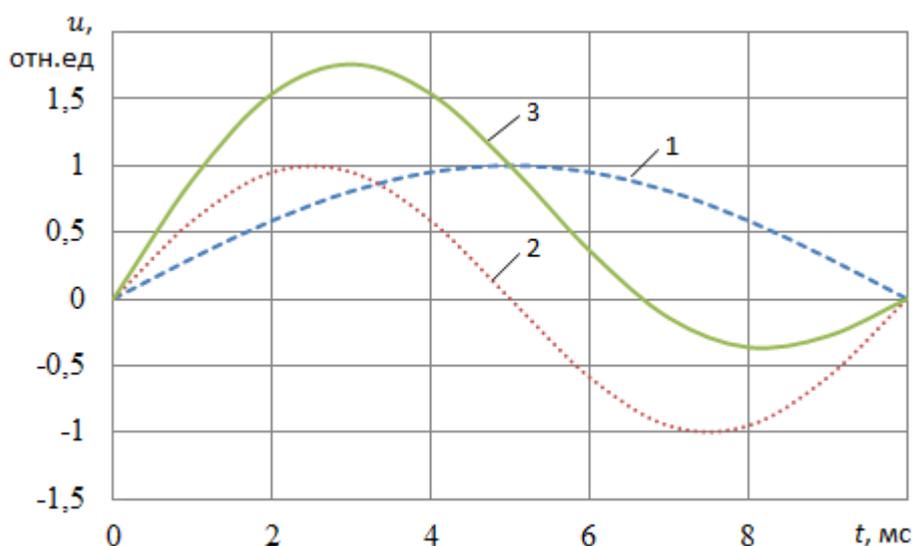


Рисунок 1.3 – Кривая напряжения при параметрическом резонансе на второй гармонике. Показана половина периода сигнала: 1 и 2 – кривая первой и второй гармоники, 3 – кривая напряжения при параметрическом резонансе

При разработке алгоритмов обработки входных сигналов цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения необходимо также учитывать влияние ухода частоты сети от номинального значения на точность

оценки перенапряжения и устойчивость функционирования АОПН. В случае параметрического резонанса такое возможно, если резонансные явления возникли в асинхронном режиме ЭЭС, к которой примыкает силовой трансформатор. Согласно [20], в 1-м цикле асинхронного режима скольжение может достигнуть 8 Гц (таблица 1.1), а в 4-м цикле – до 12 Гц (таблица 1.2) и в установившемся асинхронном режиме – 4.2 Гц (таблица 1.3). В таблицах 1.1-1.3 взаимное скольжение $s_{ож}$ дано в Гц для определенных соотношении мощностей максимальных нагрузок в отправной $P_{Н1}$ и приемной $P_{Н2}$ энергосистемах относительно передаваемой в исходном режиме по сечению асинхронного режима мощности $P_{пер}$.

Таблица 1.1 – Ожидаемое скольжение в 1-м цикле асинхронного режима

$P_{пер}/P_{Н2}$	$s_{ож}$ при различных $P_{пер}/P_{Н1}$			
	0.01	0.1	1	10
0.01	0.4	0.7	1.5	2
0.1	0.8	1	2	2.5
0.5	2	2.5	3	3.5
0.8	6.2	6.5	7.5	8

Таблица 1.2 – Ожидаемое скольжение в 4-м цикле асинхронного режима

$P_{пер}/P_{Н2}$	$s_{ож}$ при различных $P_{пер}/P_{Н1}$			
	0.01	0.1	1	10
0.01	0.6	2	4	6
0.1	2.2	3.5	5	6.5
0.5	6	6.5	9	11
0.8	6.5	7	10	12

Таблица 1.3 – Ожидаемое скольжение при установившемся асинхронном режиме

$P_{\text{пер}}/P_{\text{H2}}$	$s_{\text{ож}}$ при различных $P_{\text{пер}}/P_{\text{H1}}$			
	0.01	0.1	1	10
0.01	0.4	0.5	1.4	2.8
0.1	2	2.2	3.1	4
0.5	2.1	2.3	3.2	4.1
0.8	2.2	2.4	3.3	4.2

Таким образом, перенапряжения могут возникать как в результате резонансных явлений, связанных с емкостным эффектом, приводящих к повышению уровня напряжения основной гармоники на электрооборудовании, так и в случае параметрического резонанса на второй гармонике. Оба случая перенапряжения могут быть отягощены отклонением частоты сети до 12 Гц при асинхронном режиме электрической сети. Однако, в случае параметрического резонанса входные сигналы цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения сложнее для обработки.

Учитывая вышеизложенное, параметрический резонанс на второй гармонике с вероятным уходом частоты основной гармоники от номинального значения до 12 Гц в данной работе принят за самый тяжелый случай перенапряжения. Сигналы в указанном режиме определены в качестве тестовых для цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения.

1.3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АОПН

Правила устройства электроустановок [46] требуют, чтобы автоматика ограничения повышения напряжения учитывала допустимую длительность

перенапряжений. Стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» напрямую указывает на использование вольт-временной характеристики (ВВХ) электрической изоляции защищаемого оборудования.

Вольт-временную характеристику (рисунок 1.4) в технике высоких напряжений определяют обычно как зависимость допустимого уровня перенапряжения γ_n от длительности T_n нахождения изоляции высоковольтного оборудования под этим напряжением [54]. Величину перенапряжения γ_n задают как отношение текущего уровня напряжения U_n к максимально допустимому уровню напряжения рабочего режима U_0 : $\gamma_n = U_n/U_0$.

Обычно ВВХ делят на диапазоны по уровню перенапряжения с таким расчетом, чтобы на каждом из них можно было предпринять те или иные технические мероприятия по ликвидации перенапряжения. Например, высоковольтное оборудование номинальным напряжением 750 кВ в диапазоне перенапряжений $\gamma = 1,025 \div 1,1$ может находиться достаточно длительное время, от десятков минут до нескольких часов (до 8 ч для ВВХ силовых трансформаторов, рисунок 1.4). Поэтому для ликвидации перенапряжений этого диапазона можно использовать инерционные по времени технические мероприятия, такие как изменение режимов работы синхронных компенсаторов на подстанции, переключение РПН силовых трансформаторов и т.д. В диапазоне $\gamma = 1,1 \div 1,25$ эффективность технических мероприятий предыдущего диапазона может быть недостаточной и не привести к ликвидации перенапряжения. В этом случае, допустимое время нахождения оборудования под таким напряжением уже не столь большое (от 20 с до 20 мин). Поэтому должны быть предприняты более быстродействующие и эффективные технические мероприятия. И, как правило, они направлены на изменение режима работы сети, к которой подключено защищаемое электрооборудование. Одним из вариантов таких технических мероприятий является ввод в действие шунтирующих реакторов с целью компенсации емкости сети. При перенапряжениях $\gamma > 1,25$ допустимое время нахождения изоляции под напряжением составляет единицы секунд (меньше 20 с). Очевидно, что в этом случае речь о регулировании напряжения не может идти.

Поэтому автоматика ограничения повышения напряжения действует сразу на отключение высоковольтного оборудования от сети.

Из вышеизложенного следует, что АОПН должна иметь по крайней мере три ступени (рисунок 1.4), на каждой из которых применяются соответствующие технические мероприятия, направленные на ликвидацию перенапряжения.

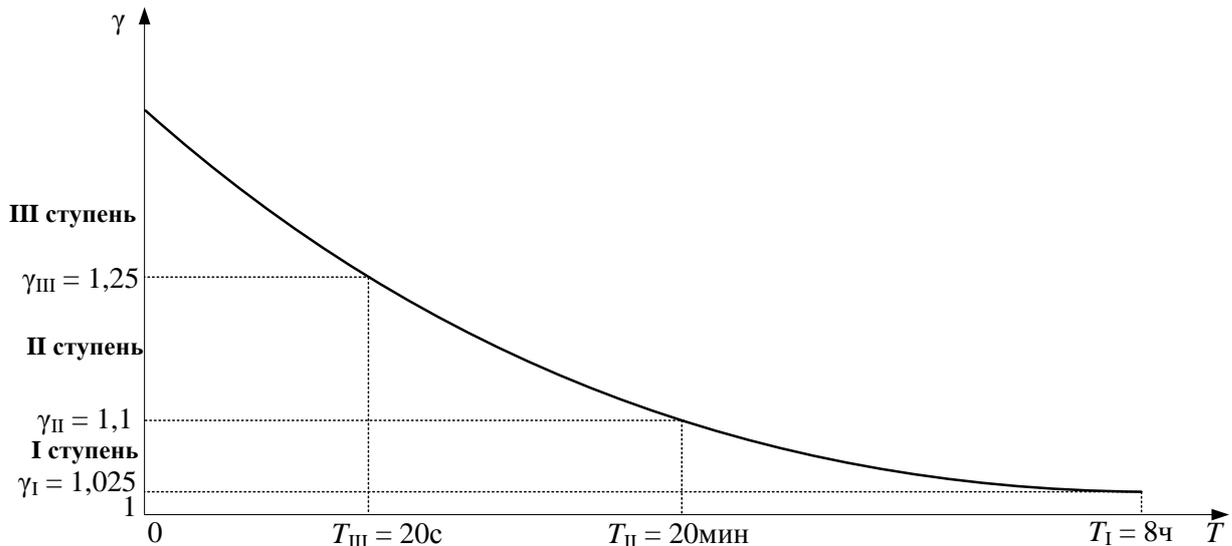
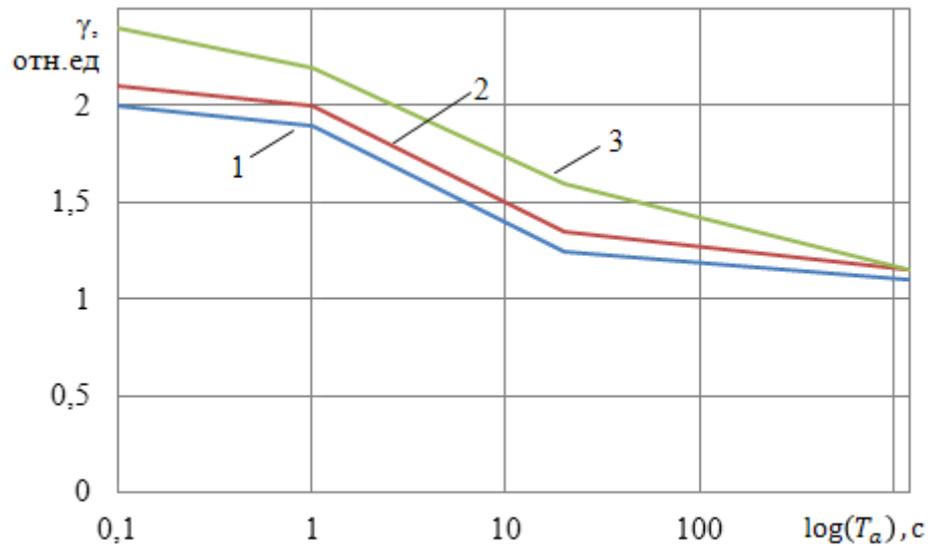


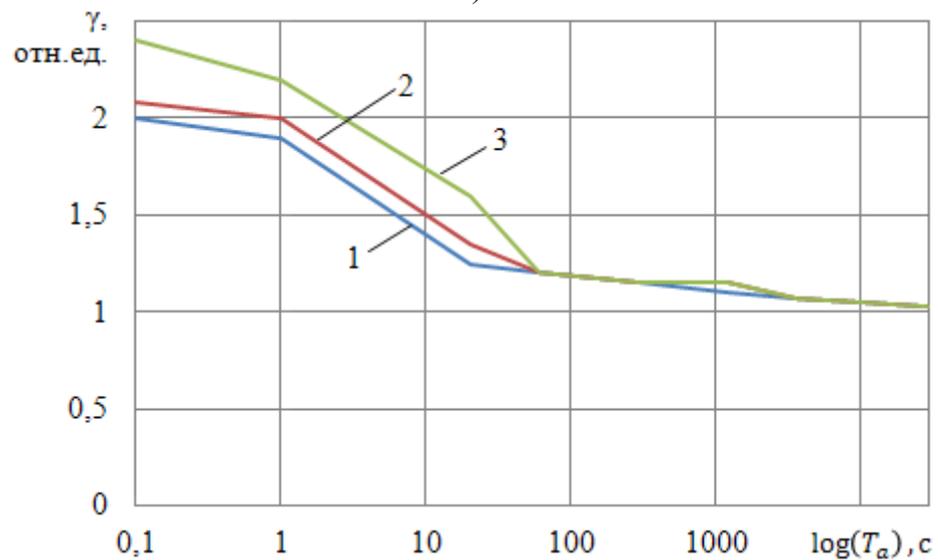
Рисунок 1.4 – Вольт-временная характеристика (масштаб по времени условный)

Защищаемое АОПН оборудование может иметь различные ВВХ. Поэтому в случае использования АОПН для защиты группы высоковольтного оборудования с различными ВВХ должна учитываться ВВХ менее защищенного от перенапряжения оборудования [45]. На рисунках 1.5 а) – в) представлены ВВХ электрооборудования различных классов напряжения (промежуточные значения определены путем линейного интерполирования табличных значений). Из рисунков видно, что изоляция силовых трансформаторов является менее защищенной от воздействия повышенного напряжения по сравнению с другим оборудованием. Поэтому продолжительные резонансные перенапряжения на длинных линиях опасны в первую очередь для изоляции силовых трансформаторов [23]. Причем, как показано в [18, 61, 74], повышение напряжения для самой линии менее опасно. Из-за этого в некоторых реализациях АОПН изначально исходят из требований защиты силовых трансформаторов [85].

В цифровых системах АОПН необходимо предусмотреть отстройку от коммутационных перенапряжений и перенапряжений, вызванных внешними источниками [46]. Это осуществляется путем введения соответствующей выдержки времени.



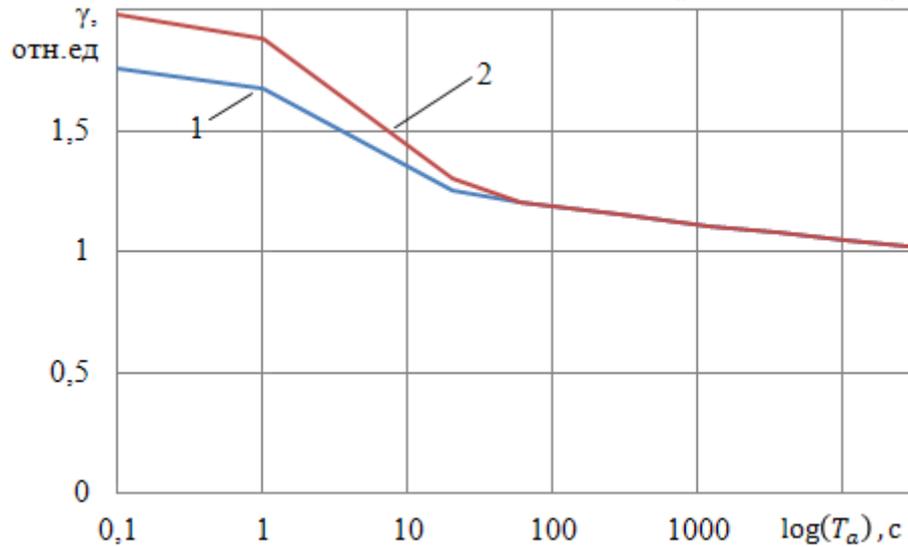
а)



б)

Рисунок 1.5 – ВВХ оборудования 110-750 кВ

(Продолжение рисунка 1.5)



в)

Рисунок 1.5 – ВВХ оборудования 110-750 кВ: а) ВВХ оборудования 110-330 кВ: 1 – силовые трансформаторы (автотрансформаторы); 2 – шунтирующие реакторы и электромагнитные ТН; 3 – аппараты, емкостные ТН, ТТ, конденсаторы связи, шинные опоры; б) ВВХ оборудования 500 кВ: 1 – силовые трансформаторы; 2 – шунтирующие реакторы и электромагнитные ТН; 3 – аппараты, емкостные ТН, ТТ, конденсаторы связи, шинные опоры; в) ВВХ оборудования 750 кВ: 1 – силовые трансформаторы; 2 – шунтирующие реакторы, аппараты, ТН и ТН, конденсаторы связи, шинные опоры

1.4 УЧЕТ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АОПН

В цифровой системе АОПН учет процессов восстановления ресурса изоляции после исчезновения перенапряжения должен осуществляться в зависимости от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения [38, 60]. Существует разница в процессах восстановления электрических свойств изоляции, и это связано с зависимостью характера деструктивных процессов от уровня действующего напряжения. Например, при перенапряжении невысокого уровня изоляция оборудования может находиться под напряжением достаточно долго, и при этом главным фактором разрушения изоляции является ее нагрев. При перенапряжениях с высоким уровнем решающую роль играют процессы

ионизации изоляционного промежутка, в связи с чем допустимое время нахождения изоляции под напряжением относительно невелико. Из-за относительно короткого времени нахождения изоляции под таким высоким напряжением, процессы нагрева изоляции не оказывают столь заметного эффекта на расход ресурса изоляции. Как известно [38, 60], интенсивность восстановления изоляции в первом случае будет невысокой, а во втором случае будет значительной. Эта разница в процессах восстановления изоляции должна учитываться в АОПН.

1.5 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В энергосистемах Российской Федерации широкое распространение получили электромеханические устройства АОПН [11, 15], а также типовые микроэлектронные шкафы ШП 2704 [47]. Хотя в последние годы различными производителями разработано множество микропроцессорных устройств АОПН, но практически все они используют логику, в той или иной степени повторяющую логику типового шкафа ШП 2704 [43]. За рубежом, в отличие от Российской Федерации, устройство АОПН относят к защитам и называют защитой от повышения напряжения (overvoltage protection) [65, 68, 85].

Устройства АОПН, используемые в энергосистемах, можно сгруппировать по следующим техническим признакам:

- 1) по типу контролируемых параметров входных электрических величин;
- 2) по количеству используемых ступеней;
- 3) по точности учета ВВХ;
- 4) по способу учета восстановления свойств изоляции.

По типу контролируемых параметров входных электрических величин устройства АОПН можно разделить на оценивающие:

- 1) только действующее значение напряжения;
- 2) только максимальное значение напряжения;
- 3) одновременно действующее и максимальное значения напряжения.

Согласно стандарту ОАО «ФСК ЕЭС» современные устройства АОПН должны контролировать как максимальное, так и действующее значение напряжения [8]. Контроль максимального значения обусловлен необходимостью ограничения напряжения с учетом электрической прочности изоляции [19]. Действующее же значение характеризует тепловое воздействие на изоляцию защищаемого оборудования [45].

К устройствам, оценивающим только действующее значение напряжения, относятся устройства АОПН, в которых, например, в качестве пусковых органов используются электромеханические реле напряжения типа РН-58, включенные на фазные напряжения [11, 15], а также устройство, используемое фирмой COES SINAC (Перу) [85].

К устройствам, оценивающим только максимальное значение напряжения, относится, например, АОПН [51], в котором максимальное значение электрического напряжения оценивается косвенно путём сравнения измеряемого электрического напряжения с заранее заданными порогами. При этом за максимальное значение напряжения на полупериоде принимается значение наибольшего из порогов, выше которого оказалось мгновенное значение напряжения. Точность измерения максимального значения напряжения определяется шагом между порогами. Поскольку число порогов ограничено, то точность определения максимального значения невысока, что приводит к уменьшению точности АОПН.

К устройствам, оценивающим одновременно действующее и максимальное значение напряжения относятся, например, устройство АОПН в типовых микроэлектронных шкафах ШП 2704 [47], микропроцессорное устройство АОПН-М фирмы ОАО «Институт «Энергосетьпроект».

В микроэлектронном устройстве АОПН ШП 2704 [47] определяется действующее значение напряжения путем измерения средневыпрямленного

значения. Поскольку средневыпрямленное значение пропорционально действующему значению только при синусоидальной форме напряжения, то при искажении формы его кривой, например, при появлении в напряжении гармоник, оценка действующего значения будет иметь значительную погрешность. Это снижает точность оценки ресурса изоляции.

В микропроцессорном устройстве АОПН-М для оценки действующего значения используется классическая формула, адаптированная под обработку цифрового сигнала [24]. Согласно ему, определяется усреднённая сумма квадратов отсчетов за период электрического напряжения и извлекается квадратный корень из усреднённой суммы. При этом число измерений электрического напряжения за период имеет фиксированное значение и задается для напряжения номинальной частоты. Поэтому при отклонении частоты сети от номинального значения в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное недостаточным подавлением оператором усреднения переменной составляющей в сигнале суммы квадратов отсчетов напряжения. В итоге это снижает точность оценки ресурса изоляции.

По количеству используемых ступеней устройства АОПН бывают:

- 1) одноступенчатые;
- 2) двухступенчатые;
- 3) трехступенчатые;
- 4) многоступенчатые.

Одноступенчатое устройство АОПН, используемое ранее фирмой АЕР (США) [75], по сути, является реле максимального напряжения. При срабатывании ступень действует на отключение защищаемого оборудования.

Двухступенчатые устройства АОПН на первой ступени реализуют технические мероприятия, направленные на ликвидацию перенапряжения, и только на второй ступени производят отключение защищаемого высоковольтного оборудования. В качестве технических мероприятий, как правило, применяется включение шунтирующих реакторов [6, 11, 15, 47].

Устройство АОПН-М фирмы ОАО «Институт «Энергосетьпроект» [40] имеет *три ступени*. На первых двух ступенях вводятся в действие технические мероприятия, направленные на ликвидацию перенапряжения, а на третьей – отключение высоковольтного оборудования. На первой ступени применяются более инерционные технические мероприятия такие, как форсировка статических компенсаторов [2], переключение вольтодобавочных трансформаторов с целью снижения коэффициентов трансформации силовых автотрансформаторов и регулирование возбуждения. На второй ступени вводятся более быстродействующие технические мероприятия такие, как, например, включение шунтирующих реакторов.

Существуют устройства АОПН [85], которые имеют три ступени, но на всех ступенях производят только отключение защищаемого оборудования с различной выдержкой времени.

К многоступенчатым можно отнести устройство АОПН производства фирмы ООО «Прософт-системы» в составе шкафа противоаварийной автоматики МКПА-2 [50]. Достоинство устройства заключается в возможности иметь произвольное количество ступеней.

По точности учета ВВХ изоляции защищаемого высоковольтного оборудования устройства АОПН можно условно разделить на две группы, в которых ВВХ представлена:

1) ступенчатой аппроксимацией (ступеней по напряжению), среднее время срабатывания ступеней определяется из ВВХ;

2) аппроксимацией аналитической зависимостью, время срабатывания ступеней соответствует текущему уровню перенапряжения и определяется из ВВХ.

Неточный учет ВВХ в АОПН может вызвать излишние отключения защищаемого оборудования [40], либо, наоборот, необоснованное оставление под напряжением.

К первой группе относятся большинство существующих устройств АОПН [6, 11, 15, 47, 65, 68, 75, 83, 85]. Для повышения точности учета ВВХ диапазоны

ступеней в некоторых устройствах АОПН делят на поддиапазоны [2] или увеличивают число ступеней [50].

Устройства второй группы значительно превосходят устройства первой группы по точности учета ВВХ и гибкости применения технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения. Однако такие устройства функционально сложны и примеров их немного (например, устройство фирмы Basler Electric [77]).

По способу учета восстановления свойств изоляции устройства АОПН делятся на две группы:

- 1) не учитывающие процессы восстановления;
- 2) учитывающие процессы восстановления, но без оценки влияния уровня напряжения, действовавшего до ликвидации перенапряжения.

К первой группе устройств относится, например, АОПН на базе шкафа автоматики ШП 2704 [47]. Расходуемый за время существования перенапряжения ресурс изоляции оценивается в нем косвенно путем сравнения продолжительности перенапряжения с заданным временем (уставкой по времени). При превышении уставки формируется сигнал исчерпания ресурса и оборудование отключается. Недостатком такого подхода является его неспособность учитывать восстановление ресурса изоляции при ликвидации перенапряжения. Поэтому предполагается, что ресурс изоляции восстанавливается сразу же после исчезновения перенапряжения. Это может привести к повреждению высоковольтного оборудования, поскольку оно остается под напряжением при исчерпанном ресурсе изоляции, особенно при действии серии перенапряжений.

Ко второй группе можно отнести устройство АОПН [26]. В отличие от ШП 2704 в данном устройстве учитывается восполнение ресурса изоляции после исчезновения перенапряжения, но с фиксированной интенсивностью восстановления во всем диапазоне возможных перенапряжений. Фиксированный учет восстановления ресурса изоляции является паллиативным решением, поскольку известно [60], что условия восстановления ресурса изоляции после

ликвидации перенапряжения зависят от уровня напряжения, под которым изоляция находилась до этого. Поэтому, оборудование может быть либо отключено преждевременно, либо, наоборот, как и в ШП 2704, необоснованно оставлено под напряжением. В первом случае неверная оценка ресурса приводит к излишнему отключению оборудования, а во втором случае – к его повреждению.

1.6 УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ МЕРОПРИЯТИЯМИ ПО ЛИКВИДАЦИИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Необходимый уровень технического совершенства автоматики ограничения повышения напряжения в значительной мере зависит от обоснованности и своевременности применения тех или иных технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения. Практически все известные устройства АОПН успешность действия технических мероприятий ступени контролируют путем измерения длительности перенапряжения. Если длительность перенапряжения превысит заданное время, то формируется признак отказа технических мероприятий ступени и приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени.

Например, в шкафу ШП 2704 предусмотрены два диапазона возможных перенапряжений (две ступени). На первой ступени предусматриваются технические мероприятия, направленные на ликвидацию перенапряжения путем снижения напряжения, а на второй – путем отключения высоковольтного оборудования от сети. Принимается, что технические мероприятия первой ступени не сработали (формируется признак отказа), если в течение заданного времени (уставки по времени) после приведения технических мероприятий в действие перенапряжение не исчезло. Уставка по времени для первой ступени выбирается исходя из средней скорости расхода ресурса изоляции с таким

расчетом, чтобы осталось время для приведения в действие технических мероприятий второй ступени (отключение оборудования). Использование фиксированного времени для контроля успешности технических мероприятий является паллиативом, заменяющим оценку уровня остаточного ресурса изоляции контролем продолжительности перенапряжений. Это снижает эффективность применения технических мероприятий, особенно в случае перемежающихся перенапряжений, поскольку не учитывается расход ресурса изоляции при предыдущих перенапряжениях. В связи с этим защищаемое оборудование может быть либо отключено преждевременно, либо, наоборот, необоснованно оставлено под напряжением.

В некоторых устройствах (например, АОПН-М [2]) диапазон перенапряжений каждой ступени делят на поддиапазоны и для каждого поддиапазона формируется своя уставка по времени. Это позволяет более обоснованно выбирать уставки времени при формировании признака отказа технических мероприятий ступени.

Дальнейшее совершенствование способов управления техническими мероприятиями возможно, на взгляд автора, путем прямой оценки остаточного ресурса изоляции в соответствии с ВВХ и учета процессов восстановления свойств изоляции после ликвидации перенапряжения. Изложению предложений автора настоящей работы посвящен раздел 3.

1.7 НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН

Интеграция автоматики в интеллектуальную среду цифровых подстанций повышает требования к алгоритмам и техническому совершенству современных АОПН.

Прежде всего, в алгоритмах обработки входных сигналов цифровых систем АОПН нужно учесть особенности, возникающие из-за цифрового представления сигналов. В частности, прямое использование понятий и определений, изложенных в классическом курсе основ электротехники, для формирования алгоритмов измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения неэффективно из-за особенностей цифрового представления информации. Так максимальное значение напряжения недоступно для непосредственного измерения из-за дискретизации входного сигнала. Это же обстоятельство накладывает свои особенности на алгоритм определения действующего значения напряжения. При номинальной частоте сети классический метод [7] определения действующего значения свободен от погрешностей, но при отклонении частоты сети от номинального значения в оценке действующего значения появляется смещение, вызванное тем, что усреднение не обеспечивает подавления составляющих суммарных частот от гармоник входного сигнала. Поэтому алгоритм определения действующего значения должен учитывать эту особенность.

Кроме того, контроль максимального и действующего значения напряжения связан, так или иначе, с анализом мгновенных значений (отсчетов), и его точность подвержена значительному влиянию различного локального искажения. Учитывая, что это напрямую влияет на точность расчёта контролируемых величин, характеризующих остаточный ресурс изоляции оборудования, в автоматике необходимо предусмотреть специальный алгоритм коррекции локальных искажений в сигнале напряжения. В измерительных органах АОПН для определения максимального и действующего значений должны использоваться отсчёты напряжения только после коррекции локальных искажений.

Таким образом, в цифровой АОПН должны использоваться нетрадиционные с точки зрения теоретических основ электротехники алгоритмы, но в полной мере обеспечивающие необходимые метрологические

характеристики измерения действующего и максимального значений контролируемого напряжения.

Также должно быть обеспечено обоснованное применение технических мероприятий по ликвидации затянувшихся перенапряжений путем формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на них. Должен быть обеспечен учет процессов восстановления ресурса изоляции в зависимости от уровня перенапряжения, существовавшего до его ликвидации согласно [60]. Таким образом, должен быть исключен преждевременный вывод высоковольтного электрооборудования из эксплуатации, а также необоснованное его оставление под напряжением.

Анализ сигналов на входе АОПН, принципов действия существующих устройств АОПН, особенностей процессов расхода и восстановления ресурса изоляции под действием перенапряжения, а также технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения, показывает, что техническое совершенство устройств АОПН еще недостаточно высоко и требует дальнейших исследований.

С учетом вышеизложенного в настоящей диссертации решаются следующие научные и технические задачи:

1. Повышение точности оценки контролируемой величины цифровой системой АОПН (задачи повышения точности оценки максимального и действующего значений напряжения) в различных режимах сети.

2. Совершенствование методов оценки цифровой системой АОПН восполнения ресурса электрической изоляции защищаемого высоковольтного электрооборудования, а также методов формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.

3. Повышение устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала (способ восстановления контролируемой величины).

ВЫВОДЫ:

1. Показано, что с точки зрения функционирования цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения наиболее сложным режимом электроэнергетической системы является параметрический резонанс на второй гармонике. Цифровая обработка в АОПН сигналов электрической сети в этом режиме усложняется из-за вероятного отклонения частоты сети от номинальной величины при асинхронном режиме в энергосистеме. Сигналы в указанном режиме должны быть приняты в качестве тестовых при разработке и испытаниях цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения.

2. Анализ сигналов на входе АОПН, принципов действия существующих устройств АОПН, особенностей процессов расхода и восстановления ресурса изоляции под действием перенапряжения, а также технических мероприятий, направленных на ликвидацию перенапряжения, показывает, что техническое совершенство устройств АОПН еще недостаточно высоко и требует дальнейших исследований. В связи с этим, в настоящей диссертации решаются следующие научные и технические задачи:

1) повышение точности оценки контролируемой величины цифровой системой АОПН (задачи повышения точности оценки максимального и действующего значений напряжения) в различных режимах сети.

2) совершенствование методов оценки цифровой системой АОПН восполнения ресурса электрической изоляции защищаемого высоковольтного электрооборудования, а также методов формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.

3) повышение устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала (способ восстановления контролируемой величины).

2 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ АОПН

2.1 КОНТРОЛИРУЕМАЯ ВЕЛИЧИНА

Как было показано в разделе 1.4, при перенапряжениях невысокого уровня главным фактором разрушения электрической изоляции является ее нагрев. При перенапряжениях с высоким уровнем решающую роль уже играют процессы ионизации изоляционного промежутка, и из-за относительно короткого допустимого времени нахождения изоляции под таким напряжением, процессы нагрева изоляции не оказывают столь заметного эффекта. Эти особенности электрической изоляции должны быть учтены при разработке АОПН.

Следуя выводам, сделанным в разделе 1.5, и требованиям стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» [8], современные устройства АОПН должны контролировать как максимальное, так и действующее значение напряжения. Поэтому в национальном стандарте Российской Федерации [25] определено, что для АОПН контролируемой величиной для ее первых ступеней, функционирующих при низких уровнях напряжения, является действующее значение, а для следующих ступеней, работающих при более высоких уровнях напряжения, используется максимальное значение.

2.2 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Поскольку в цифровой системе АОПН измерения контролируемого напряжения (отсчеты) известны лишь в дискретные моменты времени, то определение максимального значения непосредственно из измерений

невозможно. Действительно, если принять за максимальное значение напряжения величину максимального из отсчетов около предполагаемого максимума кривой напряжения, то, как видно из рисунка 2.1, ею окажется величина отсчета u_0 . Однако отсчет u_0 отличается от максимального значения u_{\max} рассматриваемого полупериода и будет меньше него.

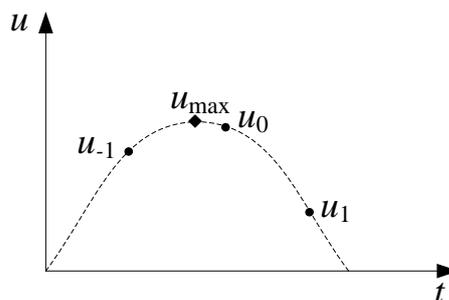


Рисунок 2.1 – Определение максимального значения (максимальное значение помечено ромбиком)

Это приводит к появлению погрешности в оценке максимального значения напряжения (анализ погрешности оценки рассмотрен в следующем разделе 2.3).

С целью повышения точности оценки максимального значения в настоящей работе предлагается следующий способ.

Вначале измеряется напряжение в равномерно фиксированные моменты времени (на рисунке 2.2 измерения показаны на кривой напряжения 1 метками в виде незакрашенных кружков) и формируются отсчёты выпрямленного сигнала u_k путём определения абсолютных значений измерений напряжения (метки в виде незакрашенных кружков на кривой 2). Затем на каждом периоде уже выпрямленного сигнала выделяется отрезок, расположенный между двумя отсчетами ниже порога (Порог 1 на рисунке 2.2), и все отсчеты которого выше упомянутого порога (отсчеты между точками a и b). Тем самым на каждом полупериоде сигнала (на периоде выпрямленного сигнала) определяется отрезок, содержащий в себе абсолютное максимальное значение напряжения.

Как видно из рисунка 2.2, порог должен обеспечивать однозначное определение отрезка с максимальным значением напряжения для данного периода

выпрямленного сигнала. Неудачный выбор порога может привести к выделению на периоде нескольких отрезков со своими максимумами, что приведет к неправильному учету остаточного ресурса. Этому случаю соответствует работа способа с неправильно выбранным Порогом 2, когда на периоде будут выделены два отрезка $c - d$ и $e - f$.

Для обеспечения однозначности определения необходимого отрезка выпрямленного сигнала порог нужно выбирать с учетом режимов перенапряжения высоковольтной электрической сети, при которых есть вероятность появления нескольких экстремумов на периоде выпрямленного сигнала. С этой точки зрения наиболее характерным является случай параметрического резонанса, возникающего при включении линии электропередачи на холостой ход. В этом случае напряжение может состоять из суммы синфазных основной и второй гармоник равной амплитуды [37], и выпрямленный сигнал (кривая 2 на рисунке 2.2) имеет два максимума. Для правильного выделения отрезка, содержащего абсолютный максимум на полупериоде сигнала, Порог 1 выбирается выше малой полуволны выпрямленного сигнала.

После выделения необходимого отрезка, способ определяет максимальное значение полупериода сигнала. Поскольку в промежутке между измерениями значение напряжения недоступно, то максимальный отсчет u_0 на выделенном отрезке сигнала, как правило, не соответствует максимальному значению сигнала. Эту проблему неопределенности способ решает путем интерполяции кривой напряжения полиномом с единственным максимумом, проведенным по измеренным значениям напряжения. Для этого определяется максимальный отсчет на выделенном отрезке, а затем заданное число отсчетов слева и справа от него. Через эти отсчеты проводят интерполяционную кривую и принимают ее максимум u_{\max} за абсолютное максимальное значение электрического напряжения на полупериоде.

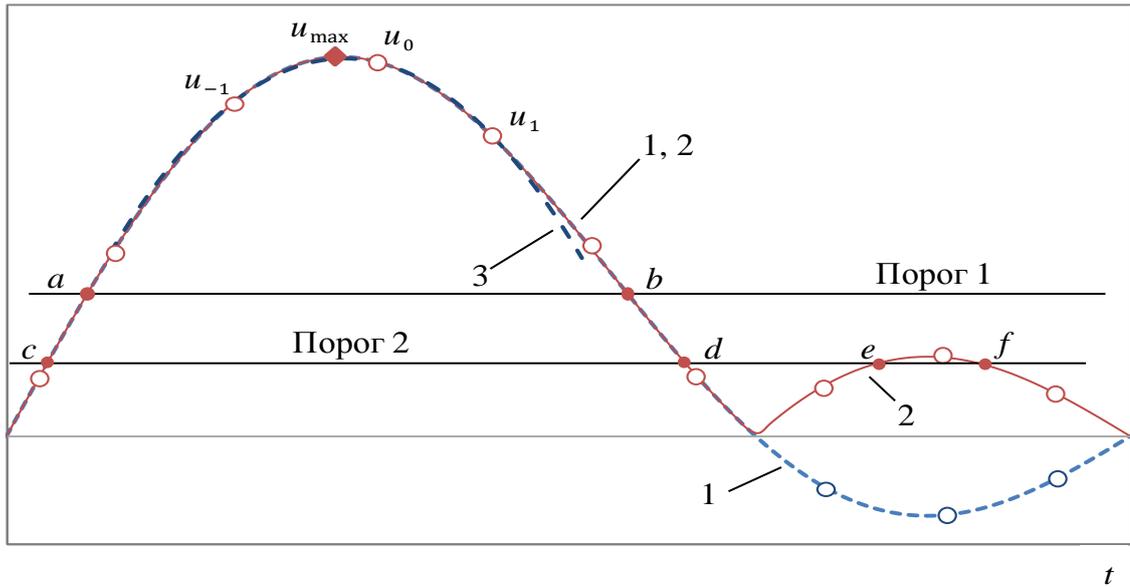


Рисунок 2.2 – Работа способа (патент РФ № 2525832) при периодическом несинусоидальном напряжении, содержащем синфазные основную и вторую гармоники равной амплитуды (показан полупериод напряжения): 1 – сигнал напряжения, 2 – выпрямленный сигнал напряжения, 3 – интерполяционная кривая, максимальное значение u_{\max} отмечено ромбиком

Требование единственности максимума накладывает на выбор интерполяционного полинома ограничение, заключающийся в том, что порядок полинома должен быть четным. Минимальный порядок такого полинома равен 2; в этом случае берут по одному отсчету слева и справа от отсчета с максимальным значением и проводят через упомянутые отсчеты интерполяционную кривую второго порядка – параболу.

Коэффициенты полинома проще всего искать как коэффициенты многочлена в форме Лагранжа [17, 21]. В этом случае многочлен, проходящий через отсчет с максимальным значением u_0 и отсчеты слева u_{-1} и справа u_1 от него (кривая 3 на рисунке 2.2), приводится к следующему виду:

$$u(t) = t^2 \frac{\frac{u_{-1}}{2} - u_0 + \frac{u_1}{2}}{T_s^2} + t \frac{u_1 - u_{-1}}{2T_s} + u_0,$$

где T_s – интервал между измерениями напряжения (период дискретизации). Поэтому парабола

$$u(t) = at^2 + bt + c,$$

будет определяться следующими коэффициентами:

$$a = \frac{u_{-1} - 2u_0 + u_1}{2T_s^2};$$

$$b = \frac{u_1 - u_{-1}}{2T_s};$$

$$c = u_0.$$

При определении коэффициентов принято, что отсчёту с максимальным значением u_0 соответствует $t = 0$ и $u_0 = u(t = 0)$.

Момент времени, соответствующий максимуму параболы, равен:

$$t_{\max} = \frac{T_s}{2} \frac{u_{-1} - u_1}{u_{-1} - 2u_0 + u_1}.$$

Подставляя t_{\max} в уравнение параболы с известными коэффициентами a , b , c , определяется единственное максимальное значение интерполяционной кривой второго порядка:

$$\hat{u}_{\max} = u_0 - \frac{(u_{-1} - u_1)^2}{8(u_{-1} - 2u_0 + u_1)}. \quad (2.1)$$

Его величина принимается за абсолютное максимальное значение электрического напряжения (рисунок 2.2).

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять максимальное значение сигнала (в общем случае несинусоидального) на каждом полупериоде напряжения по отсчётам, измеренным в равномерные моменты времени.

2.3 ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Сравним предлагаемый способ со способом оценки максимального значения непосредственно по максимальному отсчету, принимая за критерий сравнения точность оценки.

Относительную погрешность оценки максимального значения кривой напряжения будем определять по следующему выражению:

$$\delta = \frac{\Delta u}{u_{\max}} 100\%,$$

где абсолютная погрешность

$$\Delta u = u_{\max} - \hat{u}_{\max}, \quad (2.2)$$

где u_{\max} и \hat{u}_{\max} – максимальное значение кривой напряжения и его оценка.

При оценке максимального значения по наибольшему отсчету выявляется наибольший из отсчетов выпрямленного сигнала. На рисунке 2.3 ему соответствует отсчет u_0 , т.е. $\hat{u}_{\max} = u_0$. Величина абсолютной погрешности согласно (2.2)

$$\Delta u = u_{\max} - u_0 \quad (2.3)$$

зависит от расположения отсчета u_0 относительно максимума u_{\max} .

Величина ошибки Δu в предлагаемом способе определяется также из (2.2) с учетом выражения для оценки \hat{u}_{\max} (2.1):

$$\Delta u = u_{\max} - u_0 + \frac{(u_{-1} - u_1)^2}{8(u_{-1} - 2u_0 + u_1)}. \quad (2.4)$$

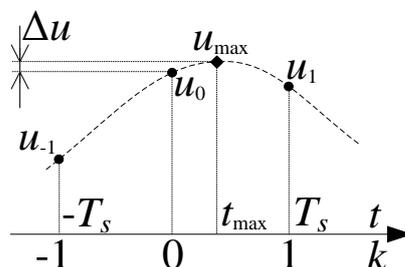


Рисунок 2.3 – Оценка максимального значения кривой напряжения по отсчетам цифрового сигнала

Оценку точности алгоритмов будем производить при обработке синусоидального сигнала и сигнала при параметрическом резонансе. Будем полагать, что максимальный отсчет u_0 находится в точке при $t = 0$. Меняя положение максимума кривой напряжения u_{\max} в диапазоне времени $t_{\max} \in [-T_s; T_s]$ (рисунок 2.3), по выражениям (2.3) и (2.4) определим погрешности алгоритмов.

Как видно из рисунка 2.4, при синусоидальном сигнале погрешность предлагаемого способа в 54 раза меньше, чем при оценке максимального значения непосредственно по наибольшему отсчету, но в то же время, относительная погрешность оценки максимального значения по наибольшему отсчету не превышает 1,2%, что приемлемо для алгоритмов РЗ и А. При обработке сигнала параметрического резонанса погрешность предлагаемого способа уже будет только в 6 раз меньше, чем погрешность способа оценки по наибольшему отсчету. Однако относительная погрешность противопоставляемого способа будет около 5%, что уже достаточно велико. Предлагаемый способ позволяет достаточно точно оценить максимальное значение, его погрешность меньше 1% при параметрическом резонансе. Следовательно, интерполяционная кривая второго порядка, используемая предлагаемым способом, вполне удовлетворительно подходит для аппроксимации кривой в области максимума (рисунок 2.6).

При обработке сигнала параметрического резонанса кривая ошибки предлагаемого способа имеет скачки при t_{\max} , близком к величинам $\pm 0,5T_s$ (рисунок 2.5). Такой характер изменения кривой можно объяснить следующим образом. В точках t_{\max} близком к величинам $\pm 0,5T_s$ происходит смена положения отсчетов u_{-1} , u_0 и u_1 в анализируемой группе. При этом происходит скачкообразное изменение закономерности изменения ошибки, обусловленной тем, что новая группа отсчетов находится в другой части несимметричной кривой сигнала параметрического резонанса.

Количественная оценка влияния ошибки контролируемой величины на оценку остаточного ресурса изоляции дана в четвертой главе настоящей работы.

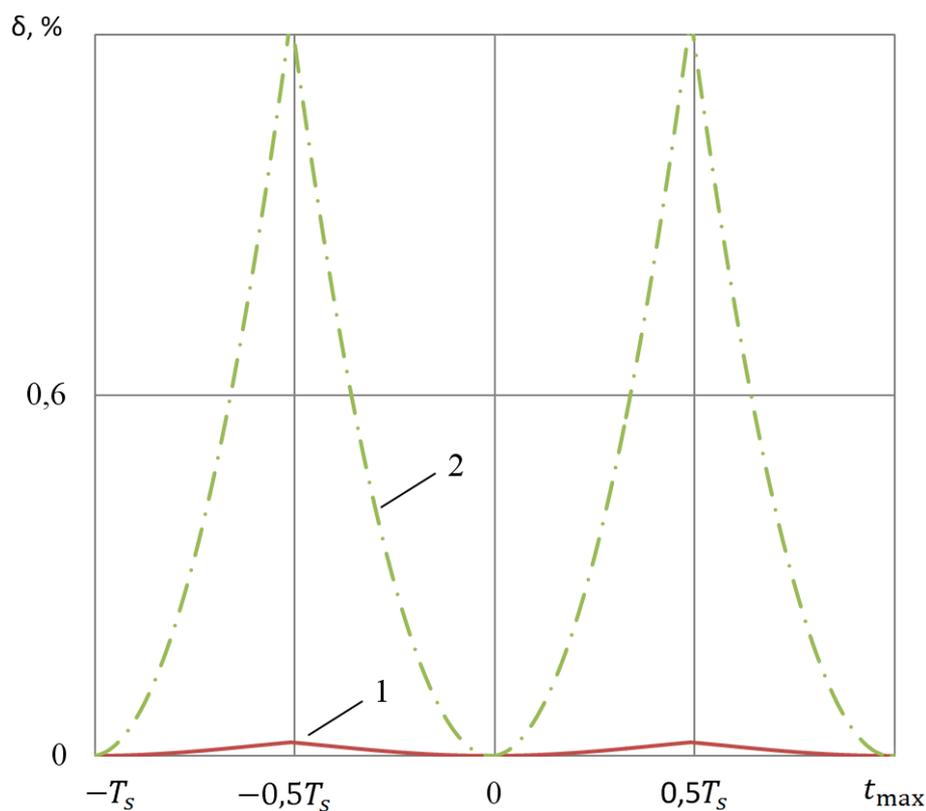


Рисунок 2.4 – Ошибка оценки максимального значения синусоидального сигнала ($f_s = 1000$ Гц):
1 – предлагаемым способом (патент РФ № 2525832), 2 – по максимальному отсчету

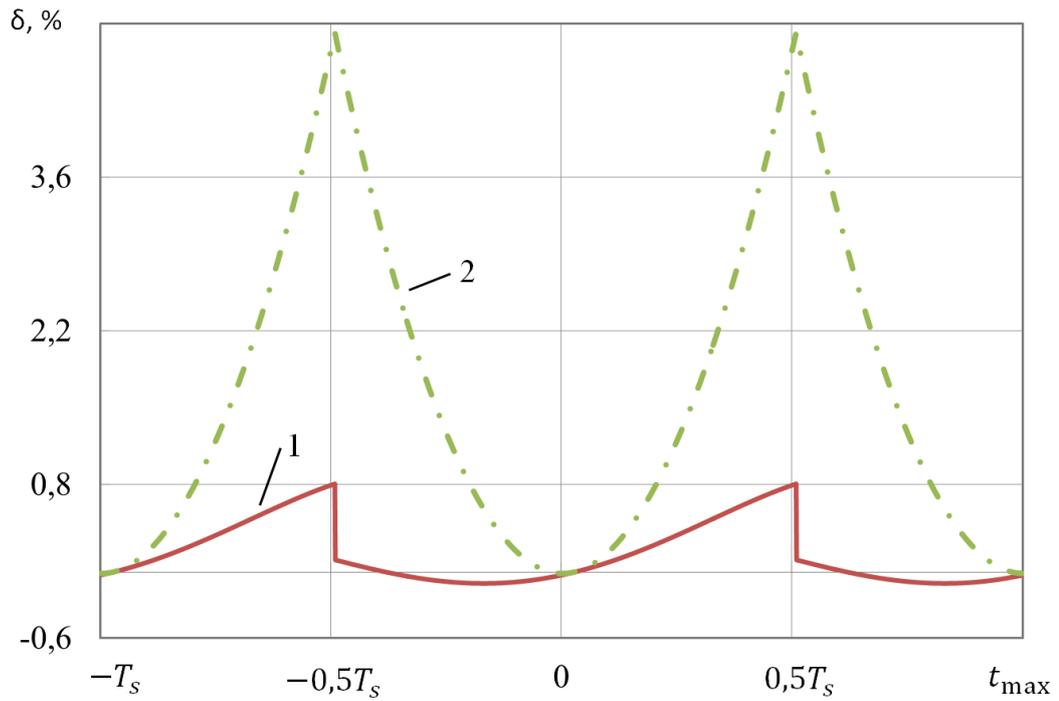


Рисунок 2.5 – Погрешность оценки максимального значения сигнала параметрического резонанса на второй гармонике ($f_s = 1000$ Гц): 1 – предлагаемым способом (патент РФ № 2525832), 2 – по максимальному отсчету

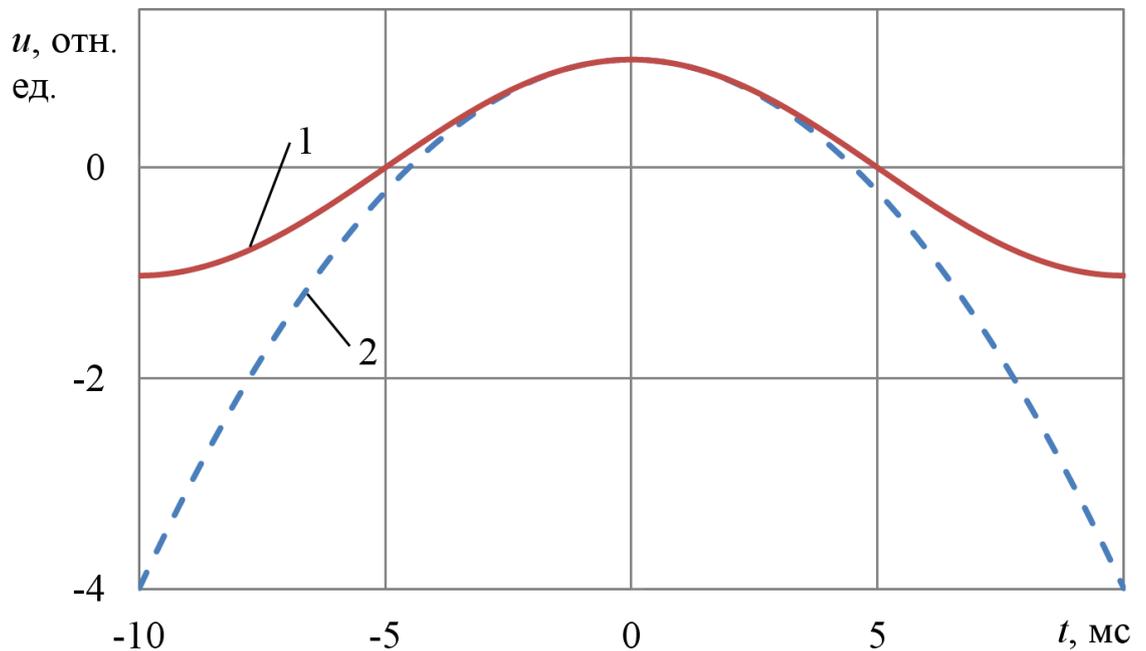


Рисунок 2.6 – Аппроксимация синусоидальной кривой в области максимума: 1 – синусоидальный сигнал, 2 – интерполяционная кривая второго порядка (предлагаемый способ, патент РФ № 2525832)

2.4 ОГРАНИЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОГО СПОСОБА ОЦЕНКИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Проанализируем характеристики классического способа оценки действующего значения сигнала с точки зрения точности.

В качестве меры точности примем относительную погрешность оценки действующего значения напряжения

$$\delta = \frac{|\Delta U|}{U} 100\%, \quad (2.5)$$

где абсолютная погрешность

$$\Delta U = U - \hat{U},$$

представляет собой разность между истинным значением U и его оценкой \hat{U} .

Анализ точности способа будем вести в режиме с синусоидальным напряжением с отклонением частоты от номинальной электрической сети и в режиме параметрического резонанса. В обоих случаях будем рассматривать отклонение частоты до 12 Гц [20].

Известно [5], что квадрат действующего значения $U^2(k)$ периодического сигнала $u(k)$ в текущий момент времени k определяется по отсчетам сигнала как

$$\hat{U}^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u^2(m), \quad (2.6)$$

где N – число отсчетов на периоде сигнала $u(k)$.

Как видно из (2.6), классическое определение действующего значения включает в себя операцию возведения в квадрат и операцию усреднения (рисунок 2.7).

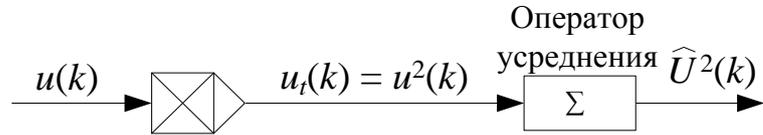


Рисунок 2.7 – Блок-схема классического способа оценки действующего значения

Для удобства изложения материала сигнал на выходе квадратора будем называть промежуточным и обозначим как

$$u_t(k) = u^2(k).$$

В случае режима сети с синусоидальным напряжением

$$u(k) = A_1 \sin(k\omega_1 T_s + \psi),$$

где ω_1 – частота, ψ – начальная фаза, промежуточный сигнал $u_t(k)$

$$u_t(k) = U^2 + u_a(k) \quad (2.7)$$

будет содержать постоянную составляющую, равную квадрату действующего значения напряжения

$$U^2 = \left(\frac{A_1}{\sqrt{2}} \right)^2, \quad (2.8)$$

и переменную составляющую

$$u_a(k) = -\frac{1}{2}A_1^2 \cos(k2\omega_1 T_s + 2\psi), \quad (2.9)$$

подлежащую удалению.

В классическом способе удаление переменной составляющей достигается усреднением промежуточного сигнала $u_t(k)$ на периоде основной гармоники измеряемого напряжения:

$$\hat{U}^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u_t(m). \quad (2.10)$$

Тогда с учетом (2.7) оценку действующего значения (2.10) можно представить как

$$\hat{U}^2(k) = H_{\Sigma}\{U^2\} + H_{\Sigma}\{u_a(k)\}, \quad (2.11)$$

где H_{Σ} – оператор усреднения с АФЧХ

$$H_{\Sigma}(j\omega T_s) = \frac{1}{N} \left(1 + \sum_{k=1}^{N-1} e^{-jk\omega T_s} \right). \quad (2.12)$$

Число отсчетов N в операторе усреднения выбирается таким образом, чтобы при номинальной частоте сети ω_{1n} период сигнала $u(k)$

$$T = NT_s.$$

Так как период $T = \frac{2\pi}{\omega_{1n}}$, то $N = 2\pi/(\omega_{1n}T_s)$. Тогда при $\omega_1 = \omega_{1n}$ слагаемая (2.9) будет подавлена оператором усреднения (2.10) полностью. Это следует непосредственно из АЧХ оператора усреднения $H_{\Sigma}(\omega T_s)$ (рисунок 2.8), согласно

которой коэффициент усиления составляющей на двойной номинальной частоте (нормированная частота $2\omega_{1n}T_s = 0,52$) равен нулю. Однако отклонение частоты сети от номинального значения ω_{1n} ухудшает подавляющие свойства оператора усреднения (2.10), в связи с чем в оценке действующего значения появляется смещение. В силу особенностей АЧХ оператора (2.10) наибольшая погрешность возникает при снижении частоты.

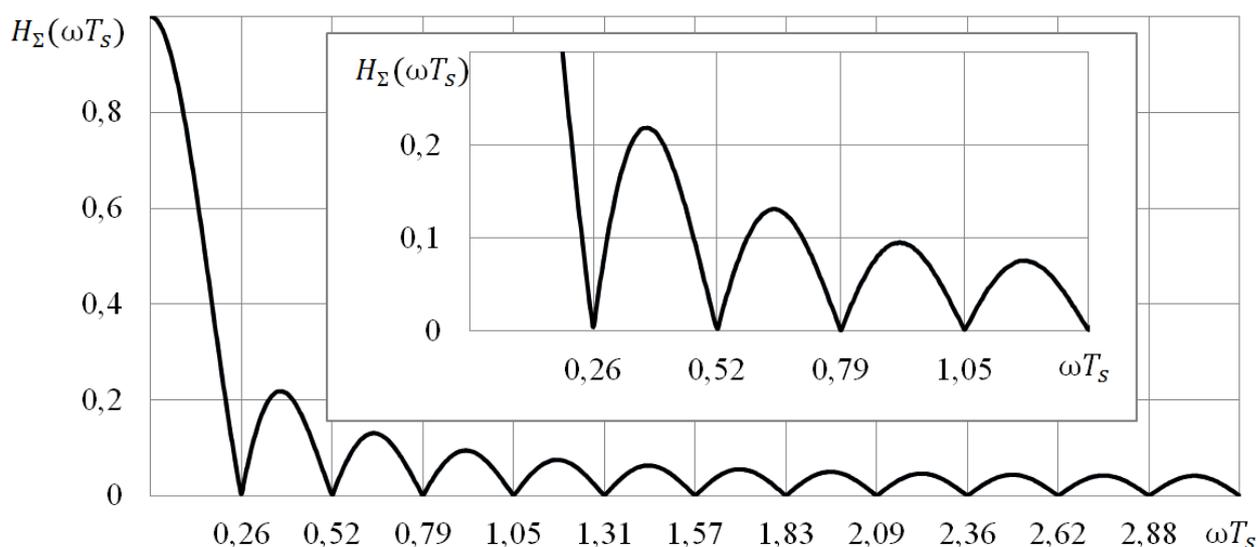


Рисунок 2.8 – АЧХ оператора усреднения классического способа оценки действующего значения напряжения при $N = 24$

Как следует из рисунка 2.8, $H_{\Sigma}\{U^2\} = U^2$. Тогда с учетом (2.11), (2.9) и (2.8) относительная погрешность будет

$$\delta(k) = \left| 1 - \sqrt{1 - H_{\Sigma}(2\omega_1 T_s) \cos[k2\omega_1 T_s + \arg\{H_{\Sigma}(j2\omega_1 T_s)\}]} \right| 100\%. \quad (2.13)$$

Ошибка $\delta(k)$ изменяется во времени (рисунок 2.9). В случае снижения частоты сети до 45 Гц [58] погрешность оценки действующего значения немногим больше 5%, а при снижении до 38 Гц уже достигает 11%.

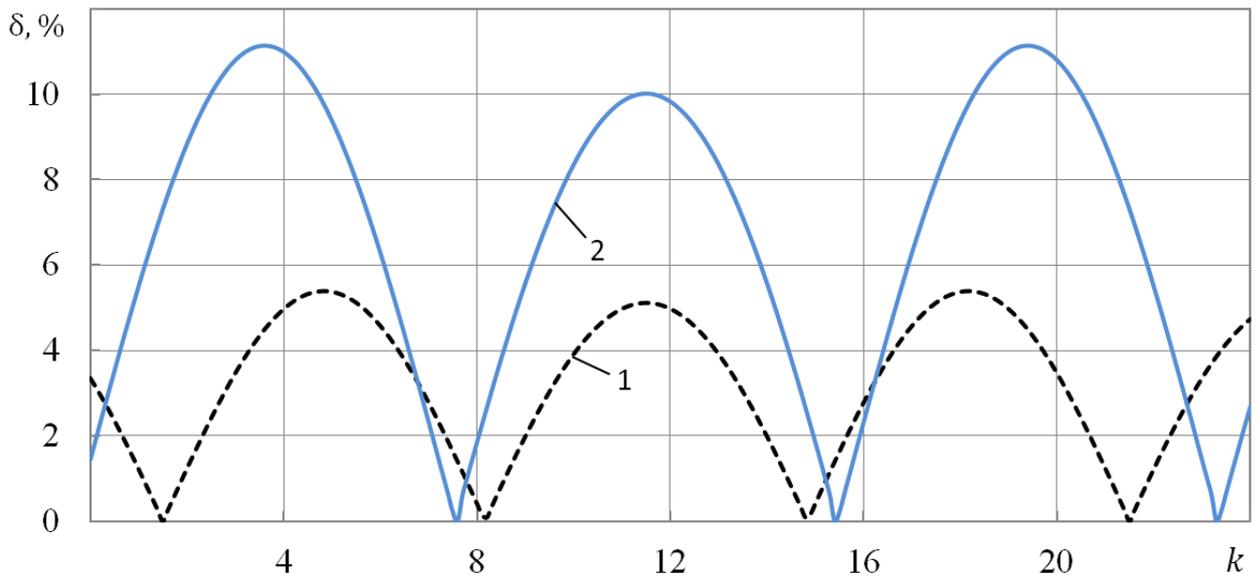


Рисунок 2.9 – Кривая изменения ошибки $\delta(k)$ (2.13) на периоде основной гармоники номинальной частоты ($N = 24$): 1 – $f_1 = 45$ Гц, 2 – $f_1 = 38$ Гц

Параметрический резонанс на второй гармонике является наиболее сложным для функционирования цифровой системы АОПН. В этом случае входной сигнал будет включать, помимо основной гармоники частоты ω_1 , вторую гармонику частоты $2\omega_1$:

$$u(k) = A_1 \sin(k\omega_1 T_s) + A_2 \sin(k2\omega_1 T_s).$$

Как и в предыдущем случае, промежуточный сигнал $u_t(k)$ будет содержать в себе постоянную составляющую, равную квадрату действующего значения напряжения,

$$U^2 = \left(\frac{A_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{\sqrt{2}}\right)^2, \quad (2.14)$$

и переменную составляющую

$$u_a(k) = -\frac{1}{2}A_1^2 \cos(k2\omega_1 T_s) - \frac{1}{2}A_2^2 \cos(k4\omega_1 T_s) + A_1 A_2 [\cos(k\omega_1 T_s) - \cos(k3\omega_1 T_s)]. \quad (2.15)$$

При номинальной частоте $\omega_1 = \omega_{1n}$ слагаемые (2.15) будут подавлены оператором усреднения (2.10) полностью, поскольку его коэффициенты усиления на нормированных частотах $\omega_{1n}T_s = 0,26$, $2\omega_{1n}T_s = 0,52$, $3\omega_{1n}T_s = 0,79$ и $4\omega_{1n}T_s = 1,05$ равны нулю. Однако отклонение частоты сети от номинального значения ω_{1n} вызовет смещение в оценке действующего значения.

Погрешность оценки действующего значения определяется аналогично предыдущему случаю. В наиболее тяжелом случае параметрического резонанса $A_1 = A_2$. Рассматривая совместно (2.11), (2.14) и (2.15), относительная погрешность будет определяться как

$$\delta(k) = |1 - \sqrt{1 + \theta_1(k) + \theta_2(k) + \theta_3(k) + \theta_4(k)}|100\%, \quad (2.16)$$

где $\theta_1(k) = H_\Sigma(\omega_1 T_s) \cos[k\omega_1 T_s + \arg\{H_\Sigma(j\omega_1 T_s)\}]$;

$$\theta_2(k) = -\frac{1}{2} H_\Sigma(2\omega_1 T_s) \cos[k2\omega_1 T_s + \arg\{H_\Sigma(j2\omega_1 T_s)\}]; \quad (2.17)$$

$$\theta_3(k) = -H_\Sigma(3\omega_1 T_s) \cos[k3\omega_1 T_s + \arg\{H_\Sigma(j3\omega_1 T_s)\}];$$

$$\theta_4(k) = -\frac{1}{2} H_\Sigma(4\omega_1 T_s) \cos[k4\omega_1 T_s + \arg\{H_\Sigma(j4\omega_1 T_s)\}].$$

Анализ ошибки (2.16) показывает, что в случае снижения частоты сети до 45 Гц, относительная погрешность оценки действующего значения напряжения достигает 11% (рисунок 2.10). Уменьшение частоты сети до 38 Гц приводит к возникновению погрешности около 17% (рисунок 2.10).

Таким образом, классический способ оценки действующего значения не обеспечивает необходимого уровня точности измерений в режимах работы цифровой системы АОПН. В связи с этим, в следующих разделах настоящей работы рассматриваются теоретические вопросы повышения точности оценки действующего значения напряжения.

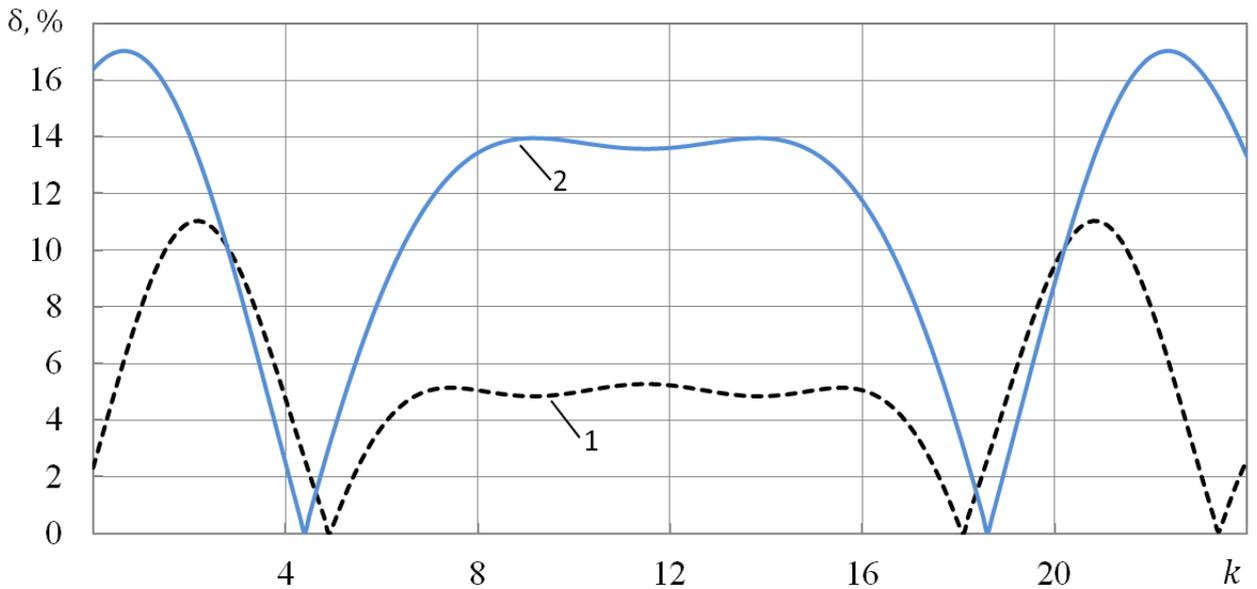


Рисунок 2.10 – Кривая изменения ошибки $\delta(k)$ (2.16) на периоде основной гармоники номинальной частоты ($N = 24$): $1 - f_1 = 45$ Гц, $2 - f_1 = 38$ Гц

2.5 НОВЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Оценка действующего значения напряжения должна отвечать равенству Ляпунова (эквивалент теоремы Парсеваля для периодических сигналов) [27], согласно которому квадрат действующего значения электрической величины определяется суммой квадратов действующих значений ее гармоник:

$$\hat{U}^2 = U_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^M U_n^2.$$

В зарубежной литературе такое определение действующего значения (действующего значения периодического несинусоидального сигнала) иногда называют как true RMS [64].

В оценке действующего значения по классическому способу при отклонении частоты сети от номинальной, как уже было показано в параграфе 2.4, появляется смещение, вызванное недостаточным подавлением составляющих

суммарной и разностной частот. Поэтому возникает задача ослабления паразитных составляющих суммарных и разностных частот до уровня, обеспечивающего необходимые метрологические характеристики измерения действующего значения сигнала напряжения.

В настоящей работе предлагается ввести в процедуру определения действующего значения дополнительные преобразования промежуточного сигнала $u_t(k)$. С этой целью при реализации формулы (2.10) могут быть использованы различные фильтры, включаемые между квадратором и оператором усреднения (рисунок 2.11). Фильтр должен обеспечивать подавление составляющих суммарной и разностной частот. Особенность этих фильтров будет заключаться в их АЧХ, оптимально подобранной для подавления составляющих, возникающих в промежуточном сигнале в режиме параметрического резонанса на второй гармонике с учетом отклонения частоты сети. Как видно из (2.15), в переменной составляющей $u_a(k)$ промежуточного сигнала $u_t(k)$ преобладают первая и третья гармоники. Поэтому фильтры должны иметь значительное подавление этих составляющих с учетом возможного отклонения частоты.

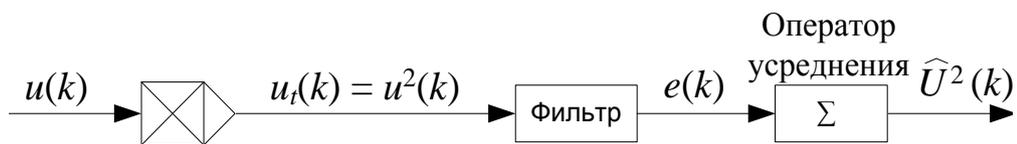


Рисунок 2.11 – Блок-схема предлагаемого способа оценки действующего значения (патент РФ № 2521745)

Эффективное значение $\hat{U}(k)$ сигнала $u(k)$ (действующее значение) в этом случае определяется как

$$\hat{U}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k e(m)}, \quad (2.18)$$

где $e(m)$ – выходной сигнал фильтра.

Рассматривалось использование фильтров наиболее простых с точки зрения реализации в цифровой системе АОПН. Этому критерию отвечают фильтры [4], подавляющие нечетные гармоники:

$$e(k) = \frac{1}{2} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) \right] \quad (2.19)$$

и

$$e(k) = \frac{1}{4} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{6}\right) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) + u_t\left(k - \frac{2N}{3}\right) \right]. \quad (2.20)$$

Как показывает сравнение АЧХ (рисунок 2.12) фильтров (2.19)

$$H_1(\omega T_s) = \left| \frac{1 + e^{-j\frac{N}{2}\omega T_s}}{2} \right| = |\cos(N\omega T_s/4)|,$$

и (2.20)

$$\begin{aligned} H_2(\omega T_s) &= \left| \frac{1 + e^{-j\frac{N}{6}\omega T_s} + e^{-j\frac{N}{2}\omega T_s} + e^{-j\frac{2N}{3}\omega T_s}}{4} \right| = \left| \frac{\left(1 + e^{-j\frac{N}{2}\omega T_s}\right)\left(1 + e^{-j\frac{N}{6}\omega T_s}\right)}{2} \right| = \\ &= 2H_1(\omega T_s) |\cos(N\omega T_s/12)|, \end{aligned}$$

фильтр (2.20) обладает лучшими подавляющими свойствами на четных гармониках.

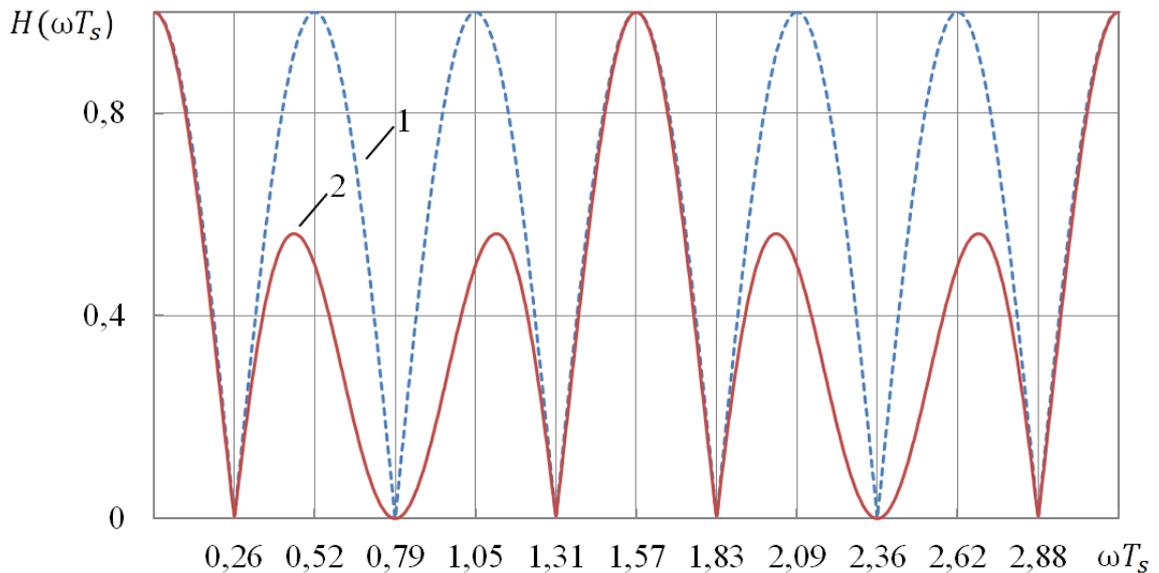


Рисунок 2.12 – АЧХ фильтров: 1 – фильтр (2.19); 2 – (2.20). Фильтр (2.20) подавляет четные гармоники два раза лучше, чем фильтр (2.19)

Фильтры (2.19) и (2.20) используются для дополнительного преобразования промежуточного сигнала $u_t(k)$. После чего он подвергается усреднению фильтром-сумматором (рисунок 2.11).

С учетом АЧХ сумматора (2.12) АЧХ результирующего фильтра примет следующий вид:

$$H_e(\omega T_s) = H_i(\omega T_s)H_\Sigma(\omega T_s), \quad (2.21)$$

где $i = 1$ или 2 .

АЧХ результирующего фильтра $H_e(\omega T_s)$ имеет седловидный характер в области частот первой и третьей гармоник, что, как уже отмечалось, особенно ценно при подавлении переменной составляющей в (2.15), возникающей при параметрическом резонансе. Однако результирующий фильтр при использовании фильтра (2.20) обладает лучшими подавляющими свойствами (рисунок 2.13), чем при фильтре (2.19). Он превосходит по подавляющим свойствам, как в области частот ниже 50 Гц, так и в остальной части частотного спектра. В то же время седловидность АЧХ фильтра в области частоты первой и третьей гармоники имеет более выраженный характер.

Таким образом, при обработке сигнала параметрического резонанса наилучшим с точки зрения подавления паразитных составляющих в промежуточном сигнале $u_t(k)$ является фильтр (2.20).

Фильтр (2.20) рассчитан на использование в цифровой системе с частотой дискретизации, кратной 6. Однако в современных микропроцессорных устройствах РЗ и А используются и частоты дискретизации, не кратные 6. Например, для функционирования в цифровой среде устройств согласно стандарту IEC61850 [76] частота дискретизации f_s должна быть кратна 1000 Гц. Поэтому фильтр (2.20) должен быть адаптирован для использования при N , некратных 6. Фильтр (2.20), трансформированный для частот дискретизации, кратных 20, будет следующим:

$$e(k) = \frac{1}{4} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{4}\right) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) + u_t\left(k - \frac{3N}{4}\right) \right]. \quad (2.22)$$

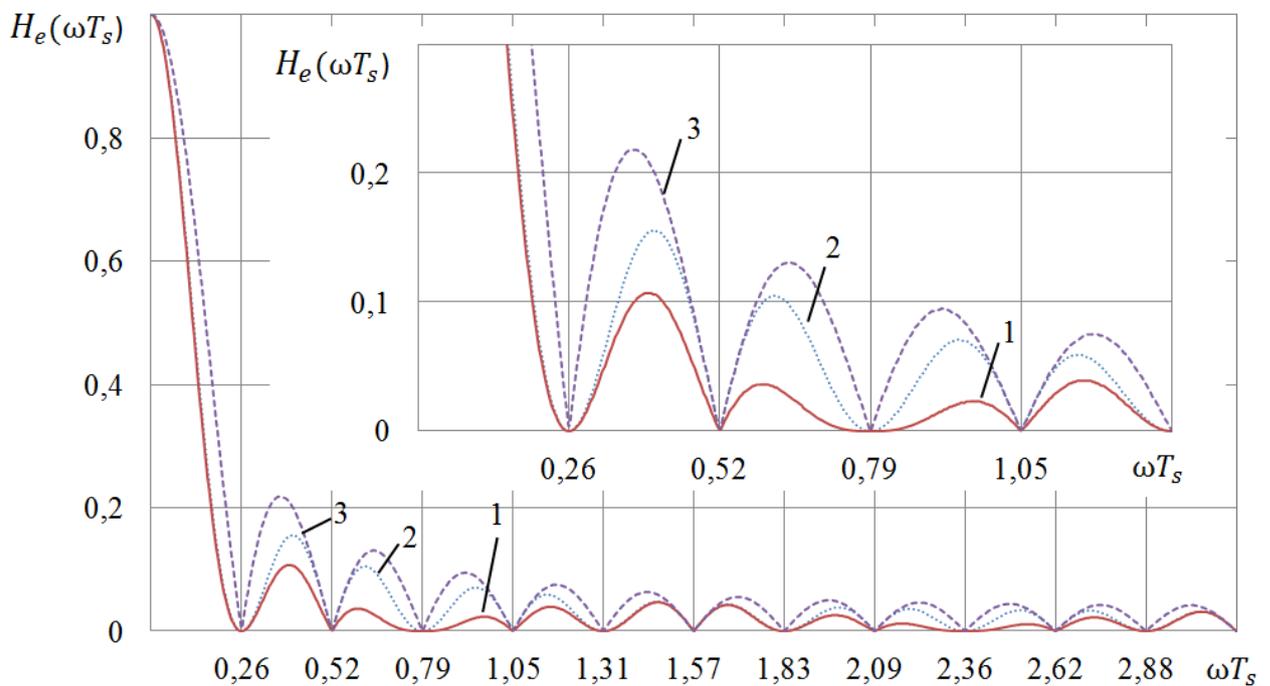


Рисунок 2.13 – АЧХ результирующего фильтра: 1 – при использовании фильтра (2.20); 2 – при фильтре (2.19); 3 – без фильтра (АЧХ оператора усреднения)

Как видно из АЧХ результирующего фильтра (рисунок 2.13), наибольшая погрешность выделения постоянной составляющей из промежуточного сигнала

$u_t(k)$ возникает при отклонении частоты в сторону ее уменьшения из-за резкого роста АЧХ результирующего фильтра при частотах ниже 50 Гц. Поэтому необходимо предпринять специальные меры, чтобы АЧХ в левой области около 50 Гц (в пределах частот $38 \div 50$ Гц) имела участок с более глубоким подавлением.

С этой целью в работе предлагается специальный фильтр

$$e(k) = \frac{1}{4} \left[u_t(k) + u_t\left(k - \frac{N}{4}\right) + u_t\left(k - \frac{N}{2}\right) + u_t\left(k - \frac{4N}{5}\right) \right] \quad (2.23)$$

со смещением частот наибольшего подавления влево по оси. Хотя фильтр (2.23) не обеспечивает полного подавления гармоник (рисунок 2.14), но, благодаря подавляющим свойствам оператора усреднения (2.10), как видно из АЧХ (рисунок 2.15), результирующий фильтр будет свободен от этого недостатка.

Для работы предлагаемого способа не важно, богат ли сигнал высшими гармониками или содержит лишь составляющую основной гармоники. Предпринимаемые алгоритмом действия будут инвариантны на множестве предусмотренных в нем операций.

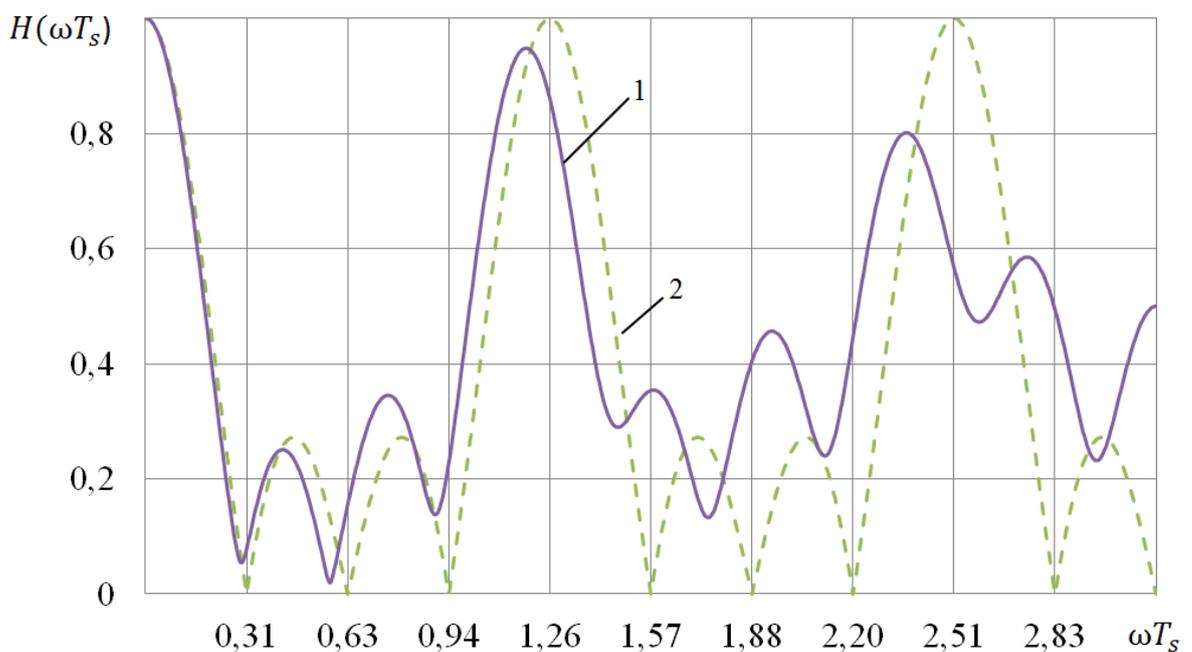


Рисунок 2.14 – АЧХ фильтров: 1 – (2.23), 2 – (2.22)

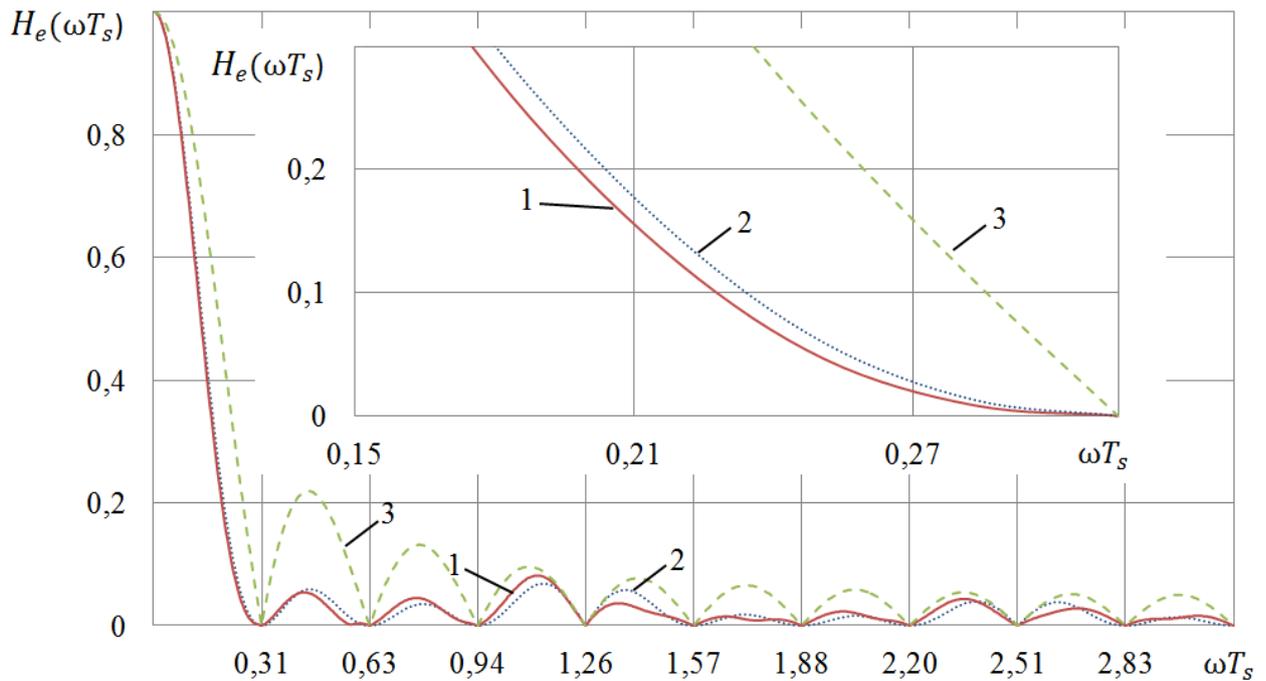


Рисунок 2.15 – АЧХ результирующего фильтра: 1 – при использовании фильтра (2.23); 2 – при фильтре (2.22); 3 – без фильтра (АЧХ оператора усреднения)

2.6 ТОЧНОСТЬ НОВОГО СПОСОБА ОЦЕНКИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ

Оценку ошибки нового способа при синусоидальном сигнале и при параметрическом резонансе будем определять по формуле (2.13) и (2.16), соответственно, принимая вместо АЧХ $H_{\Sigma}(\omega T_s)$ оператора усреднения АЧХ $H_e(\omega T_s)$ результирующего фильтра (2.21).

Повышение точности (по сравнению с классическим методом) оценки действующего значения напряжения достигается за счет лучших подавляющих свойств нового (предлагаемого) способа (таблицы 2.1, 2.2).

Таблица 2.1 – Сравнение подавления переменных составляющих, возникающих при параметрическом резонансе ($f_s = 1000$ Гц)

№ гармоники	Частота составляющей, Гц	Коэффициент усиления АЧХ классического способа, $H_{\Sigma}(\omega T_s)$	Коэффициент усиления АЧХ предлагаемого способа, $H_e(\omega_1 T_s)$	$\frac{H_{\Sigma}(\omega T_s)}{H_e(\omega_1 T_s)}$
1	38	0,287	0,072	3,99
2	76	0,21	0,045	4,67
3	114	0,11	0,036	3,06
4	152	0,013	$3,746 \cdot 10^{-3}$	3,47

Таблица 2.2 – Сравнение подавления переменных составляющих, возникающих при параметрическом резонансе ($f_s = 1200$ Гц)

№ гармоники	Частота составляющей, Гц	Коэффициент усиления АЧХ классического способа, $H_{\Sigma}(\omega T_s)$	Коэффициент усиления АЧХ предлагаемого способа, $H_e(\omega_1 T_s)$	$\frac{H_{\Sigma}(\omega T_s)}{H_e(\omega_1 T_s)}$
1	38	0,287	0,097	2,96
2	76	0,21	0,107	1,96
3	114	0,11	0,036	3,06
4	152	0,013	$1,772 \cdot 10^{-5}$	733,63

Анализ ошибки $\delta(k)$ показывает, что

1. Погрешность оценки новым алгоритмом действующего значения напряжения при параметрическом резонансе (при отклонении частоты сети на 12 Гц) – в режиме, отмеченном для АОПН как самый тяжёлый, – не превышает 5% при $f_s = 1000$ Гц и порядка 10% при $f_s = 1200$ Гц (рисунок 2.16). Таким образом, разработанный метод позволяет снизить погрешность в 3 и почти в 2 раза, соответственно, по сравнению с классическим способом.

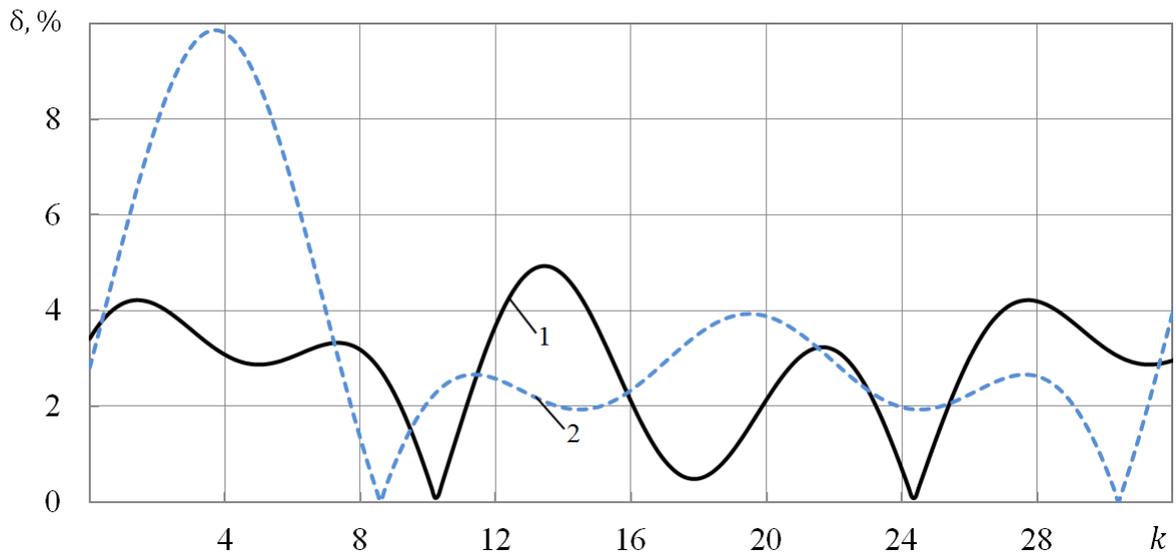


Рисунок 2.16 – Кривая изменения ошибки $\delta(k)$ при параметрическом резонансе ($f_1 = 38$ Гц):
 1 – $f_s = 1000$ Гц, 2 – $f_s = 1200$ Гц

2. В режиме отклонения частоты сети от номинального значения на 5 Гц при параметрическом резонансе погрешность оценки действующего значения не превышает 3.7% при $f_s = 1000$ Гц и 3.2% при $f_s = 1200$ Гц (рисунок 2.17).

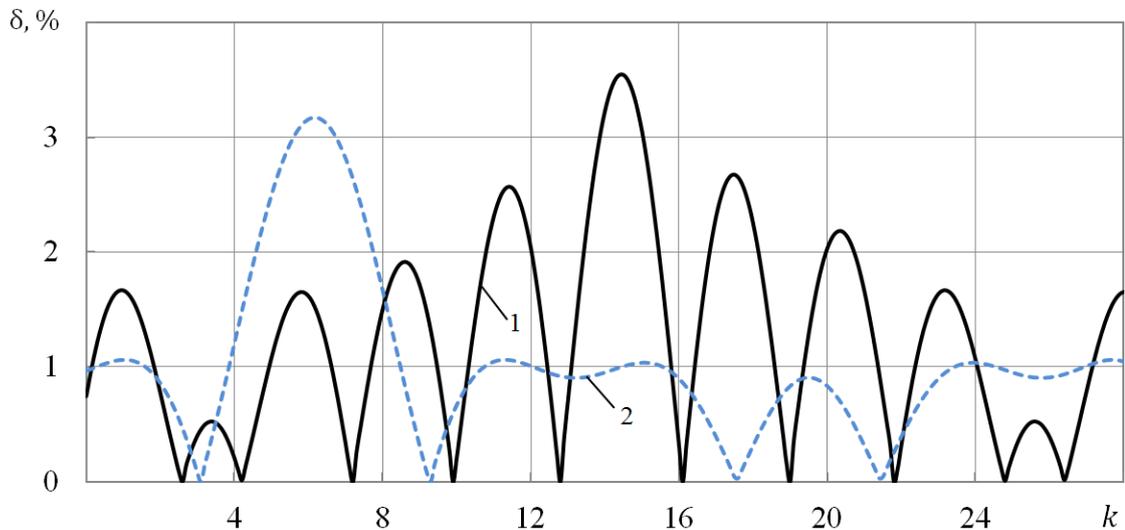


Рисунок 2.17 – Кривая изменения ошибки $\delta(k)$ при параметрическом резонансе ($f_1 = 45$ Гц):
 1 – $f_s = 1000$ Гц, 2 – $f_s = 1200$ Гц

3. В режиме отклонения частоты сети от номинального значения на 12 Гц погрешность оценки действующего значения синусоидального сигнала не превышает 2.3% при $f_s = 1000$ Гц и 5.5% при $f_s = 1200$ Гц (рисунок 2.18).

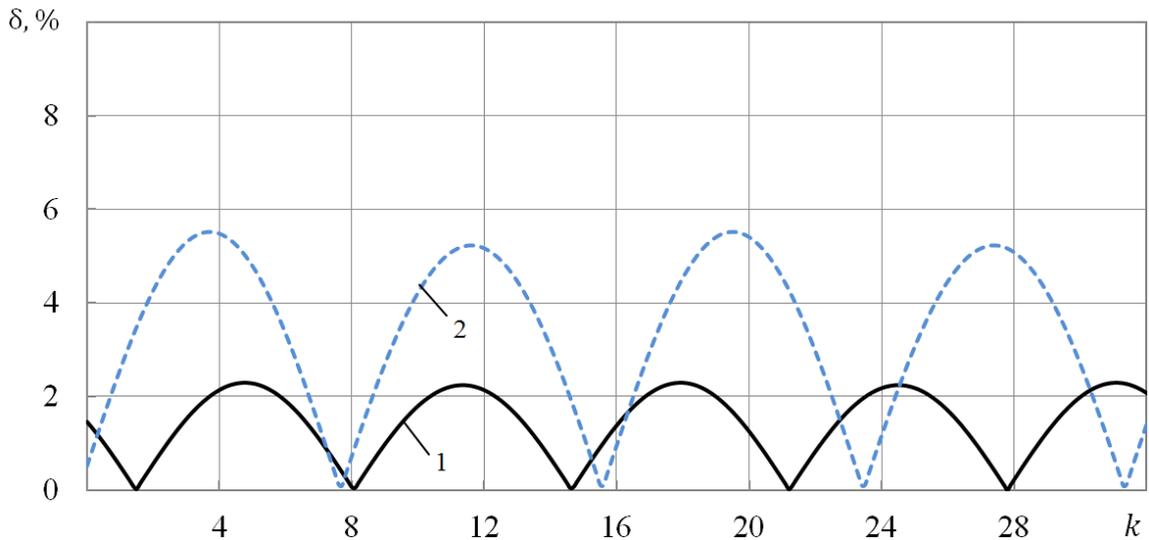


Рисунок 2.18 – Кривая изменения ошибки $\delta(k)$ при синусоидальном сигнале ($f_1 = 38$ Гц):
 1 – $f_s = 1000$ Гц, 2 – $f_s = 1200$ Гц

4. В режиме отклонения частоты сети от номинального значения на 5 Гц погрешность оценки действующего значения синусоидального сигнала не превышает 1.3% при $f_s = 1000$ Гц и 3% при $f_s = 1200$ Гц.

ВЫВОДЫ:

1. Предложены новые способы оценки контролируемых величин (максимального и действующего значения напряжения), превосходящие по точности классические способы оценки. Предложенные способы защищены патентами РФ № 2525832 и 2521745.

2. При параметрическом резонансе с отклонением частоты сети до 12 Гц – в режиме, отмеченном для АОПН как самый тяжёлый, – погрешность оценки предлагаемым в настоящей работе способом максимального значения менее 1% при $f_s = 1000$ Гц, а погрешность оценки действующего значения напряжения не превышает 5% при $f_s = 1000$ Гц.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН

3.1 ДИАГРАММА РАСХОДА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Для задач цифровой системы АОПН удобно рассматривать вольт-временную характеристику (ВВХ) несколько иначе, чем в технике высоких напряжений (ТВН). В ТВН ВВХ определяют обычно как зависимость допустимого уровня перенапряжения γ_n от длительности T_n нахождения изоляции высоковольтного оборудования под этим напряжением (раздел 1.3). При разработке АОПН предпочтительнее определять ее как зависимость допустимого времени T_n нахождения изоляции под перенапряжением γ_n . При известном уровне перенапряжения это позволяет определить по ВВХ интенсивность расхода остаточного ресурса изоляции оборудования.

Используя ВВХ, можно построить *диаграмму расхода остаточного ресурса электрической изоляции* (понятие вводится впервые). Это понятие упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции. Покажем использование диаграммы в цифровой системе АОПН.

Положим, что остаточный ресурс изоляции не расходуется и составляет 1 (отн. ед.). Если высоковольтное оборудование подвергнется перенапряжению γ_n , то ресурс его изоляции будет полностью израсходован за время T_n . Отсюда следует, что интенсивность расхода ресурса изоляции при постоянном уровне перенапряжения γ_n определяется как

$$\Delta_R^{T_n} = \frac{1}{T_n}. \quad (3.1)$$

Диаграмма расхода остаточного ресурса показывает, как меняется остаток

ресурса R изоляции в течение времени действия на изоляцию перенапряжения γ_n (диаграмма, соответствующая ВВХ рисунка 1.4, приведена на рисунке 3.1). Если уровень перенапряжения γ_n не меняется во времени, то, как следует из (3.1), ресурс изоляции уменьшается линейно от 1 до 0 за время T_n . Поэтому диаграмма расхода ресурса R представляет собой семейство прямых, имеющих общее начало в точке $R = 1$ при $T = 0$ и заканчивающихся на пересечении с осью T в точках T_n . Каждая линия дает количественную оценку изменения остаточного ресурса R изоляции во времени при перенапряжении с неизменным заданным уровнем. На рисунке 3.1 сплошные наклонные прямые соответствуют линиям расхода ресурса изоляции при перенапряжениях $\gamma_I \div \gamma_{III}$ (допустимые времена $T_I \div T_{III}$). В дальнейшем линии расхода при перенапряжении неизменного уровня γ_n и соответствующем ему допустимым временем T_n будем обозначать как $\gamma_n(T_n)$.

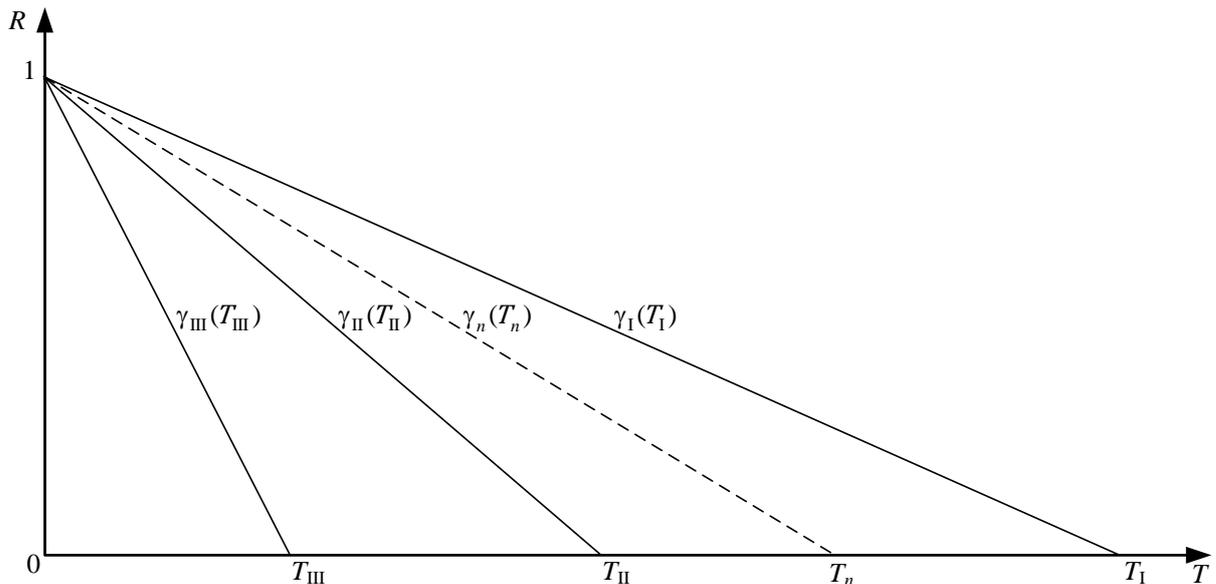


Рисунок 3.1 – Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования

Диаграмма расхода ресурса электрической изоляции используется в разрабатываемой в настоящей работе цифровой системе АОПН для расчета остаточного ресурса электрической изоляции защищаемого высоковольтного оборудования и управления техническими мероприятиями при ликвидации перенапряжения. Нужно отметить, что при реализации цифровой системы АОПН

диаграмма расхода ресурса электрической изоляции не закладывается в настройках АОПН. Она рассчитывается в темпе процесса перенапряжения по ВВХ.

3.2 НОВЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящей работе остаточный ресурс электрической изоляции R_n предлагается определять на каждом полупериоде контролируемой величины путем вычитания из остаточного ресурса предыдущего полупериода R_{n-1} части ресурса ΔR_n текущего n -го полупериода

$$R_n = R_{n-1} - \Delta R_n. \quad (3.2)$$

Часть ресурса ΔR_n , которую теряет изоляция после воздействия напряжения n -го полупериода (характеризуется контролируемой величиной γ_n), находится как отношение продолжительности полупериода напряжения $T_0 = 0,01$ с к величине допустимого времени T_n нахождения изоляции оборудования под напряжением γ_n , то есть

$$\Delta R_n = \frac{T_0}{T_n}.$$

Предложенный способ оценки остаточного ресурса электрической изоляции позволяет повысить точность учета расхода ресурса в зависимости от величины перенапряжения. Также, как это показано в разделах 3.3 и 3.4, позволяет своевременно принять меры, направленные на ограничение, снижение

напряжения или отключение высоковольтного оборудования при перенапряжениях. Это исключает преждевременное отключение защищаемого оборудования, а также необоснованное его оставление под напряжением.

По мнению автора, дальнейшее развитие способов оценки ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования может идти в направлении учета формы воздействующего напряжения [10, 33]. К таким способам, например, можно отнести [52]. Однако в настоящий момент практическое применение таких способов ограничивается отсутствием нормативной технической базы, определяющей правила эксплуатации высоковольтного оборудования при воздействии на него напряжений с различной формой.

3.3 НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЛИКВИДАЦИИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Как уже рассматривалось в разделах 1.3 и 1.6, в зависимости от уровня перенапряжения приводятся в действие различные технические мероприятия, направленные на ликвидацию перенапряжения. При отказе технических мероприятий данной ступени приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени. Решение о вводе в действие технических мероприятий следующей ступени принимается на основе контроля успешности технических мероприятий данной ступени.

В известных в настоящее время системах АОПН для контроля успешности технических мероприятий используется контроль длительности перенапряжения. Это снижает эффективность применения технических мероприятий, особенно в случае перемежающихся перенапряжений, поскольку не учитывается расход ресурса изоляции при предыдущих перенапряжениях. В связи с этим

защищаемое оборудование может быть либо отключено преждевременно, либо, наоборот, необоснованно оставлено под напряжением. В первом случае неверная оценка ресурса приводит к излишнему отключению оборудования, а во втором случае – к его повреждению.

В настоящей работе предлагается новый способ формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий, основанный на непосредственной оценке остаточного ресурса изоляции высоковольтного оборудования (раздел 3.2) и использования диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции (рисунок 3.1). Контроль успешности технических мероприятий ступени осуществляется по уровню остаточного ресурса. Это позволяет повысить гибкость применения технических мероприятий.

В предлагаемом способе учет расхода ресурса изоляции осуществляется согласно ВВХ защищаемого оборудования, благодаря чему интенсивность расхода ресурса изоляции полностью согласуется с текущим уровнем перенапряжения. Это позволяет вводить технические мероприятия следующей ступени в действие вовремя, не допуская ни преждевременного приведения их в действие (исключая недоиспользование ресурсов электрооборудования), ни их запаздывания (предотвращая повреждение оборудования).

Предлагаемый способ может иметь неограниченное число ступеней для управления техническими мероприятиями. Однако с целью упрощения пояснения принципа его работы будем считать, что на ВВХ и диаграмме расхода ресурса технические мероприятия представлены тремя ступенями. Способ в первую очередь и без замедления вводит в действие технические мероприятия той ступени, на которую приходится перенапряжение $\gamma_n(T_n)$. И логика действия ступеней такова, что отказ предпринятых данной ступенью технических мероприятий (отказ оборудования или неэффективность действия) должен привести в действие технические мероприятия следующей ступени.

Рассмотрим вначале работу предлагаемого способа при возникновении перенапряжения невысокого уровня, когда будет задействована первая ступень. Как уже указывалось в разделе 1.3, в этом случае способ приводит в действие

технические мероприятия невысокого быстродействия, связанные с изменением напряжения с помощью переключения РПН и т.п. Если по каким-либо причинам они не сработают (отказ оборудования или предпринятые меры оказались не эффективными), то способ должен привести в действие техническое мероприятие следующей ступени. В данном случае ими будут технические мероприятия второй ступени.

Для контроля успешности технических мероприятий используется признак их отказа. За признак отказа технических мероприятий принимается снижение остаточного ресурса R изоляции до пороговой величины текущей ступени, при которой еще способ успеет последовательно, по мере необходимости, привести в действие технические мероприятия остальных ступеней. В случае первой ступени пороговой величиной будет $R_1^{T_n}$, при достижении которой приводятся в действие технические мероприятия второй ступени. Пороговая величина ресурса изоляции рассчитывается исходя из времени $T_{\Sigma 1}$, необходимого для осуществления технических мероприятий всех оставшихся ступеней с учетом вероятности отказа всех ступеней, кроме последней – ступени отключения оборудования от сети. Под действием текущего напряжения γ_1 расход ресурса будет происходить с интенсивностью, определяемой выражением (3.1) (на диаграмме рисунка 3.2 изменение ресурса происходит по штриховой наклонной линии $\gamma_1(T_1)$). Поэтому пороговая величина будет равна

$$R_1^{T_1} = \Delta_R^{T_1} T_{\Sigma 1} = \frac{T_{\Sigma 1}}{T_1} \quad (3.3)$$

и будет тем выше, чем круче линия расхода ресурса на диаграмме (чем меньше T_1). Как видно из (3.3), кривая зависимости пороговой величины $R_1^{T_n}$ признака отказа технических мероприятий первой ступени на диаграмме будет представлять собой гиперболу (рисунок 3.2).

На рисунках 3.2 и 3.3 сплошные наклонные прямые соответствуют линиям расхода ресурса изоляции при перенапряжениях $\gamma_I \div \gamma_{III}$ (допустимые времена

$T_I \div T_{III}$) на границе ступеней, а штриховые – текущим перенапряжениям γ_1 и γ_2 (допустимые времена T_1 и T_2).

Поведение способа на второй ступени практически полностью совпадает с поведением на первой ступени. Разница лишь в том, что пороговая величина $R_{II}^{T_n}$ признака отказа технических мероприятий на второй ступени рассчитывается исходя из времени $T_{\Sigma 2}$, нужного для осуществления технических мероприятий третьей ступени – отключения оборудования от сети

$$R_{II}^{T_n} = \Delta_R^{T_n} T_{\Sigma 2} = \frac{T_{\Sigma 2}}{T_n}. \quad (3.4)$$

Величина порога $R_{II}^{T_n}$ (3.4) так же будет зависеть от уровня перенапряжения $\gamma_n(T_n)$. Поэтому для каждой линии расхода ресурса будет свое значение пороговой величины. И, как видно из рисунка 3.2, оно может быть определено как точка пересечения линий расхода ресурса с кривой $R_{II}^{T_n}$. Например, на второй ступени пороговая величина $R_{II}^{T_2}$ – точка пересечения с линией $\gamma_2(T_2)$, а на первой ступени $R_{II}^{T_1}$ – с линией $\gamma_1(T_1)$.

На диаграмме кривая пороговой величины $R_{II}^{T_n}$ берет начало на верхней граничной линии $\gamma_{III}(T_{III})$ второй ступени (точка $R_{II}^{T_{III}}$) и заканчивается на нижней граничной линии $\gamma_I(T_I)$ первой ступени (точка $R_{II}^{T_I}$). Это дает возможность, в случае последовательного отказа мероприятий первой, а затем и второй ступени, выработать признак их отказа и ввести в действие третью ступень (в данном случае – дать сигнал на отключение оборудования). Сценарий такого действия способа иллюстрируется примером развития событий по линии $\gamma_1(T_1)$: в точке $R_{II}^{T_1}$ способ вводит в действие технические мероприятия второй ступени, а затем, при их отказе, в точке $R_{II}^{T_1}$ – мероприятия третьей ступени.

При работе способа на последней ступени (в данном примере – третьей) оборудование отключается от сети без выдержки времени.

Несложно увидеть разницу в признаках отказа технических мероприятий известных устройств [2, 47] и предлагаемого способа. В известных устройствах АОПН считается, что признак отказа технических мероприятий данной ступени появился, если длительность перенапряжения достигла уставки по времени. При выборе уставки по времени предполагается, что начальное значение ресурса изоляции $R = 1$. Тогда уставка должна быть выбрана такой, чтобы на линии с максимальным перенапряжением данной ступени оставалось достаточно времени для срабатывания технических мероприятий других ступеней в случае отказа предыдущих ступеней. Для них уставка времени первой ступени на диаграмме (рисунок 3.3) будет изображена в виде вертикального отрезка, исходящего из точки пересечения линии максимального перенапряжения $\gamma_{II}(T_{II})$ ступени с кривой пороговой величины R_I^{Tn} (из точки $R_I^{T_{II}}$). В случае отказа второй ступени в таких устройствах будут приведены в действие технические мероприятия третьей ступени; уставка времени будет выбираться исходя из точки пересечения линии $\gamma_{II}(T_{II})$ с кривой пороговой величины R_{II}^{Tn} (точка $R_{II}^{T_{II}}$). Аналогично выбирается уставка второй ступени (исходя из точки $R_{II}^{T_{III}}$).

Как видно из рисунка 3.3, известные устройства во многих случаях преждевременно вводят технические мероприятия следующих ступеней. Например, при перенапряжении $\gamma_1(T_1)$ признак отказа первой ступени возникает в точке P_1 , что приведет к преждевременному вводу технических мероприятий второй ступени. Если же и вторая ступень будет неэффективна, то в точке пересечения линии расхода ресурса $\gamma_1(T_1)$ с порогом признака отказа второй ступени P_2 устройства [2, 47] перейдут на технические мероприятия третьей ступени, преждевременно отключая оборудование от сети.

Но самый существенный недостаток известных устройств заключается в том, что они не учитывают вероятность возникновения случая, когда начальное значение ресурса может быть не равно 1. Он возможен, когда перенапряжения носят перемежающийся характер. Каждый раз при появлении перемежающихся перенапряжений, известные устройства начинают отсчитывать длительность

перенапряжений заново. Поскольку начальное значение ресурса $R = R_s < 1$, а длительность перенапряжения эти устройства отсчитывают без учета затраченного ресурса, то технические мероприятия ступеней могут быть введены в действие уже при исчерпанном ресурсе изоляции. Это может привести к повреждению высоковольтного оборудования.

Предлагаемый же способ приводит в действие технические мероприятия ступеней всегда исходя из оценки остаточного ресурса изоляции, что позволяет осуществлять их вовремя.

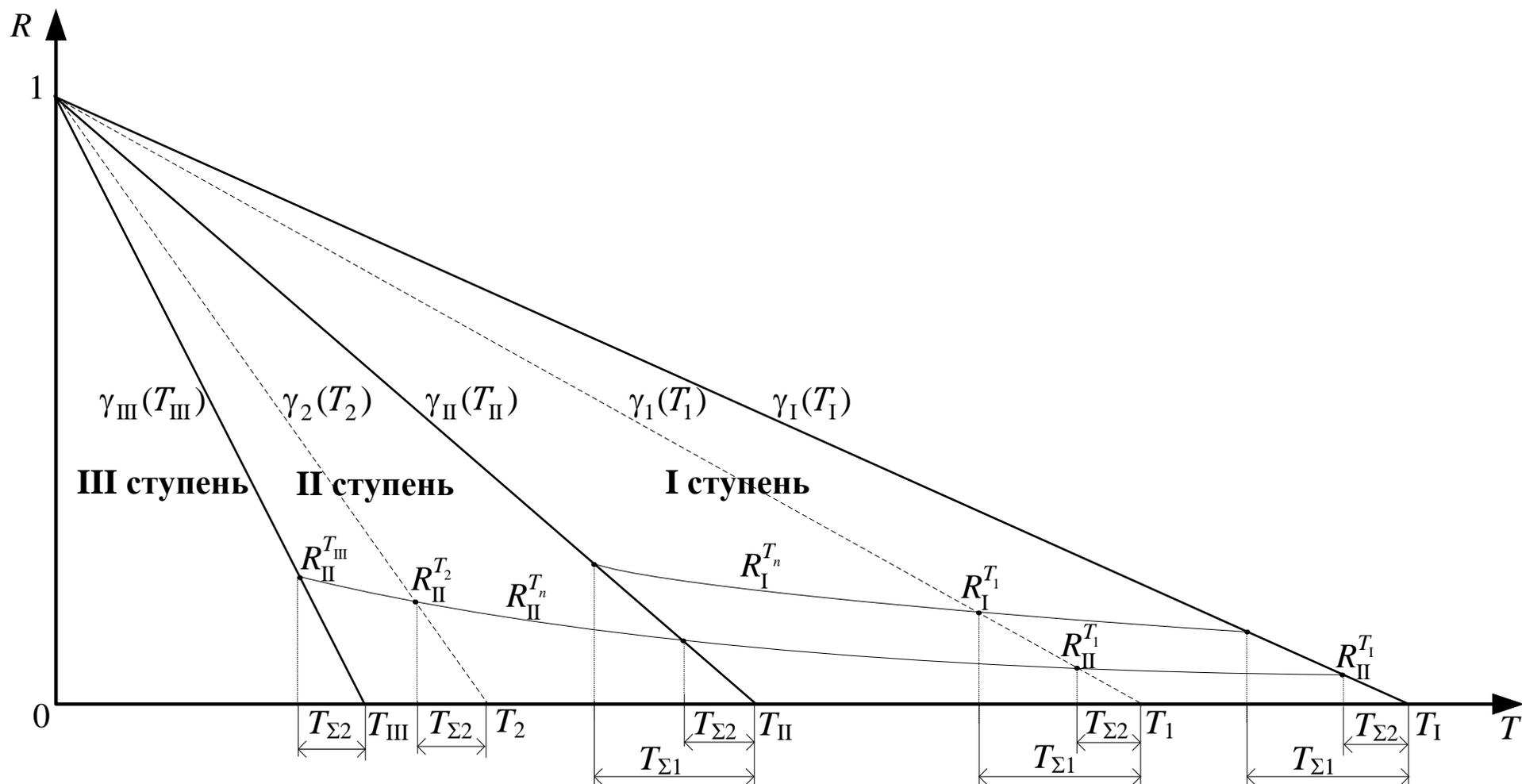


Рисунок. 3.2 – Иллюстрация работы предлагаемого нового способа с помощью диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования

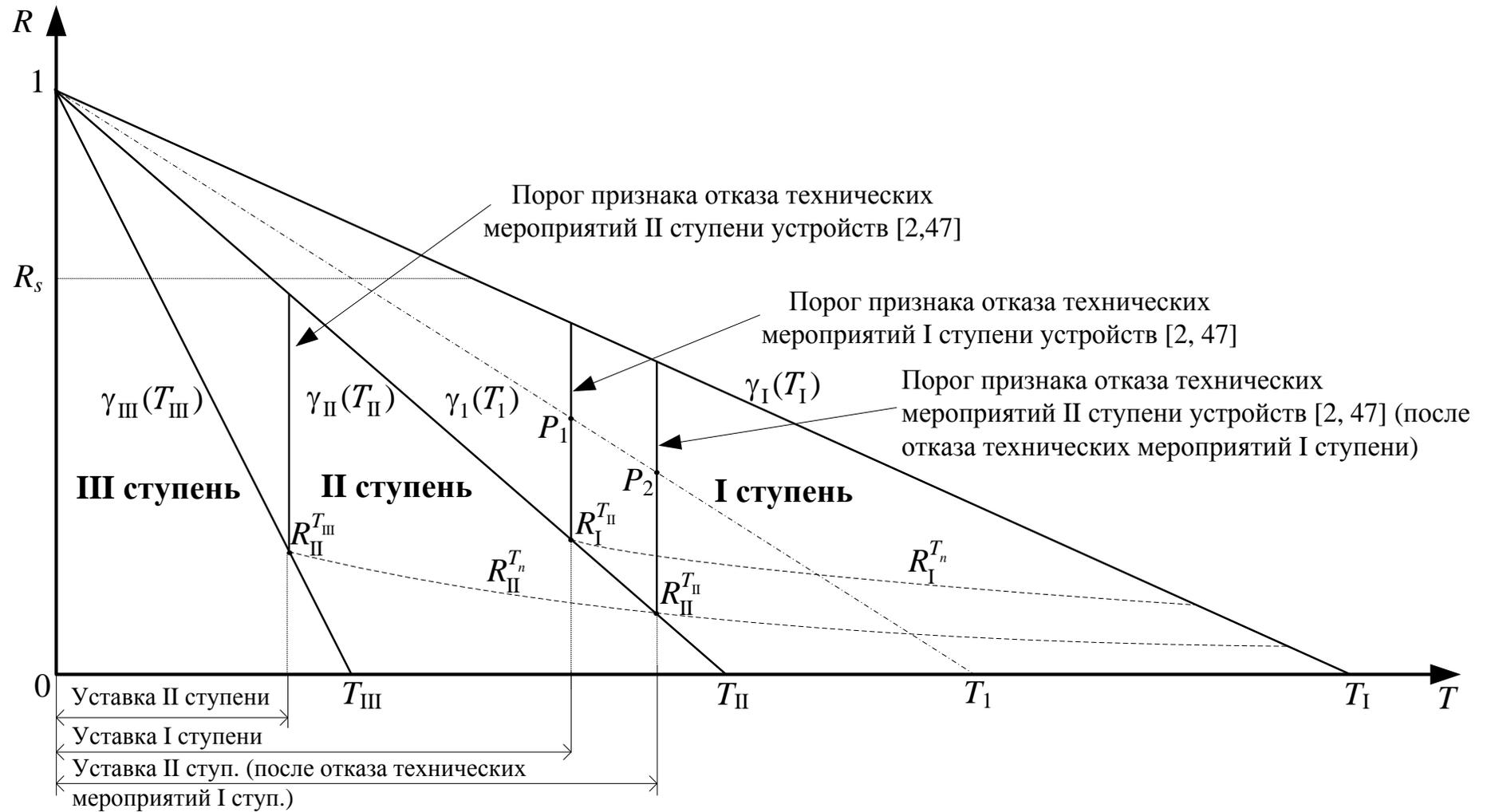


Рисунок 3.3 – Иллюстрация работы устройств [2, 47] с помощью диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции контролируемого высоковольтного оборудования

3.4 НОВЫЙ СПОСОБ УЧЕТА ВОСПОЛНЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ЛИКВИДАЦИИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Уровни перенапряжений и их допустимые времена (Приложение А), предписанные в ГОСТ 1516.3-96, определены с учетом того, что их воздействие не должно снизить эксплуатационную надежность и не сокращать срока службы электрооборудования [12, 38]. Полагается, что после снижения уровня напряжения до длительно допустимого ресурс электрической изоляции восстанавливается до исходного значения.

Учет процессов восстановления ресурса изоляции после исчезновения перенапряжения в АОПН должен осуществляться в зависимости от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения [38, 60]. Однако в существующих системах АОПН (раздел 1.5) восстановление ресурса электрической изоляции защищаемого высоковольтного оборудования либо вовсе не учитывается, либо учет осуществляется с фиксированной интенсивностью во всем диапазоне возможных перенапряжений. В первом случае это может привести к повреждению высоковольтного оборудования, поскольку оно остается под напряжением при исчерпанном ресурсе изоляции, особенно при действии серии перенапряжений. Во втором случае учет восстановления ресурса изоляции с фиксированной интенсивностью является паллиативом, поскольку заданная интенсивность восстановления может не соответствовать реальному процессу. Это может приводить к преждевременному отключению электрооборудования или, так же, как и в первом случае, к продолжению его эксплуатации при исчерпанном ресурсе изоляции.

В настоящей работе предлагается способ, позволяющий учитывать процессы восстановления электрической изоляции в зависимости от уровня перенапряжения, действовавшего до его ликвидации. Он позволяет повысить

точность оценки остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования за счет гибкого учета процессов восстановления.

Удобно раскрывать сущность работы предлагаемого способа в режиме ликвидации перенапряжения или отключения высоковольтного оборудования из-за истощения ресурса изоляции (рисунок 3.4). В этом случае с помощью принятых технических мероприятий уровень перенапряжения будет снижен от первоначальной величины до некоторого уровня. Будем считать, что перенапряжение будет снижено в момент времени T_1 , ликвидировано перенапряжение или отключено высоковольтное оборудование в момент времени T_2 .

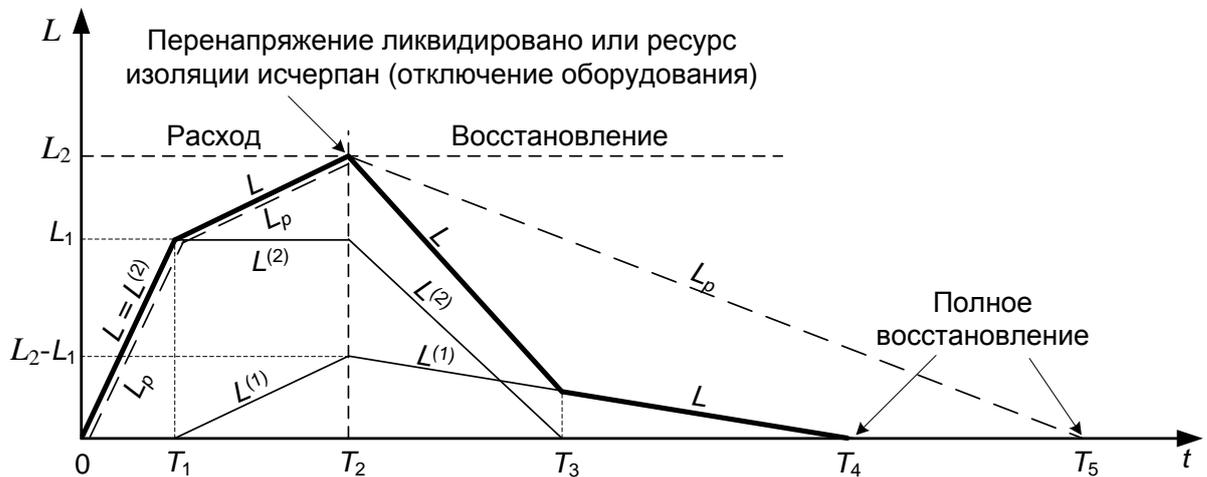


Рисунок 3.4 – Процессы учета восстановления ресурса электрической изоляции при изменении уровня перенапряжения в предлагаемом способе и известных устройствах

Рассмотрим вначале для сравнения работу известных устройств, например [26], ведущих фиксированный учет восстановления электрических свойств изоляции защищаемого высоковольтного оборудования. Каждому из указанных уровней перенапряжения (до и после снижения напряжения в момент времени T_1) соответствует своя интенсивность расхода ресурса изоляции. Поэтому вначале расход ресурса изоляции L_p оценивается известными устройствами путем накопления с интенсивностью $\Delta_L^{(2)}$ (наклонная L_p на рисунке 3.4 при $0 \leq t \leq T_1$):

$$L = t\Delta_L^{(2)}, \quad t \leq T_1,$$

а затем, при снижении уровня напряжения – с интенсивностью $\Delta_L^{(1)}$ (наклонная L_p при $T_1 < t \leq T_2$):

$$L_p = (t - T_1)\Delta_L^{(1)} + L_1, \quad T_1 < t \leq T_2 \quad (3.5)$$

где $L_1 = T_1\Delta_L^{(2)}$ – оценка затраченного ресурса изоляции, вычисленная известными устройствами к моменту времени T_1 применения технических мероприятий по снижению напряжения. К моменту ликвидации перенапряжения T_2 оценка расхода ресурса L_p достигнет величины L_2 .

После ликвидации перенапряжения (или отключения высоковольтного оборудования из-за исчерпания ресурса изоляции) известные устройства начинают учитывать процесс восстановления ресурса изоляции, уменьшая оценку расхода ресурса L_p с фиксированной интенсивностью восстановления Δ_R (наклонная L_p при $T_2 < t \leq T_5$):

$$L_p = L_2 - (t - T_2)\Delta_R, \quad T_2 < t \leq T_5. \quad (3.6)$$

Как видно из (3.5), оценка величины истраченного ресурса изоляции ведется известными устройствами путем накапливания его расхода в единственной переменной L_p . В связи с этим известные устройства в принципе не могут учитывать зависимость характера деструктивных процессов в изоляции от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения, и вынуждены использовать некоторый усредненный (фиксированный) учет восстановления ресурса изоляции согласно выражению (3.6). Как уже отмечалось выше, такой подход к учету восстановления ресурса не соответствует реальным процессам восстановления изоляции.

Этот недостаток известных устройств устраняется предлагаемым способом путем деления диапазона возможных перенапряжений на ступени восстановления и ведения учета расхода и восстановления ресурса изоляции для каждой ступени отдельно. Своим названием они обязаны новому свойству предлагаемого способа, заключающемуся в его способности учитывать процессы восстановления ресурса после исчезновения перенапряжения в зависимости от уровня напряжения, действовавшего во время перенапряжения. Ступени восстановления учитывают разницу в процессах восстановления электрических свойств изоляции в зависимости от характера деструктивных процессов, происходящих в изоляции при различном уровне действующего напряжения. На каждой ступени восстановления учет восстановления ресурса электрической изоляции ведется со своей интенсивностью.

Способ может иметь неограниченное число ступеней восстановления. ГОСТ 1516.3-96 [60] предусматривает их две, поэтому далее работа способа поясняется на примере двух ступеней восстановления. В частности, в упомянутом стандарте [60] предписывается, что промежуток времени между двумя повышениями напряжения длительностью 20 с, 1 мин, 5 мин и 20 мин должен быть не менее 1 часа, а длительностью 1, 3, и 8 часов – не менее 12 часов. Согласно требованиям стандарта для длительности перенапряжения, промежуточной между двумя табличными значениями длительности, допустимое время повышения напряжения T должно быть равно указанному для большего из этих значений длительности. Это означает, что можно выделить два диапазона, в каждом из которых учет восстановления ресурса электрической изоляции необходимо вести отдельно. Первый диапазон соответствует допустимой длительности $T > 20$ мин с временем полного восстановления ресурса электрической изоляции 12 часов, а второй – $T \leq 20$ мин с временем восстановления 1 час.

Используя введенные выше понятие ступеней восстановления, будем полагать, что первоначально перенапряжение в течение времени T_1 находится на уровне 2-ой ступени восстановления, а затем, благодаря предпринятым техническим мероприятиям, перенапряжение понижается до уровня 1-ой ступени

восстановления. Поэтому на ступенях восстановления расход ресурса учитывается предлагаемым способом отдельно как затраченный ресурс 2-ой ступени

$$L^{(2)} = t\Delta_L^{(2)}, \quad L^{(1)} = 0, \quad t \leq T_1, \quad (3.7)$$

и как затраченный ресурс 1-ой ступени

$$L^{(1)} = (t - T_1)\Delta_L^{(1)}, \quad L^{(2)} = T_1\Delta_L^{(2)} = L_1, \quad T_1 < t \leq T_2. \quad (3.8)$$

На рисунке 3.4 изменение оценок затраченных ресурсов ступеней показаны как наклонные $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$.

Общий расход ресурса изоляции определяется суммированием затраченных ресурсов ступеней (3.7) и (3.8):

$$L = L^{(2)} + L^{(1)}. \quad (3.9)$$

После ликвидации перенапряжения (при $t > T_2$) восполнение ресурса изоляции для каждой ступени восстановления учитывают путем одновременного уменьшения затраченных ресурсов ступеней с интенсивностью восстановления, соответствующей каждой ступени:

$$L^{(2)} = L_1 - (t - T_2)\Delta_R^{(2)}, \quad T_2 < t \leq T_3, \quad (3.10)$$

и

$$L^{(1)} = (L_2 - L_1) - (t - T_2)\Delta_R^{(1)}, \quad T_2 < t \leq T_4. \quad (3.11)$$

На рисунке 3.4 выражения (3.10) и (3.11) представлены наклонными $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$ при $t > T_2$.

Изменение общего ресурса изоляции оборудования определяется выражением (3.9) и на рисунке 3.4 показано в виде наклонной L .

Таким образом, используемый в предлагаемом способе отдельный учет процессов восстановления ресурса изоляции позволяет повысить точность оценки ресурса изоляции при перенапряжениях, обеспечивая полноценную эксплуатацию высоковольтного оборудования.

ВЫВОДЫ:

1. Введено новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции, а также используется в процессе своевременной реализации технических мероприятий при ликвидации перенапряжения.

2. Предложен новый способ оценки остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования в темпе процесса по величине интенсивности расхода ресурса, основанный на использовании диаграммы расхода остаточного ресурса. Новый способ позволяет своевременно принять меры, направленные на ограничение, снижение напряжения или отключение высоковольтного оборудования при перенапряжениях. Это исключает преждевременное отключение защищаемого оборудования, а также необоснованное его оставление под напряжением.

3. Предложен новый способ формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Способ позволяет обоснованно применять технические мероприятия по ликвидации затянувшихся перенапряжений. На предлагаемый способ подана заявка на изобретение РФ № 2014121980.

4. Предложен новый способ учета восстановления ресурса электрической изоляции контролируемого электрооборудования после исчезновения перенапряжения, позволяющий учитывать процессы восстановления ресурса электрической изоляции в зависимости от уровня перенапряжения, существовавшего до его ликвидации. Способ исключает преждевременное отключение электрооборудования, а также продолжение его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции. На предлагаемый способ подана заявка на изобретение РФ № 2014106471.

4 ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Как было отмечено в разделе 1.7, в цифровой системе АОПН необходимо предусмотреть специальный алгоритм коррекции локальных искажений в сигнале напряжения. Под локальным искажением обычно понимают выпадение отсчета из общей закономерности изменения сигнала [4].

Природа происхождения локальных искажений многообразна [70-73, 80, 81, 84]. Искажения могут возникать, например, при передаче отсчетов аналоговых сигналов по цифровой сети по протоколу МЭК 61850 из-за потерь некоторых отсчетов, что может рассматриваться как своего рода локальное искажение в цифровом сигнале [80, 81]. Также известно, что при нарушении электромагнитной совместимости на объекте, импульсная помеха, вызванная разрядом молнии или коммутацией в сети, также может вызвать возникновение локального искажения в сигнале напряжения [16, 34, 35, 55].

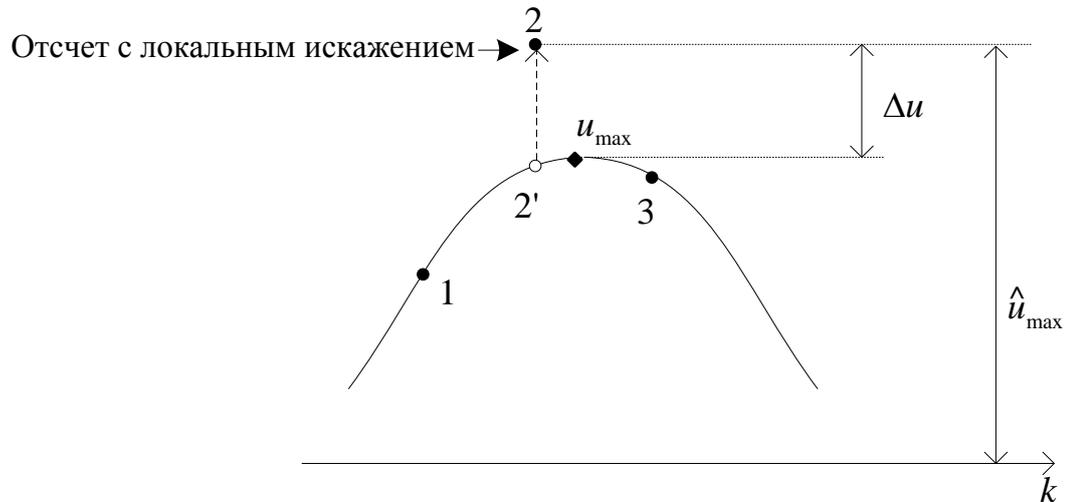
Рассмотрим влияние локального искажения на функционирование цифровой системы АОПН и изучим способы повышения ее устойчивости функционирования.

4.1 ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ НА ОЦЕНКУ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

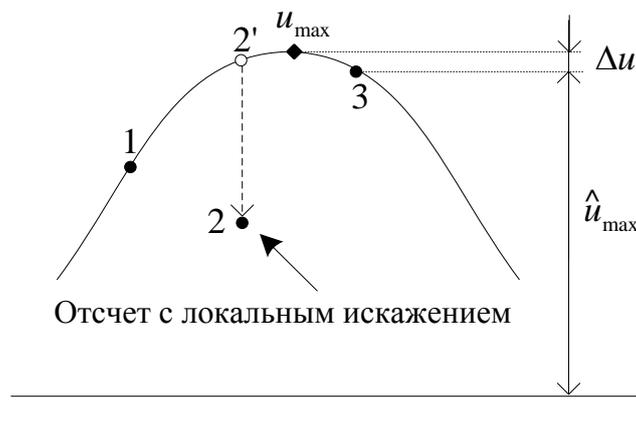
4.1.1 МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ НА ОЦЕНКУ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

При использовании способа оценки максимального значения по наибольшему из отсчетов на полупериоде максимальную погрешность в оценку

вносит локальное искажение, возникающее на отсчете вблизи максимума кривой напряжения (рисунок 4.1).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Влияние локального искажения на оценку максимального значения напряжения: а) и б) – кривые сигнала с локальным искажением положительного и отрицательного знака, соответственно. ● – отсчеты входного сигнала; ○ – истинное значение напряжения на отсчете с локальным искажением; ◆ – истинное максимальное значение u_{\max} ; Δu – абсолютная погрешность определения u_{\max} ; \hat{u}_{\max} – оценка максимального значения

Если локальное искажение приводит к увеличению отсчета (рисунок 4.1, а), то оценка максимального значения напряжения \hat{u}_{\max} будет значительно завышена. Если же локальное искажение уменьшает величину отсчета (рисунок 4.1, б), то оценка максимального значения напряжения \hat{u}_{\max} будет занижена. При

этом абсолютная погрешность Δu оценки равна величине локального искажения, т.е. локальное искажение влияет на рассматриваемую оценку линейно.

В оценку максимального значения предлагаемым в диссертационной работе способом (раздел 2.2) наибольшую погрешность локальное искажение вносит также при его возникновении на отсчете вблизи максимума кривой напряжения. Ошибка достигает своего экстремума при возникновении искажения на отсчете с максимальным значением u_{\max} . При этом так же, как и в предыдущем случае, абсолютная погрешность Δu оценки равна величине локального искажения (рисунок 4.2), поскольку вершина параболы проходит через отсчет с локальным искажением.

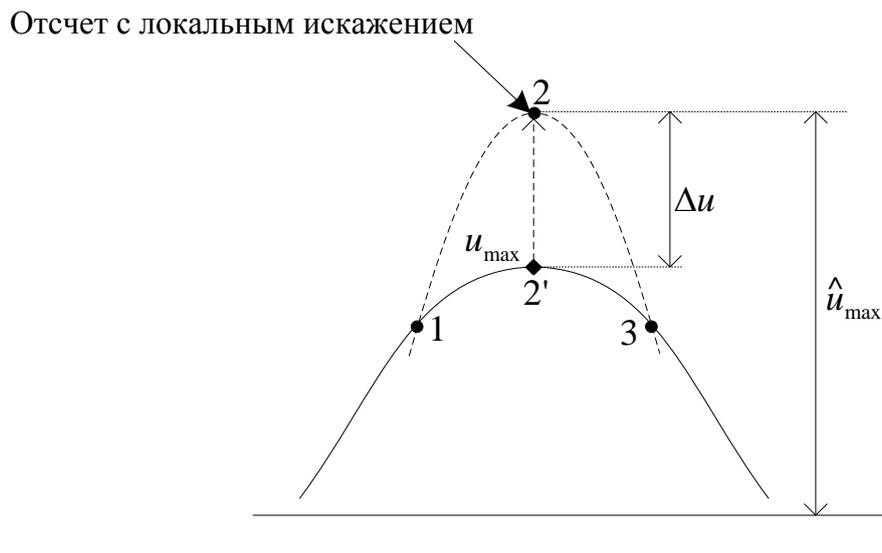


Рисунок 4.2 – Иллюстрация возникновения экстремальной ошибки в оценке максимального значения предлагаемым способом

В случае, когда из-за локального искажения в одном из отсчетов аппроксимирующая парабола вырождается в горизонтальную (принципиально для способа!) прямую (рисунок 4.3), за оценку максимального значения должно быть взято значение самих отсчетов.

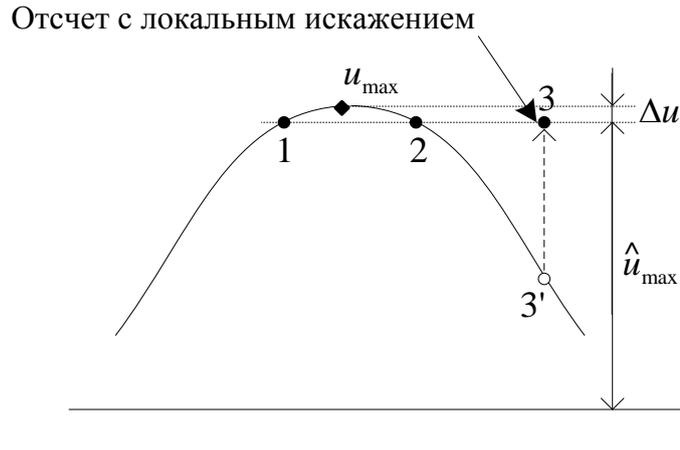


Рисунок 4.3 – Воздействие локального искажения на оценку максимального значения предлагаемым способом

4.1.2 МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ НА ОЦЕНКУ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В случае классического способа оценки действующего значения

$$\hat{U}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k u^2(m)}. \quad (4.1)$$

где N – число отсчетов на периоде;

k – номер текущего отсчета.

Оценка действующего значения также подвержена влиянию локального искажения. Удобно представить сигнал с локальным искажением с помощью двух сигналов:

$$u(k) = u_0(k) + n(k - q),$$

где $u_0(k)$ – истинные значения отсчетов сигнала напряжения,

а

$$n(k) = \begin{cases} b, & k = 0; \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

сигнал, моделирующий локальное искажение на q -ом отсчете входного сигнала; b – величина локального искажения.

Тогда в сигнале

$$u^2(k) = u_0^2(k) + 2u_0(k)n(k - q) + n^2(k - q) \quad (4.2)$$

появляются дополнительные составляющие, вызванные локальным искажением. Одна из них – составляющая $n^2(k - q)$ – полностью определяется величиной локального искажения и не зависит от места отсчета. Другая составляющая – $2u_0(k)n(k - q)$ зависит от величины истинного значения напряжения на отсчете и имеет наибольшее значение, если локальное искажение возникает на отсчете вблизи максимума кривой напряжения. Интересно, что оценка (4.1) не имеет погрешности, если величина локального искажения равна удвоенной величине истинного значения напряжения, взятого с противоположным знаком:

$$b = -2u_0(q).$$

В отличие от оценки максимального значения, на которую локальное искажение влияет линейно, оценка действующего значения классическим способом испытывает влияние локального искажения в меньшей степени (рисунок 4.4). Причем с увеличением числа отсчетов на периоде влияние локального искажения на оценку действующего значения нивелируется благодаря росту эффекта усреднения.

Предлагаемый в работе способ оценки действующего значения (раздел 2.5) заметно снижает влияние локального искажения за счет применения дополнительного преобразования (рисунок 4.4).

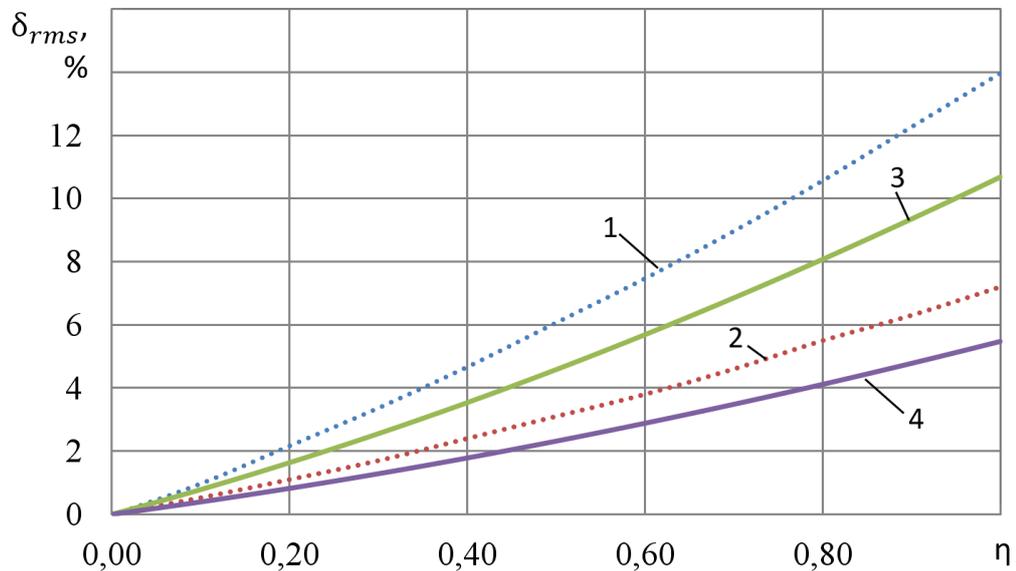


Рисунок 4.4 – Зависимость максимальной относительной погрешности оценки действующего значения напряжения от нормированной величины локального искажения $\eta = b/u_{\max}$ при различной частоте дискретизации f_s . Классический способ: 1 – $f_s = 1000$ Гц, 2 – $f_s = 2000$ Гц. Предлагаемый способ с использованием фильтра (2.23): 3 – $f_s = 1000$ Гц, 4 – $f_s = 2000$ Гц (локальное искажение расположено на максимуме кривой синусоидального напряжения частоты 50 Гц)

4.2 ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ НА ОЦЕНКУ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Поскольку локальное искажение сказывается на оценке контролируемой величины, то оно оказывает влияние и на оценку цифровой системой АОПН остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования.

Величина изменения оценки остаточного ресурса электрической изоляции при ошибочном завышении оценки контролируемой величины (рисунок 4.5) зависит от уровня перенапряжения γ . Так, например, если локальное искажение приведет к росту оценки контролируемой величины с 1.025 до 1.05, то даже такое

незначительное завышение уровня контролируемой величины приводит к ошибке оценки расхода ресурса на текущем полупериоде на $\Delta r^* = 62.5\%$. Если же локальное искажение приведет к завышению оценки контролируемой величины с 1.25 до 1.67, то это вызовет увеличение оценки расхода ресурса на текущем полупериоде уже на 95%. При единичном возникновении локального искажения ошибка в оценке остаточного ресурса изоляции будет не столь существенна. Однако это может стать недопустимым при появлении серии таких локальных искажений, так как может привести к преждевременному выводу защищаемого оборудования из эксплуатации.

Из рисунка 4.5 видно, что локальное искажение может значительно ускорить преждевременный вывод высоковольтного оборудования устройством АОПН из эксплуатации. Наиболее значительное влияние оказывают локальные искажения при больших кратностях перенапряжения γ , когда допустимое время T нахождения оборудования под данным напряжением должно быть незначительным.

Таким образом, ошибка оценки контролируемой величины из-за локального искажения может вызвать:

1. Преждевременное отключение защищаемого высоковольтного оборудования. Это возможно при завышении оценки контролируемой величины. При этом оценка интенсивности расхода ресурса электрической изоляции также завышена.

2. Оставление защищаемого высоковольтного оборудования под напряжением при исчерпанном ресурсе электрической изоляции. Это возможно при занижении оценки контролируемой величины. При этом оценка интенсивности расхода ресурса электрической изоляции также занижена.

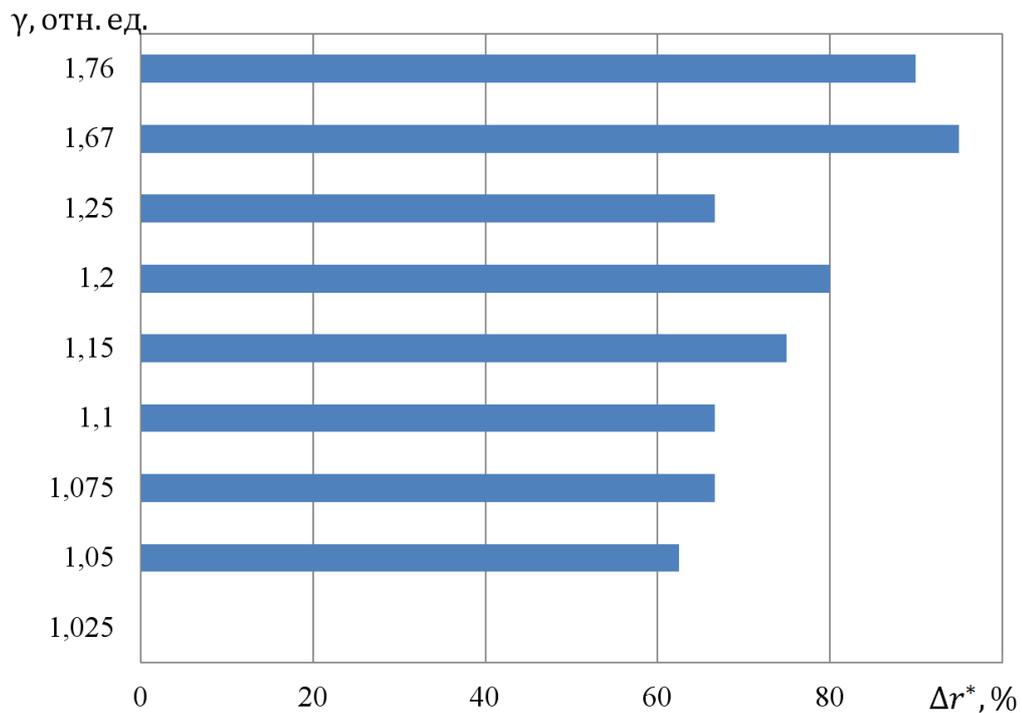


Рисунок 4.5 – Информационный вес величины локального искажения с точки зрения влияния на оценку остаточного ресурса электрической изоляции (ось ординат соответствует ВВХ силовых трансформаторов 750 кВ в части допустимых уровней перенапряжения): изменение оценки остаточного ресурса электрической изоляции при ошибочном завышении оценки контролируемой величины из-за локального искажения на величину деления шкалы

Во избежание ошибок цифровой системы АОПН при наличии локальных искажений нужно предусмотреть специальный алгоритм коррекции отсчетов с локальными искажениями.

4.3 СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

В технической литературе описаны различные способы восстановления контролируемой величины. Например, известен способ [4], согласно которому предсказывают отсчеты цифрового сигнала с помощью оператора линейного предсказания и формируют контрольный сигнал как ошибку (невязку) предсказания отсчетов. И если абсолютная величина контрольного сигнала на данном отсчете превышает порог срабатывания, то считается, что отсчет

содержит локальное искажение, и его заменяют предсказанным значением. Структура оператора линейного предсказания упомянутого способа неизменна и не адаптируется на сигнал. В связи с чем контрольный сигнал даже в чистом от локальных искажений электрической величине не равен нулю и имеет переменный характер. Чтобы обеспечить необходимую чувствительность способа к локальному искажению, в качестве порога срабатывания в нем принимают абсолютную величину средней скорости изменения сигнала, определяемой как усредненная сумма абсолютных приращений сигнала на заданном числе отсчетов. Такой способ формирования порога срабатывания позволяет адаптивно повышать его уровень на участках сигнала с высокой скоростью изменения. Однако операция усреднения вносит задержку в изменение порога, в связи с чем адаптация порога к изменению сигнала происходит с некоторым отставанием. Это приводит к потере синхронности изменения кривых абсолютной величины контрольного сигнала и порога, вызывая ухудшение чувствительности способа к локальным искажениям.

Более совершенный способ восстановления контролируемой величины реализован в устройстве подавления шума [82]. Согласно ему предсказывают отсчеты цифрового сигнала с помощью оператора линейного предсказания и формируют контрольный сигнал в виде ошибки предсказания отсчета (невязки). И если абсолютное значение контрольного сигнала превышает порог срабатывания, считают, что найден отсчет с локальным искажением, и заменяют его предсказанным отсчетом. Оператор линейного предсказания в способе адаптируется к электрической величине, однако и в нем контрольный сигнал значителен и имеет переменный характер. Поэтому порог срабатывания формируют таким образом, чтобы он был пропорционален уровню цифрового сигнала и скорости его изменения во времени. Для этого формируются две величины. Первая из них представляет собой среднюю величину квадратов скорости изменения (приращения) кривой цифрового сигнала, а вторая – среднюю величину квадратов отсчетов цифрового сигнала. Порог же формируется как квадратный корень из взвешенной суммы указанных величин. Такой подход к

формированию порога позволяет уменьшить амплитуду колебаний порога, повышая, тем самым, чувствительность способа к локальным искажениям. Однако, как и в способе [4], ход кривой порога недостаточно хорошо синхронизирован с изменением кривой контролируемого сигнала, что ограничивает чувствительность способа [82] к локальным искажениям.

В настоящей работе предлагается способ коррекции локального искажения в электрической величине $u(t)$, преобразованной в цифровой сигнал $u(k)$ путем его измерения в равномерно фиксированные моменты времени $t = kT_s$, где k – номер отсчета, T_s – период дискретизации. Предлагаемый способ призван повысить чувствительность и точность определения отсчета с локальным искажением.

Основная идея предлагаемого способа заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка произвольно выбранного предыдущего отсчета цифрового сигнала. Амплитудно-фазовые частотные характеристики упомянутых операторов выбираются таким образом, чтобы при предсказании одного и того же отсчета «чистого» сигнала (сигнала, свободного от локального искажения) на основе одной и той же последовательности отсчетов сигнала ошибки операторов были равны и противоположны по знаку. Поэтому при обработке чистого сигнала уровень контрольного сигнала, представляющего полусумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится локальное искажение, то, благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет с локальным искажением вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без локального искажения. Поэтому ошибка предсказания основного оператора $e_o(k)$ значительно возрастет, а ошибка предсказания дополнительного оператора $e_d(k)$ останется на уровне предсказания отсчета «чистого» сигнала. Это приводит к резкому повышению уровня контрольного сигнала

$$w(k) = \frac{1}{2} [e_o(k) + e_d(k)], \quad (4.3)$$

что будет свидетельствовать о наличии локального искажения на текущем отсчете $u(k)$.

Рассмотрим более подробно работу предлагаемого способа при использовании в качестве операторов линейного предсказания полиномов второго порядка. Как уже отмечалось, операторы используют разные последовательности отсчетов, причем их сдвиг относительно друг друга может осуществляться по-разному. Одним из вариантов такого сдвига последовательностей является случай, когда основной оператор использует предыдущие отсчеты, включая и текущий k -ый отсчет, а дополнительный оператор – со сдвигом назад на шаг, начиная с $(k - 1)$ -го отсчета (рисунок 4.6).

Пусть оба оператора предсказывают $(k - 2)$ -ой отсчет (на рисунке 4.6 черный кружочек). Основной оператор предсказывает упомянутый отсчет по лидирующим отсчетам:

$$\hat{u}_o(k - 2) = \frac{1}{3} u(k - 3) + u(k - 1) - \frac{1}{3} u(k), \quad (4.4)$$

а дополнительный оператор по отсчетам, взятым со сдвигом по времени на один шаг:

$$\hat{u}_d(k - 2) = -\frac{1}{3} u(k - 4) + u(k - 3) + \frac{1}{3} u(k - 1) \quad (4.5)$$

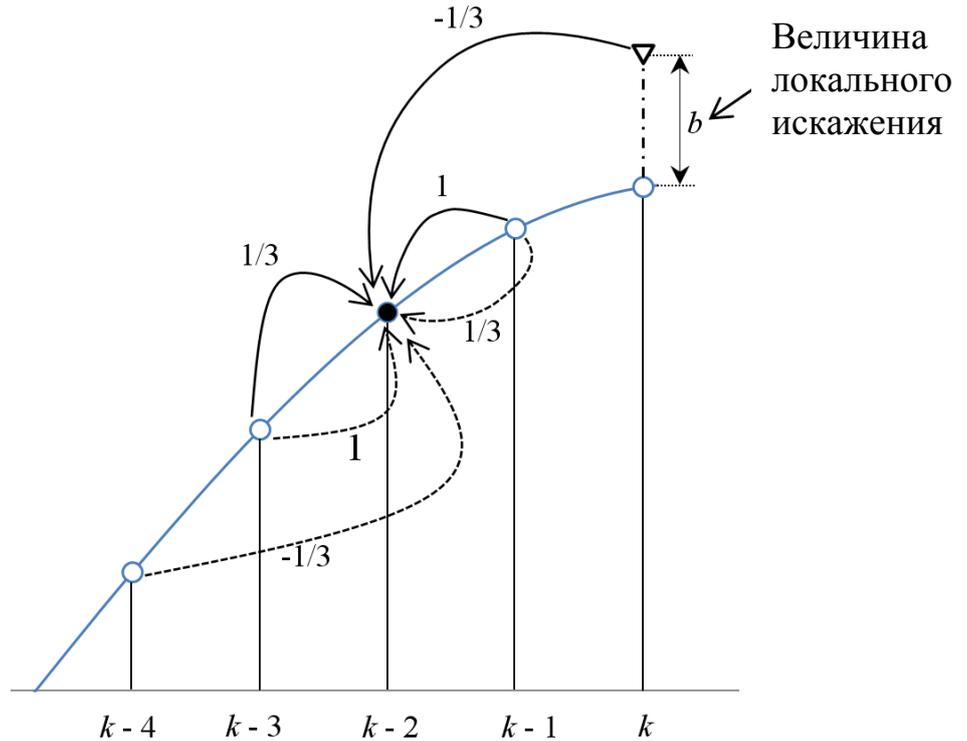


Рисунок 4.6 – Предсказание $(k-2)$ отсчета основным (сплошные линии) и дополнительным (пунктирные линии) линейными операторами

Выражения для операторов удобнее всего получить, используя для формирования полиномов форму Лагранжа [17]. Невязку операторов будем определять как ошибку предсказания отсчета $u(k-2)$. Несложно видеть, что в текущий k -ый момент невязка дополнительного оператора

$$e_d(k) = u(k-2) - \hat{u}_d(k-2) = \frac{1}{3}u(k-4) - u(k-3) + u(k-2) - \frac{1}{3}u(k-1) \quad (4.6)$$

представляет собой инвертированную по знаку невязку основного оператора

$$e_o(k) = u(k-2) - \hat{u}_o(k-2) = -\frac{1}{3}u(k-3) + u(k-2) - u(k-1) + \frac{1}{3}u(k), \quad (4.7)$$

вычисленную по последовательности отсчетов со сдвигом на шаг назад. Поэтому АФЧХ невязок основного

$$\underline{H}_0(j\alpha) = \frac{1}{3}(1 - e^{-j\alpha})^3 = \frac{8}{3} \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3}{2}\alpha\right)}, \quad (4.8)$$

и дополнительного

$$\underline{H}_d(j\alpha) = -\frac{1}{3}(1 - e^{-j\alpha})^3 e^{-j\alpha} = -\underline{H}_0(j\alpha) e^{-j\alpha}, \quad (4.9)$$

операторов будут противоположны по знаку и сдвинуты на угол $\alpha = \omega T_s$, равный угловому расстоянию между отсчетами на частоте ω .

Контрольный сигнал согласно (4.3) можно рассматривать как выходной сигнал фильтра, полученного как совокупность двух фильтров (4.6) и (4.7):

$$w(k) = \frac{1}{6}u(k-4) - \frac{4}{6}u(k-3) + u(k-2) - \frac{4}{6}u(k-1) + \frac{1}{6}u(k). \quad (4.10)$$

АФЧХ фильтра (4.10) легко определяется из совместного рассмотрения выражений (4.3), (4.8) и (4.9):

$$W(j\alpha) = \frac{1}{2}\underline{H}_0(j\alpha)(1 - e^{-j\alpha}) = \frac{1}{6}(1 - e^{-j\alpha})^4 = \frac{8}{3} \sin^4\left(\frac{\alpha}{2}\right) e^{-j2\alpha}. \quad (4.11)$$

Рабочая область частот АФЧХ фильтра (4.10), предназначенного для обработки чистого сигнала, должна располагаться в низкочастотной области – области значительного подавления входного сигнала. Например, для цифровых систем релейной защиты с частотой дискретизации входных сигналов 1200 Гц (рисунок 4.7) она будет находиться в окрестности частот с $\alpha = \omega_0 T_s = \pi/12$, $\omega_0 = 2\pi 50 \text{ с}^{-1}$. Тогда контрольный сигнал при чистом входном сигнале будет иметь невысокий уровень небаланса. Это важно, поскольку уровень небаланса в контрольном сигнале влияет на выбор порога, а значит, и на чувствительность фильтра (4.10) к локальному искажению.

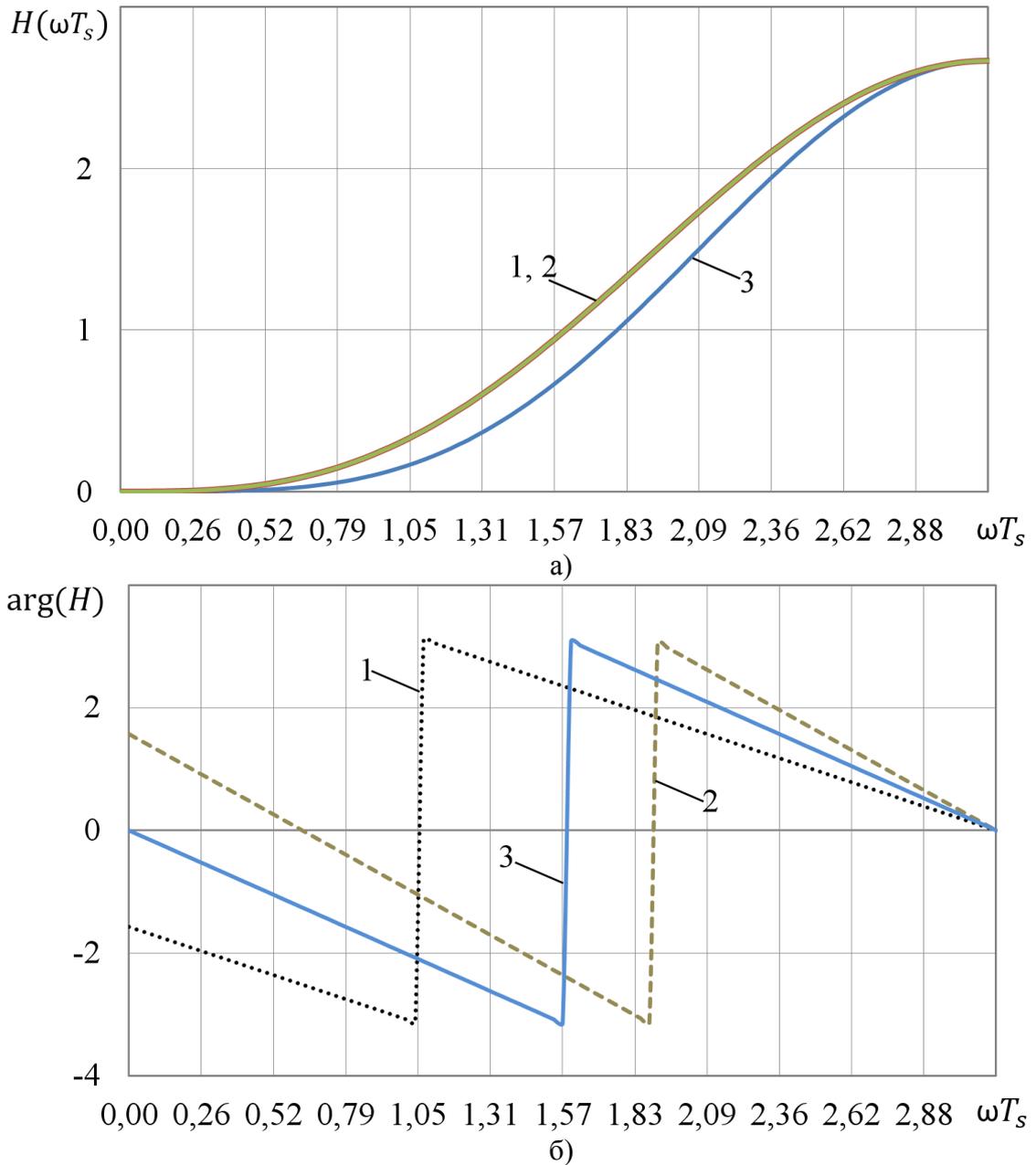


Рисунок 4.7 – Частотные характеристики фильтров (4.7)–1, (4.6) – 2, (4.10) – 3: а) АЧХ, б) ФЧХ

Поскольку небаланс зависит от смещения аргументов АФЧХ невязок операторов (4.8) и (4.9), а именно от α , то желательно, чтобы последовательности отсчетов, используемые операторами, были несильно сдвинуты относительно друга.

Покажем, как происходит определение локального искажения фильтром (4.10).

Пусть электрическая величина $u(t)$ является синусоидальным сигналом частоты ω и содержит локальное искажение величиной b . Положим, что после ее преобразования в цифровой сигнал локальное искажение оказалось в отсчете с номером r . Тогда цифровой сигнал $u(k)$ можно представить в виде суммы двух сигналов: чистой синусоиды

$$u_s(k) = U_m \sin(\omega T_s k), \quad (4.12)$$

и сигнала $u_b(k)$, состоящего только из локального искажения величиной $b = \eta U_m$ в дискретный момент $k = r$:

$$u_b(k) = \eta U_m \delta(k - r), \quad (4.13)$$

где η – относительная величина локального искажения,

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} -$$

функция Кронекера.

Удобно рассматривать определение локального искажения как результат реакции линейного фильтра (4.10) с АФЧХ (4.11) на цифровой сигнал

$$u(k) = u_s(k) + u_b(k). \quad (4.14)$$

В этом случае выходной сигнал фильтра

$$w(k) = w_s(k) + w_b(k) \quad (4.14^*)$$

будет состоять из реакции на синусоидальный сигнал (4.12)

$$w_s(k) = U_m W(\omega T_s) \sin[\omega T_s(k - 2)] \quad (4.15)$$

и реакции $w_b(k)$ на сигнал с локальным искажением (4.13). Реакцию $w_b(k)$ удобно рассматривать во временной области. До отсчета с локальным искажением (при $k < r$) реакция на локальное искажение $w_b(k) = 0$ и контрольный сигнал будет полностью определяться синусоидальной составляющей (4.15), являющейся по сути фоновой составляющей реакции фильтра (рисунок 4.8, а). Именно с учетом его амплитуды выбирается порог h для контрольного сигнала, полагая, что

$$h = \zeta U_m W(\omega T_s), \quad (4.16)$$

где $\zeta \geq 1$ – коэффициент чувствительности порога. При $k = r$ отсчет с локальным искажением входит в окно обработки фильтра (4.10) и в его выходном сигнале появляется составляющая реакции на локальное искажение:

$$w_b(r) = \frac{1}{6} b = \frac{1}{6} \eta U_m. \quad (4.17)$$

Локальное искажение в отсчете $u(r)$ будет обнаружено, если контрольный сигнал (4.10) превысит порог h (рисунок 4.8, б), т.е.

$$|w(r)| = |w_s(r) + w_b(r)| > h. \quad (4.18)$$

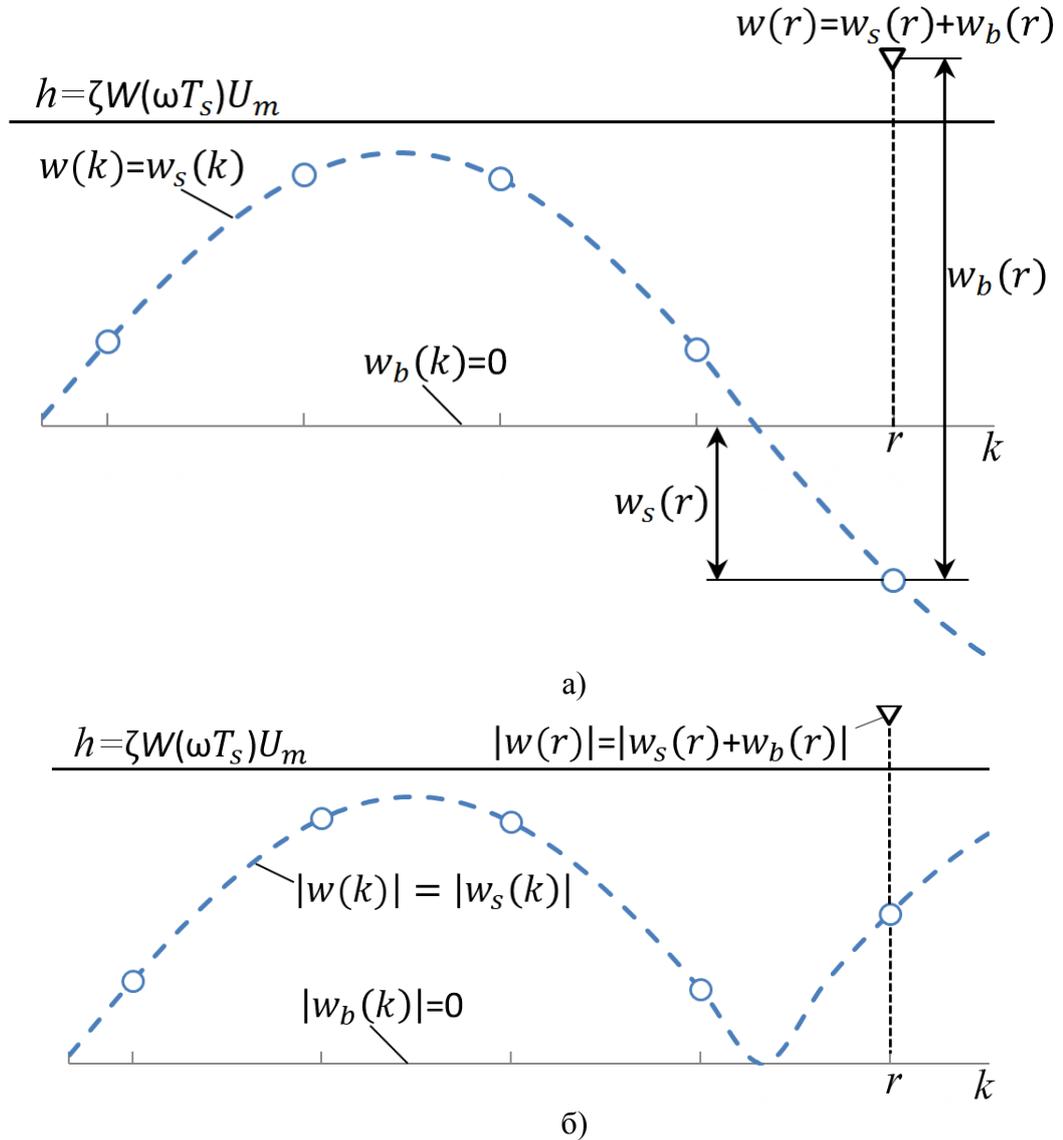


Рисунок 4.8 – Выбор порога срабатывания предлагаемого способа

Оценим чувствительность способа к локальному искажению. Для этого перепишем в развернутом виде (4.18) с учетом выражений (4.15) – (4.17):

$$\left| U_m W(\omega T_s) \sin[\omega T_s(r - 2)] + \frac{1}{6} \eta U_m \right| > \zeta U_m W(\omega T_s). \quad (4.19)$$

Очевидно, что наихудший случай с точки зрения чувствительности к локальному искажению возникает при разных знаках слагаемых в левой части неравенства (4.19) и максимальном значении ее первой слагаемой. Поэтому можно принять, что

$$\sin[\omega T_s(r - 2)] = -1. \quad (4.20)$$

Это тот случай, когда для срабатывания способа реакция на локальное искажение должна превосходить по абсолютной величине реакцию на чистый сигнал противоположного знака. Сокращая обе части условия срабатывания (4.19) на U_m и учитывая условие (4.20), получаем меру чувствительности способа к локальному искажению:

$$\eta > 6(\zeta + 1)W(\omega T_s). \quad (4.21)$$

Как видно из (4.21), чем выше подавление фильтра (4.10) на частоте чистого сигнала [чем ниже коэффициент передачи $W(\omega T_s)$], тем выше чувствительность способа.

Условие (4.21) справедливо и для способа [82], хотя в нем контрольный сигнал представляет собой лишь невязку основного оператора линейного предсказания. Сравнивая АЧХ основного оператора на частоте чистого сигнала [модуль АФЧХ согласно (4.8)]

$$H_o(\alpha) = \frac{8}{3} \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.22)$$

и АЧХ фильтра (4.10) [модуль АФЧХ согласно (4.11)]

$$W(\alpha) = \frac{8}{3} \sin^4\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (4.23)$$

приходим к выводу, что предлагаемый способ превосходит способ [82] по чувствительности в $1/\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ раз. При $\alpha = \pi/12$ (при частоте дискретизации 1200 Гц электрической величины промышленной частоты 50 Гц) чувствительность способа лучше способа [82] в 7,66 раза.

Чувствительность способа может быть усилена, если контрольный сигнал формировать как полуразность между полусуммой невязок основного и дополнительного операторов линейного предсказания (4.3) на текущем k -ом отсчете и аналогичной полусуммой на предыдущем $(k-1)$ -ом отсчете. Покажем это. Действительно, в случае использования в качестве операторов линейного предсказания операторов (4.6) и (4.7) контрольный сигнал будет определяться как разность невязок (4.10), вычисленных в разные дискретные моменты времени, а именно

$$\begin{aligned} \vartheta(k) = \frac{1}{2}[w(k) - w(k-1)] = & -\frac{1}{12}u(k-5) + \frac{5}{12}u(k-4) - \frac{10}{12}u(k-3) + \\ & + \frac{10}{12}u(k-2) - \frac{5}{12}u(k-1) + \frac{1}{12}u(k). \end{aligned} \quad (4.24)$$

АФЧХ для контрольного сигнала (4.24) легко определяется с учетом АФЧХ (4.11) невязки (4.10):

$$V(j\alpha) = \frac{1}{2}W(j\alpha)(1 - e^{-j\alpha}) = \frac{1}{12}(1 - e^{-j\alpha})^5 = \frac{8}{3}\sin^5\left(\frac{\alpha}{2}\right)e^{-j\left(\frac{5}{2}\alpha - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (4.25)$$

Реакция на чистый сигнал (4.12) согласно АФЧХ (4.25) будет

$$\vartheta_s(k) = U_m V(\omega T_s) \sin\left[\omega T_s\left(k - \frac{5}{2}\right) + \frac{\pi}{2}\right], \quad (4.26)$$

а реакция на локальное искажение будет

$$\vartheta_b(r) = \frac{1}{12}b = \frac{1}{12}\eta U_m.$$

Тогда из неравенства (4.18) с учетом того, что оно записано для реакции фильтра (4.24), получаем условие для оценки чувствительности способа при использовании контрольного сигнала (4.24):

$$\left| U_m V(\omega T_s) \sin \left[\omega T_s \left(r - \frac{5}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right] + \frac{1}{12} \eta U_m \right| > \zeta U_m V(\omega T_s). \quad (4.27)$$

Рассуждая аналогично, как и при выводе условия (4.21), нужно принять, что наихудший случай для выявления локального искажения соответствует равенству

$$\sin \left[\omega T_s \left(r - \frac{5}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right] = -1. \quad (4.28)$$

Мера чувствительности способа к локальному искажению в этом случае будет:

$$\eta > 12(\zeta + 1)V(\omega T_s). \quad (4.29)$$

Оценить, насколько повысится чувствительность способа, можно, сравнив (4.21) и (4.29) и вычислив отношение

$$\frac{1}{2} W(\omega T_s) / V(\omega T_s) = 0,5 / \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (4.30)$$

При $\alpha = \pi/12$ чувствительность способа повышается 3,83 раза по сравнению со случаем использования контрольного сигнала (4.10).

В качестве операторов предсказания возможно использовать заграждающие фильтры гармоник. Это возможно, если априори известно, что сигнал может состоять из определенного числа известных гармоник. Примером использования заграждающих фильтров может служить коррекция локальных искажений в задачах АОПН, когда сигнал напряжения в режиме параметрического резонанса в

электрической сети может содержать основную и вторую гармоники [37]. В этом случае в качестве основного оператора линейного предсказания может быть выбран заграждающий оператор, заведомо настроенный на заграждение первой и второй гармоник. Пусть основной оператор предсказывает текущий k -ый отсчет сигнала

$$\hat{u}_0(k) = -u(k-4) - (a_1 + a_2)[u(k-3) + u(k-1)] - (2 + a_1a_2)u(k-2), \quad (4.31)$$

где

$$a_i = -2 \cos(i\omega_0 T_s), \quad i = 1, 2. \quad (4.32)$$

Здесь ω_0 – номинальная частота первой гармоники. Тогда невязку основного оператора удобно определять как разность предсказанного текущего отсчета

$$\begin{aligned} e_0(k) &= u(k) - \hat{u}_0(k) = \\ &= u(k-4) + (a_1 + a_2)[u(k-3) + u(k-1)] + (2 + a_1a_2)u(k-2) + u(k), \end{aligned} \quad (4.33)$$

а невязку дополнительного оператора – как инвертированную по знаку невязку предсказания $(k-1)$ -го отсчета тем же основным оператором

$$\begin{aligned} e_d(k) &= -u(k-1) + \hat{u}_0(k-1) = \\ &= -u(k-5) - (a_1 + a_2)[u(k-4) + u(k-2)] - (2 + a_1a_2)u(k-3) - u(k-1). \end{aligned} \quad (4.34)$$

Контрольный сигнал, вычисленный согласно (4.3), будет равен

$$w(k) = \frac{1}{2}[-u(k-5) + d_1u(k-4) - d_2u(k-3) + d_2u(k-2) - d_1u(k-1) + u(k)], \quad (4.35)$$

где $d_1 = 1 - a_1 - a_2$,

$$d_2 = 2 + a_1 a_2 - a_1 - a_2.$$

Для сети с номинальной частотой 50 Гц и при дискретизации сигнала частотой 1200 Гц ($T_s = 1/1200$ с) коэффициенты фильтров будут следующими: $a_1 = -1,932$; $a_2 = -1,732$; $d_1 = 4,664$; $d_2 = 9,010$.

Дальнейшее повышение чувствительности способа к локальным искажениям возможно при более скрупулёзном учете свойств контрольного сигнала. Понятно, что локальное искажение значительной величины будет обнаружено сразу, как только оно окажется в пределах окна основного оператора, и абсолютное значение контрольного сигнала (4.10) или (4.24), или (4.35) будет значительно и превысит порог (4.16). Однако при относительно малой величине локального искажения оно может быть и не обнаружено на первом отсчете окна фильтра контрольного сигнала. Но, как показывает анализ структуры выражений (4.10), (4.24) и (4.35), по мере продвижения локального искажения вглубь окна фильтра уровень составляющей контрольного сигнала, вызванной реакцией на локальное искажение, увеличивается, и на одном из отсчетов окна превысит по абсолютной величине заданный порог. Если не предпринимать специальных мер, то отсчет с локальным искажением будет определен неверно. Покажем, как можно определить место локального искажения в этом случае. Для упрощения изложения работы способа в качестве контрольного сигнала будем рассматривать выражение (4.10).

Как видно из (4.10), по мере продвижения r -го отсчета с локальным искажением вглубь окна фильтра на его выходе поочередно будут появляться следующие составляющие реакции на локальное искажение:

$$\left. \begin{aligned} w_b(r) &= \frac{1}{6}b; \\ w_b(r+1) &= -\frac{4}{6}b; \\ w_b(r+2) &= b; \\ w_b(r+3) &= -\frac{4}{6}b; \\ w_b(r+4) &= \frac{1}{6}b. \end{aligned} \right\} \quad (4.36)$$

Анализ (4.36) показывает, что уровень составляющей реакции на локальное искажение вначале, по мере продвижения локального искажения вглубь окна фильтра растет, а затем – уменьшается. Эту особенность в поведении контрольного сигнала и использует способ для определения места положения локального искажения в окне фильтра. Для этого на следующем отсчете после выполнения условия (4.18) анализируют отношение разностей $\Delta w(r)$ и $\Delta w(r-1)$ двух соседних отсчетов контрольного сигнала

$$\theta(r) = \frac{\Delta w(r)}{\Delta w(r-1)}. \quad (4.37)$$

В случае синусоидального цифрового сигнала $u(k)$ разность соседних отсчетов

$$\Delta w(r) = w(r) - w(r-1) = \Delta w_s(r) + \Delta w_b(r),$$

как это видно из (4.14*), состоит из суммы разности отсчетов реакции на синусоидальный сигнал

$$\Delta w_s(r) = w_s(r) - w_s(r-1)$$

и разности отсчетов реакции на локальное искажение

$$\Delta w_b(r) = w_b(r) - w_b(r - 1).$$

Разность отсчетов реакции на синусоидальный сигнал с учетом (4.15) будет равна

$$\Delta w_s(r) = M \sin[\omega T_s(r - 2,5)],$$

где

$$M = U_m W(\omega T_s) \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) - \quad (4.38)$$

ее амплитуда. Сравнивая (4.38) с (4.16), приходим к выводу, что для большинства практических случаев амплитуда M разности $\Delta w_s(r)$ несравненно меньше, чем порог h . Действительно, например, при частоте дискретизации 1200 Гц ($T_s = 1/1200$, с) и частоте основной гармоники входного сигнала $\omega = 314$ с⁻¹ минимальное значение отношения (при $\zeta = 1$) амплитуды разности к порогу $\frac{M}{h} = \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) = 0,131$. Другими словами, при выполнении условия срабатывания (4.18) амплитуда сигнала $\Delta w_s(r)$ значительно уступает сигналу $\Delta w_b(r)$ (в нашем примере около 8 раз), в связи с чем при формировании величины $\theta(k)$ им можно пренебречь. Это видоизменит (4.37):

$$\theta(r) = \frac{\Delta w_b(r)}{\Delta w_b(r - 1)}.$$

Предположим, что условие срабатывания (4.18) выполнилось на первом же отсчете окна фильтра. Тогда, по мере продвижения отсчета с локальным

искажением (r -го отсчета) вглубь окна фильтра последовательно формируются следующие отношения с учетом (4.10) и (4.36):

$$\begin{aligned}
 \theta(r+1) &= \frac{-\frac{4}{6}b - \frac{1}{6}b}{-\frac{1}{6}b} = 5; \\
 \theta(r+2) &= \frac{b - \left(-\frac{4}{6}b\right)}{-\frac{4}{6}b - \frac{1}{6}b} = -2; \\
 \theta(r+3) &= \frac{-\frac{4}{6}b - b}{b - \left(-\frac{4}{6}b\right)} = -1; \\
 \theta(r+4) &= \frac{\frac{1}{6}b - \left(-\frac{4}{6}b\right)}{-\frac{4}{6}b - b} = -\frac{1}{2}.
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

Отношения разностей, как видно из (4.39), не зависят от величины локального искажения b . После выполнения условия срабатывания (4.18) каждое из отношений может служить индикатором отсчета с локальным искажением. Достаточно задаться порогом для отношений h_θ и сравнивать с ним абсолютные значения отношений $\theta(k)$:

$$|\theta(k)| < \zeta_\theta h_\theta, \tag{4.40}$$

где $\zeta_\theta \geq 1$ – коэффициент чувствительности порога h_θ . Например, если принять $\zeta_\theta = 1$ и $h_\theta = 1,5$, то способ сработает на $(r+3)$ -ем отсчете, когда $|\theta(r+3)| = 1 < 1,5$. Способ определит, что локальное искажение находится на отсчете, отстоящем на три отсчета назад с момента срабатывания условия (4.40).

Конечно, при большом локальном искажении условие (4.18) будет выполняться сразу, как только отсчет с локальным искажением окажется в окне фильтра (4.10). Но при малых уровнях локального искажения, как это видно из (4.36), условие (4.18) будет выполняться скорее на $(r+2)$ -ом отсчете, когда

реакция фильтра на локальное искажение достигает максимального значения по модулю. Поэтому было бы разумно выбирать порог h_θ исходя из уровня отношений после $(r + 2)$ -ого отсчета, т.е. по $|\theta(r + 3)|$ или $|\theta(r + 4)|$. Как следует из (4.39), порог h_θ должен быть либо меньше 2, но больше 1, либо меньше 1, но больше $\frac{1}{2}$. Тогда место отсчета с локальным искажением способ будет определять либо на $(r + 3)$ -ем, либо на $(r + 4)$ -ом отсчете по срабатыванию условия (4.40). Первый вариант более предпочтителен, поскольку уровень порога выше, и способ будет обладать большей помехоустойчивостью.

После определения места локального искажения в окне фильтра отсчет с локальным искажением $u(r)$ заменяется предсказанным отсчетом (оценкой). Выведем формулу для оценки отсчета $\hat{u}(r)$. Выходной сигнал на $(r + 3)$ -ем отсчете фильтра согласно (4.14)

$$w(r + 3) = w_s(r + 3) + w_b(r + 3).$$

Поскольку составляющая реакции на локальное искажение $w_b(r + 3)$ существенно превосходит по абсолютному значению составляющую реакции $w_s(r + 3)$ на чистый сигнал, то последней можно пренебречь. Тогда сигнал на выходе фильтра будет представлен только реакцией фильтра на локальное искажение, т.е. он представляет собой разность между отсчетом с локальным искажением $u(r)$ и отсчетом чистого сигнала $u_s(r)$, взвешенную коэффициентом $c(r)$:

$$c(r)[u(r) - u_s(r)] = w(r + 3).$$

Следовательно, оценка отсчета $u_s(r)$ формируется как

$$\hat{u}_s(r) = u(r) - \frac{1}{c(r)}w(r + 3). \quad (4.41)$$

Например, на $(r + 3)$ -ем отсчете [после срабатывания условия (4.18) на $(r + 2)$ -ом отсчете] r -ый отсчет с локальным искажением в окне фильтра (4.10)

$$w(r + 3) = \frac{1}{6}u(r - 1) - \frac{4}{6}u(r) + u(r + 1) - \frac{4}{6}u(r + 2) + \frac{1}{6}u(r + 3)$$

будет иметь вес $c(r) = -4/6$. Поэтому оценка предсказываемого отсчета согласно (4.41) формируется фильтром (4.10) по следующему выражению:

$$\hat{u}_s(r) = u(r) + \frac{6}{4}w(r + 3).$$

Специальные исследования показали, что при отсутствии шума погрешность восстановления отсчета синусоидального сигнала частотой 50 Гц не превышает 0,1%. Также способ может определить и устранить локальное искажение величиной 5 % от максимального значения в сигнале параметрического резонанса, включающего в себя первую (62 Гц) и вторую (124 Гц) синфазные гармоники равной амплитуды.

Таким образом, предлагаемый способ коррекции локального искажения в электрической величине обладает повышенной чувствительностью к локальным искажениям и позволяет увеличить точность измерения электрической величины, содержащей локальные искажения.

На предлагаемый способ подана заявка на изобретение РФ № 2014144793.

ВЫВОДЫ:

1. Предложен новый способ коррекции локального искажения в электрической величине, обладающий повышенной чувствительностью. Способ увеличивает точность измерения самой электрической величины. Специальные

исследования показали, что при отсутствии шума погрешность восстановления отсчета синусоидального сигнала частоты 50 Гц не превышает 0,1 %. Также способ может определить и устранить локальное искажение величиной 5 % от максимального значения в сигнале параметрического резонанса, включающего в себя первую (62 Гц) и вторую (124 Гц) синфазные гармоники равной амплитуды. На предлагаемый способ подана заявка на изобретение РФ № 2014144793.

5 РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОГО УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

5.1 РЕЖИМНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АОПН

В I главе настоящей диссертации было показано, что с точки зрения функционирования цифровой системы автоматического ограничения повышения напряжения наиболее сложным режимом электроэнергетической системы является параметрический резонанс на второй гармонике. Поэтому сигналы в указанном режиме должны быть приняты в качестве тестовых при разработке и испытаниях цифровой системы АОПН.

Также было показано, что в современной цифровой системе АОПН должны быть решены следующие научные и технические задачи:

1. Повышения точности оценки ресурса изоляции высоковольтного электрооборудования цифровой системой АОПН (задачи повышения точности оценки максимального и действующего значений напряжения) в различных режимах сети.

2. Совершенствования методов оценки цифровой системой АОПН расходования и восстановления ресурса изоляции защищаемого высоковольтного электрооборудования, а также методов формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения.

3. Повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях появления локальных искажений во входных сигналах.

5.2 ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОВРЕМЕННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АОПН

Основные технические требования к АОПН изложены в [1, 8, 46]. В частности, из стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» [8] можно выделить следующие. АОПН должна:

1. Обеспечивать пофазную фиксацию повышения действующего значения напряжения в соответствии с заложенной ВВХ и амплитудного значения напряжения.

2. Обеспечивать фиксацию отказа любого из выключателей «своей» стороны линии, пуск УРОВ (устройство резервирования отказа выключателя) АОПН – действующего на отключение смежных с отказавшим выключателей на «своей» стороне ЛЭП и пуск команды телеотключения выключателей противоположной стороны ЛЭП с запретом АПВ всех отключаемых при этом выключателей.

3. Иметь блокировку при неисправностях в цепях напряжения, а также по сигналам от внешних устройств.

4. Обеспечивать пофазный контроль стока реактивной мощности с ЛЭП к шинам в измерительных органах ступеней с его блокировкой по факту отключенного положения выключателей «своей» стороны линии.

5. Иметь блокировку срабатывания по значению активной мощности ЛЭП.

6. Иметь не менее 2-х ступеней.

Необходимость пофазного контроля напряжения, стока реактивной и активной мощности вызвана возможностью возникновения в сети неполнофазных режимов [41], например, при однофазном автоматическом повторном включении, а также при квазиустановившихся неполнофазных режимах, когда включена лишь одна фаза с одной стороны линии [30, 86].

В стандарте ОАО «СО ЕЭС» [1] описаны требования к логике ступеней АОПН:

1. Первая ступень по напряжению должна действовать: с первой выдержкой времени на изменение режима работы или эксплуатационного состояния синхронных компенсаторов реактивной мощности; со второй выдержкой времени на отключение ЛЭП с двух сторон с запретом трехфазного автоматического повторного включения.

2. Вторая ступень по напряжению должна действовать на отключение ЛЭП с двух сторон с запретом трехфазного автоматического повторного включения.

В дополнение к вышеприведенным требованиям из правил устройства электроустановок [46] можно выделить следующие. АОПН должна действовать:

1. С выдержкой времени, величину которой необходимо отстроить от длительности коммутационных и атмосферных перенапряжений и качаний.

2. В первую очередь, на включение шунтирующих реакторов (если таковые имеются на электростанции или подстанции, где зафиксировано повышение напряжения). Если на электростанции или подстанции отсутствуют шунтирующие реакторы, имеющие выключатели, или включение реакторов не приводит к требуемому снижению напряжения, АОПН должна действовать на отключение ЛЭП, вызвавшей повышение напряжения.

Пользуясь опытом эксплуатации АОПН [47], также в устройстве необходимо ввести блокировку при оперативном включении линии под напряжение, т.к. этот режим сопровождается кратковременным повышением напряжения.

5.3 ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА НОВОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН

В соответствии с вышеприведенными требованиями (параграф 5.1), а также с использованием результатов исследований предыдущих разделов, предлагается функционально-логическая схема новой цифровой системы АОПН (рисунок 5.1).

В схеме амплитуда и фаза основной гармоники выделяются с помощью преобразования Фурье [44] (блоки ФОГ). Определяются комплексные значения токов обоих выключателей, фазные напряжения линии, а также напряжения дополнительной обмотки ТН между выводами Н-К и Н-И.

В блоках оценки действующего и максимального значения для каждой фазы определяются указанные величины по мгновенным значениям фазных напряжений.

Контрольная величина γ_n для каждой фазы формируется в блоке “Контрольная величина”.

В блоке БНН контролируется целостность вторичных измерительных цепей напряжения. Блок БНН выдает блокирующий сигнал в случае неисправности цепей напряжения. Алгоритм повторяет принципы, изложенные в [59].

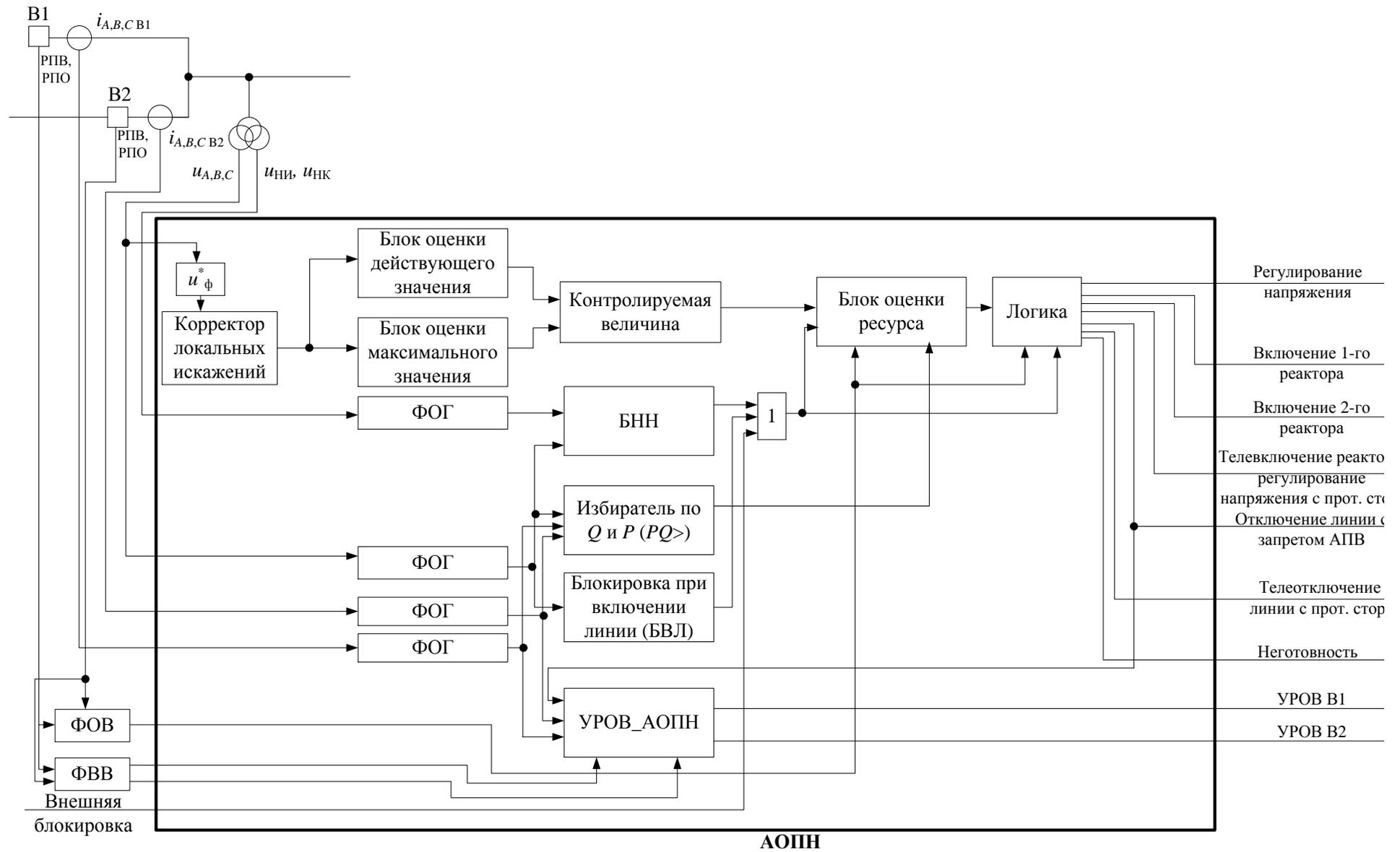


Рисунок 5.1 – Функционально-логическая схема новой цифровой системы АОПН

Избиратель по Q и P (по реактивной и активной мощности, соответственно, блок $PQ>$) определяет, является ли защищаемая линия источником перенапряжения и, если является, выдает разрешающий сигнал. Алгоритм функционирования избирателя аналогичен, изложенному в [47]. Блок выводится из работы, и его выход переводится в режим постоянной выдачи разрешающего сигнала при отключении линии со «своей» стороны. Отключение линии со «своей» стороны определяется по сигналам реле РПО выключателей В1 и В2.

Блокировка АОПН при оперативном включении линии под напряжение (блок БВЛ) и УРОВ АОПН выполняются аналогично соответствующим алгоритмам ШП 2704 [47].

В блоке оценки ресурса осуществляется следующая последовательность действий (рисунок 5.2):

1. По ВВХ защищаемого высоковольтного оборудования определяется допустимое время T_n нахождения изоляции под перенапряжением γ_n (см. раздел 1.3).
2. Оценивается остаточный ресурс электрической изоляции R по (3.2).
3. Оценивается интенсивность расхода остаточного ресурса электрической изоляции $\Delta_R^{T_n}$ по (3.1).
4. По найденным T_n , R и $\Delta_R^{T_n}$ формируются управляющие воздействия ступеней цифровой системы АОПН на технические средства ликвидации перенапряжения.

В блоке ВВХ для каждой фазы определяется допустимое время воздействия напряжения на изоляцию защищаемого оборудования по заданной вольт-временной характеристике.

Функционирование блока оценки ресурса приостанавливается при появлении блокирующего сигнала от любого из следующих источников: БНН, блокировки при включении линии, внешней блокировки.

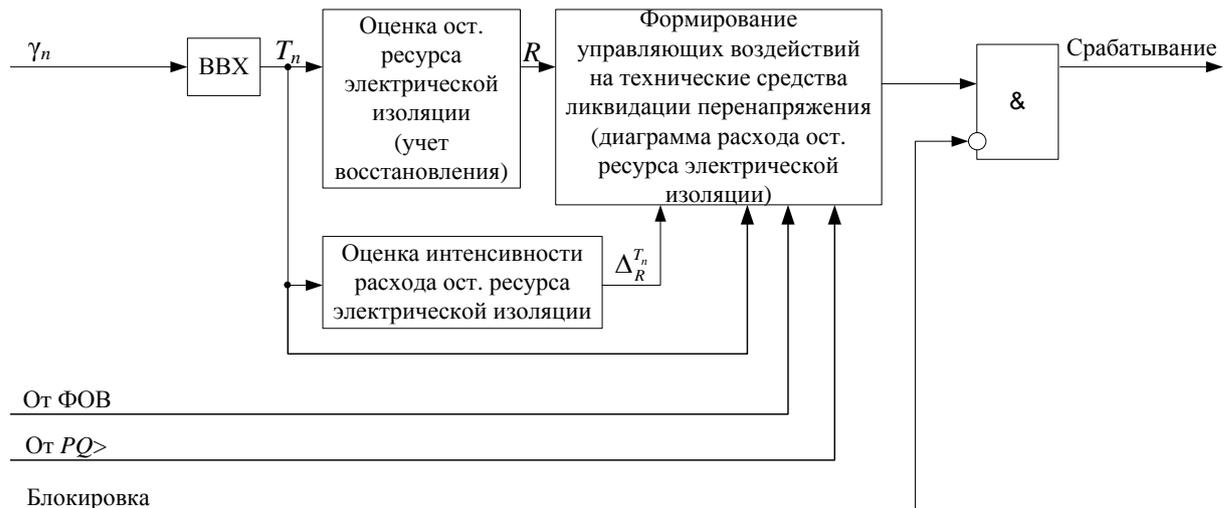


Рисунок 5.2 – Упрощенная функционально-логическая схема блока оценки ресурса

Входными сигналами блока логики являются:

1. Сигнал срабатывания блока оценки ресурса.
2. Сигналы функции ФОВ (фиксация отключения выключателя).
3. Сигнал блоктровки.

На основании вышеперечисленных входных сигналов блок логики формирует следующие управляющие воздействия:

1. Регулирование напряжения (например, возбуждения генераторов, коэффициентов трансформации).
2. Включение 1-го реактора.
3. Включение 2-го реактора.
4. Телевключение реактора с противоположной стороны.
5. Телеотключение линии с противоположной стороны.
6. Отключение линии с запретом АПВ.

Выходные реле АОПН блокируются при появлении любого из следующих сигналов: срабатывание БНН, блокировка при включении линии, внешняя блокировка.

5.4 ПРИВЕДЕНИЕ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ К ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ВЕЛИЧИНАМ

При формировании контролируемой величины фазные напряжения (рисунок 5.1) должны быть приведены к масштабу оси напряжений ВВХ (Приложение А) для возможности сравнения с ней.

Напряжения фаз должны приводиться к относительным величинам по следующей формуле:

$$u_{\phi}^* = \frac{|u_{\phi}|}{k_U \frac{100}{\sqrt{3}}},$$

где u_{ϕ} – фазное напряжение;

u_{ϕ}^* – фазное напряжение в относительных единицах;

k_U – отношение наибольшего рабочего напряжения к номинальному напряжению.

Коэффициент масштабирования k_U должен определяться согласно следующей таблице:

Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ	Наибольшее рабочее напряжение $U_{\text{наиб.раб.}}$, кВ	k_U , отн. ед.
110	126	1.146
220	252	1.146
330	363	1.1
500	525	1.05
750	787	1.049

Способ определения коэффициента масштабирования k_U , представлен на рисунке 5.3.

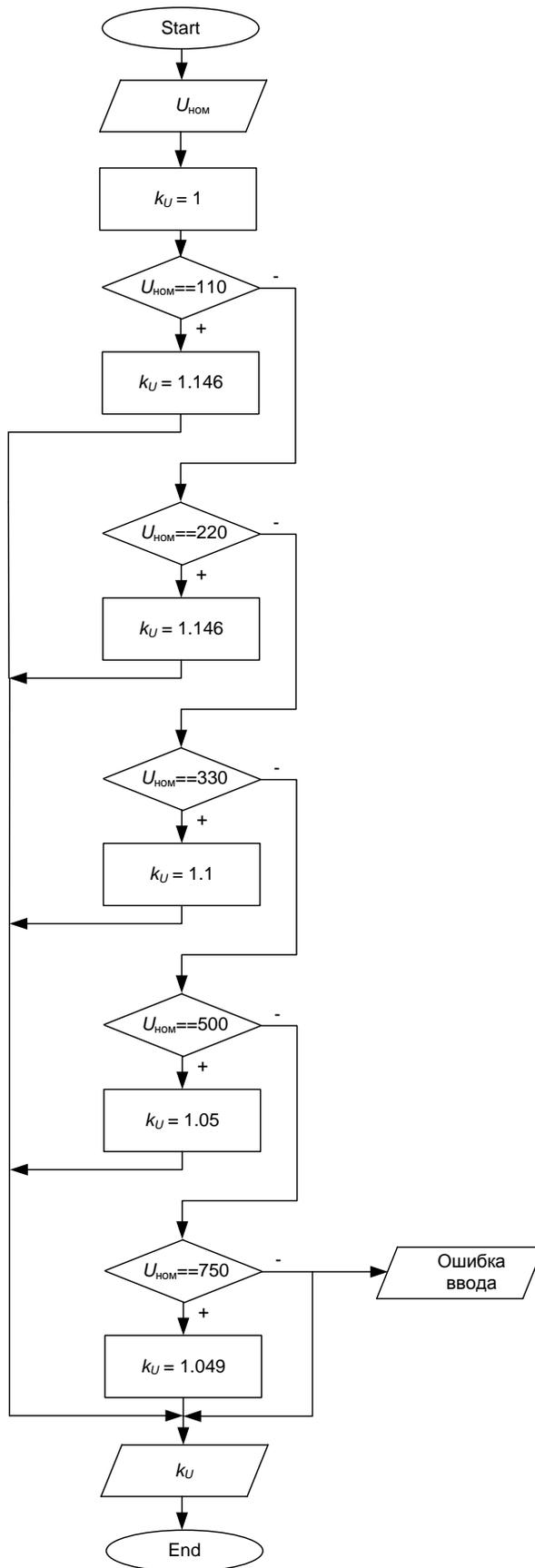
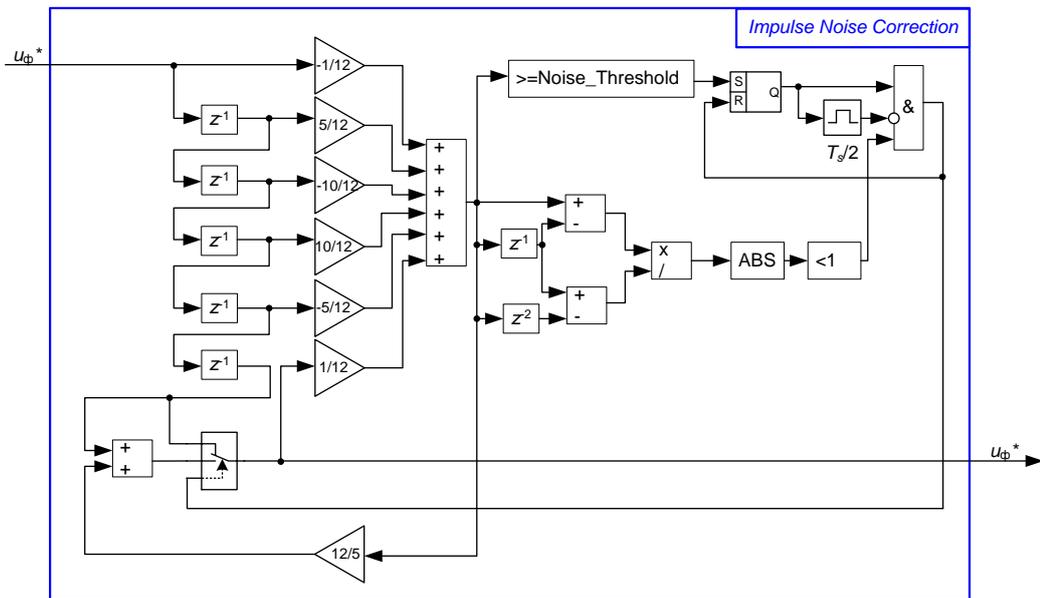


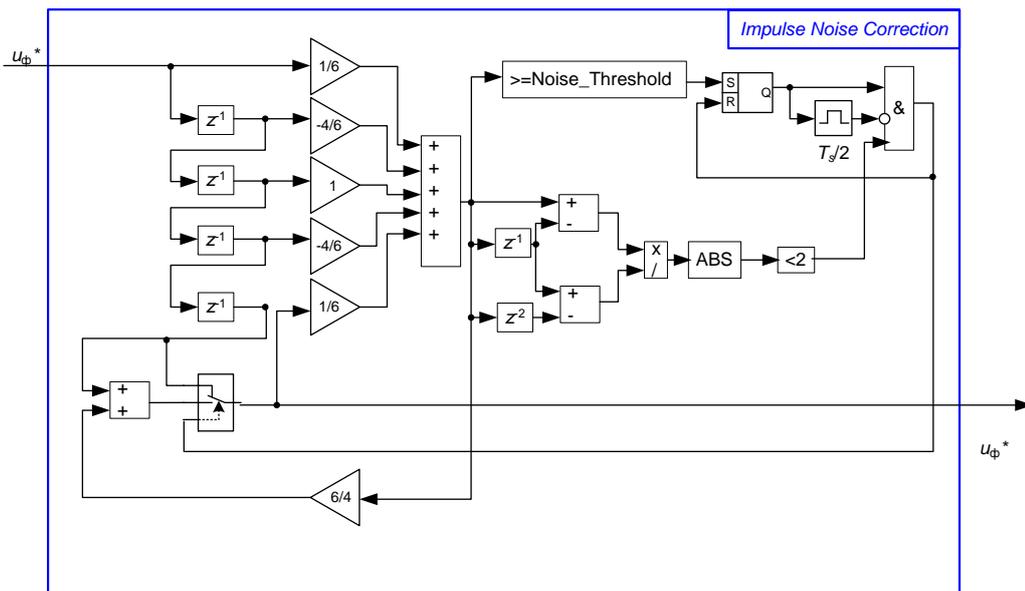
Рисунок 5.3 – Способ определения коэффициента масштабирования k_U

5.5 ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СПОСОБА КОРРЕКЦИИ ЛОКАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ

Функционально-логическая схема способа коррекции локального искажения на основе фильтра (4.24) показана на рисунке 5.4, а). Схема служит для исключения возможных одиночных локальных искажений произвольной полярности в сигнале напряжения, контролируемом АОПН.



а)



б)

Рисунок 5.4 – Функционально-логическая схема способа коррекции локального искажения

Схема соответствует способу коррекции локального искажения, описанному в разделе 4.3.

В схему введена моностабильная константа со временем импульса $T_s/2$ для блокировки сигнала превышения порога срабатывания (*Noise_Threshold* на рисунке 5.4, а). Блокировка снимается только на следующем шаге расчета, что позволяет избежать ошибочное определение местонахождения локального искажения при его вхождении в окно фильтра.

Специальные исследования показали, что порог срабатывания, равный $1/20$, позволяет обеспечить погрешность восстановления отсчета синусоидального сигнала частоты 50 Гц не более 0.1 %. Также было установлено, что способ может определить локальное искажение величиной 10 % от максимального значения в сигнале параметрического резонанса, включающего в себя первую (62 Гц) и вторую (124 Гц) синфазные гармоники равной амплитуды.

Также для примера на рисунке 5.4, б) показана функционально-логическая схема способа коррекции локального искажения на основе фильтра (4.10). В этой схеме порог срабатывания *Noise_Threshold* должен быть принят равным $1/10$.

Контроль и коррекция отсчетов с локальным искажением осуществляется для каждой фазы напряжения.

5.6 ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ АОПН УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЛИКВИДАЦИИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Функционально-логическая схема реагирующего органа (рисунок 5.2), реализованная в терминале АОПН, показана на рисунке 5.5.

Реагирующий орган использует следующие сигналы каждой фазы:

- оценка ресурса изоляции R_{ϕ} ;

- оценка интенсивности расхода остаточного ресурса электрической изоляции $\Delta_R^{T_{n,\phi}}$;

- допустимое время $T_{n,\phi}$ нахождения изоляции защищаемого оборудования под текущим напряжением.

Реагирующий орган использует следующие логические сигналы каждой фазы:

- перенапряжение (OV_ϕ);
- срабатывание ИО (измерительного органа) контроля величины и направления реактивной мощности и величины активной мощности (Сраб. PQ_ϕ);

- сигнал ФОВ ф (общий).

Выходными логическими сигналами реагирующего органа являются:

- Срабатывание *I* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб. *I*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);

- Срабатывание *II* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб. *II*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);

- Срабатывание *III* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб. *III*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);

- Перенапряжение;

- Срабатывание *I* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб. *I*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);

- Срабатывание *II* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб. *II*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);

- Срабатывание *III* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб. *III*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);

Выходной сигнал реагирующего органа ‘Перенапряжение’ формируется путем логического сложения сигналов OV_ϕ фаз.

Реагирующий орган имеет три ступени срабатывания. У каждой ступени два выхода: срабатывание при отключении линии со своей стороны (с ФОВ) и

срабатывание с разрешением от ИО контроля величины и направления реактивной мощности и величины активной мощности, т.е. при отключении линии с противоположной стороны (с $PQ>$).

При выводе из действия ИО $PQ>$ (выведенная накладка $VXN500$) ступени с PQ срабатывают только при включенной линии со своей стороны. Включенное состояние линии определяется по отсутствию сигнала ‘ФОВ ф (общий)’.

Предусмотрен ввод и вывод каждой ступени от накладки ($VXN501$, $VXN502$, $VXN503$, соответственно).

В блоке ‘*Switch*’ каждой фазы напряжения контролируется срабатывание ступеней. Функционально-логическая схема блока *Switch* показана на рисунке 5.6.

Для каждой фазы напряжения предусмотрено три ступени срабатывания:

I ступень. Диапазон контроля T_n – от 20 минут (не включительно) до 8 часов (включительно). Ступень срабатывает с выдержкой времени $DT500$ (время отстройки от непродолжительных и незначительных повышений напряжения в процессе эксплуатации электрооборудования) при снижении остаточного ресурса электрической изоляции до величины

$$(DT_{Iст} + DT_{IIст} + DT_{IIIст}) \Delta_R^{T_n, \phi},$$

где $DT_{Iст} = DT500$,

$$DT_{IIст} = DT502 + DT503 + DT505 + DT506,$$

$$DT_{IIIст} = DT505 + DT506,$$

$DT500$ – выдержка времени на срабатывания *I* ступени (отстройка от коммутационных перенапряжений),

$DT502$ – выдержка времени на срабатывание *II* ступени,

$DT503$ – время осуществления технических мероприятий *II* ступени,

$DT505$ – выдержка времени на срабатывание *III* ступени (принимается минимальной по ВВХ),

$DT506$ – время осуществления технических мероприятий *III* ступени (отключение линии с учетом действия УРОВ).

II ступень. Диапазон контроля T_a – от 20 секунд (не включительно) до 20 минут (включительно). Срабатывает с выдержкой времени $DT502$ (время включения 1-го реактора) при снижении остаточного ресурса электрической изоляции до величины

$$(DT_{IIст} + DT_{IIIст}) \Delta_R^{T_{n,\phi}}.$$

III ступень. *III* ступень срабатывает через заданное время $DT505$ при снижении величины оценки остаточного ресурса изоляции R_ϕ до величины

$$DT_{IIIст} \Delta_R^{T_{n,\phi}}.$$

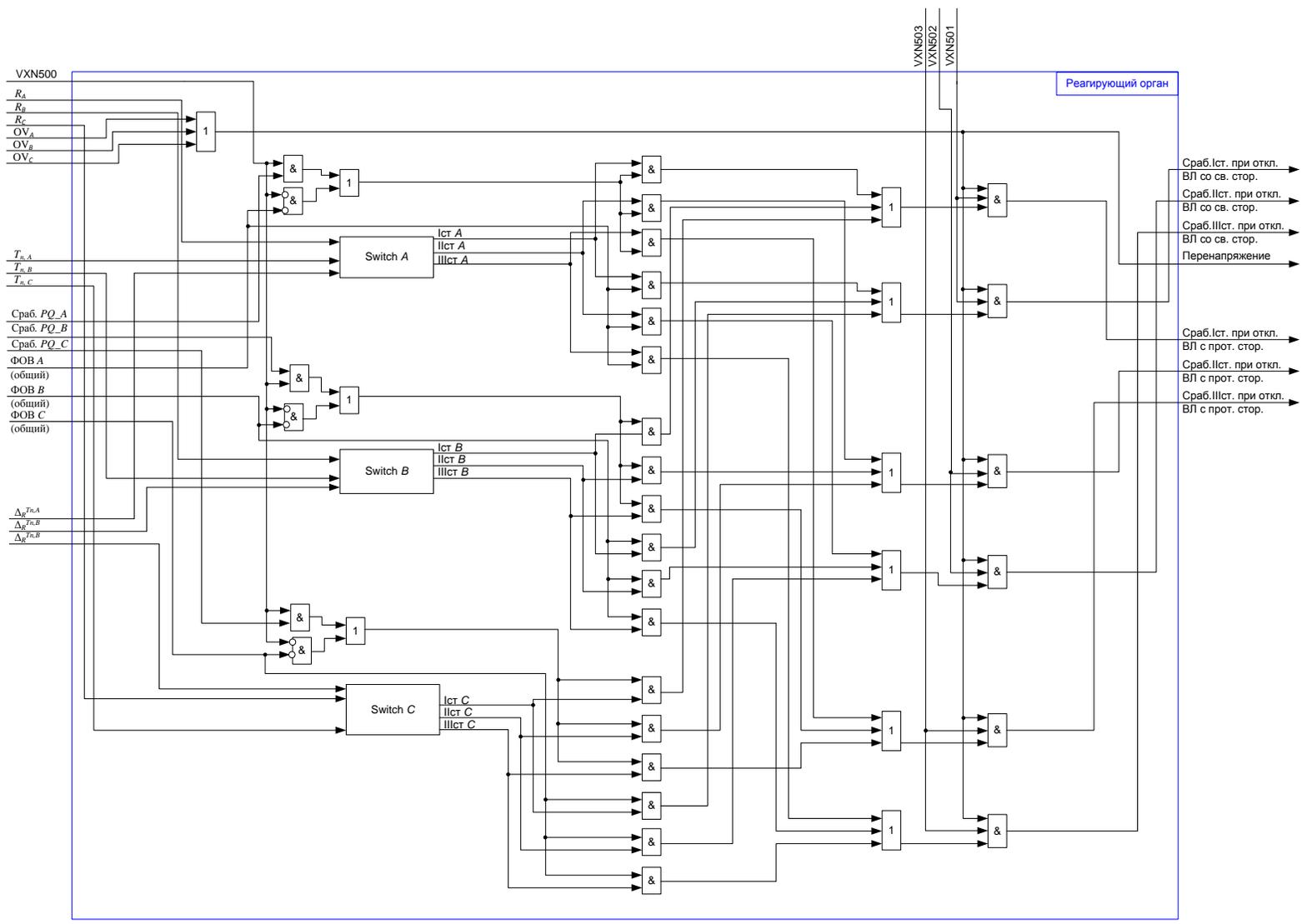
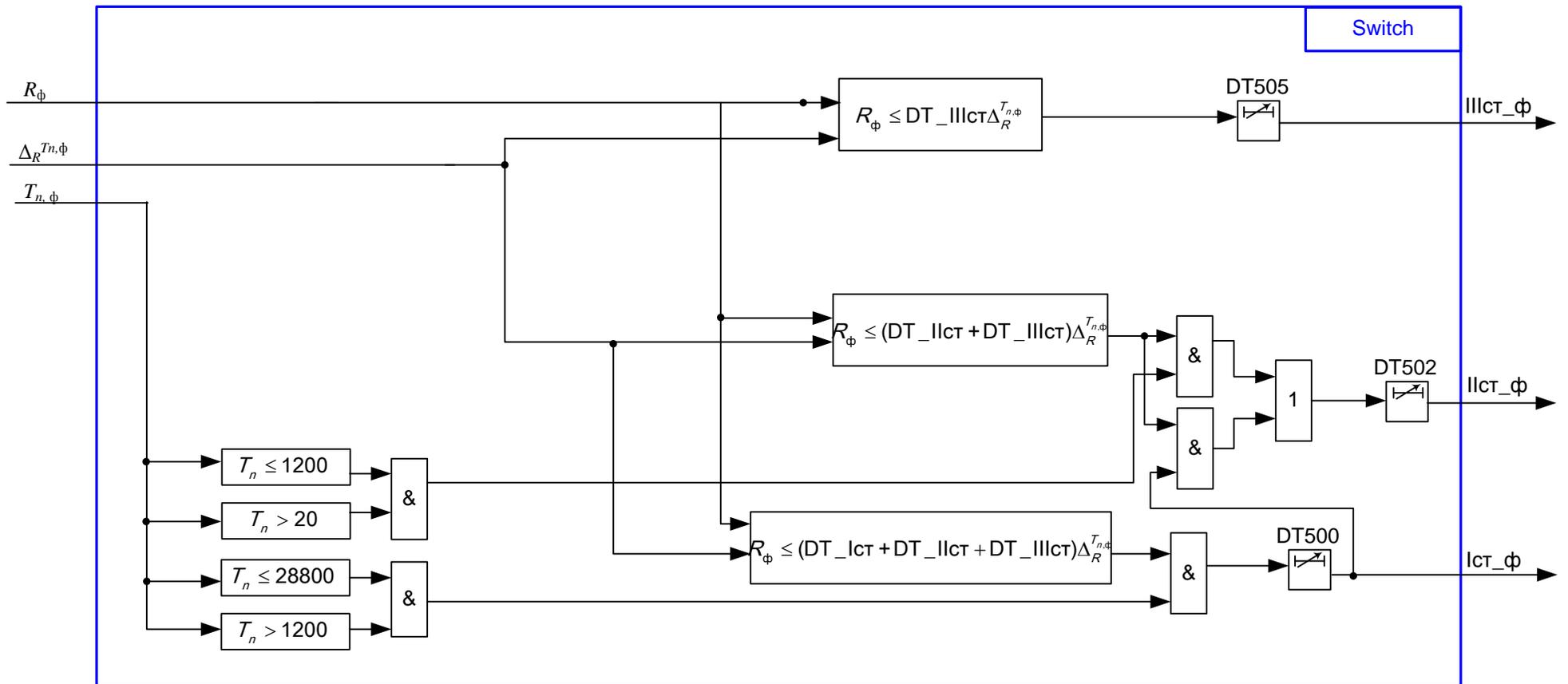


Рисунок 5.5 – Функционально-логическая схема реагирующего органа

Рисунок 5.6 – Функционально-логическая схема блока *Switch*

5.7 БЛОК ЛОГИКИ

Логика АОПН показана на схеме рисунке 5.7 (логика может меняться в зависимости от проектных требований).

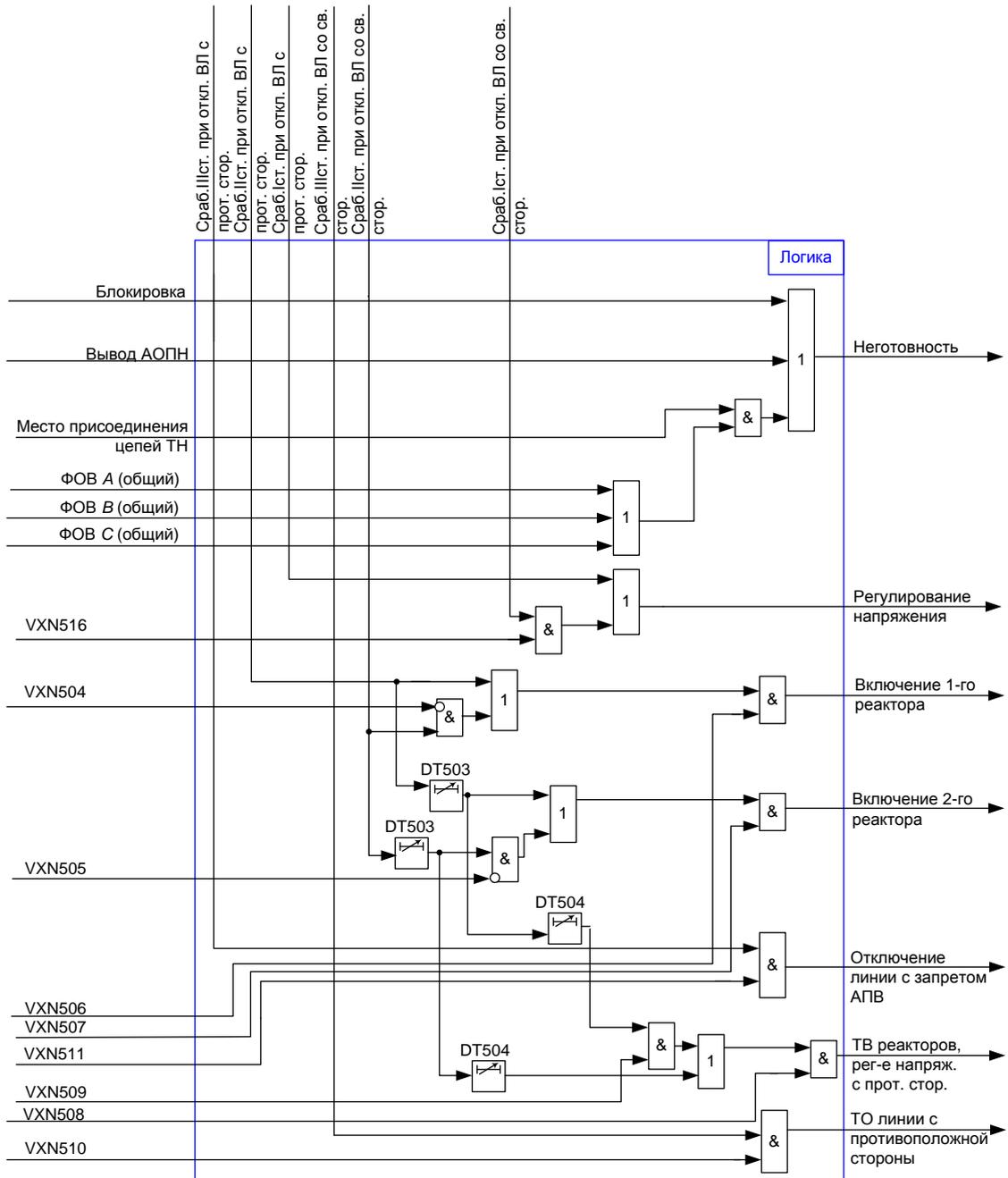


Рисунок 5.7 – Схема логики АОПН

В блоке логики используются следующие логические сигналы:

- срабатывание *I* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб.*I*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);
- срабатывание *II* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб.*II*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);
- срабатывание *III* ступени при отключении ВЛ со своей стороны (Сраб.*III*ст. при откл. ВЛ со св. стор.);
- срабатывание *I* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб.*I*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);
- срабатывание *II* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб.*II*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);
- срабатывание *III* ступени при отключении ВЛ с противоположной стороны (Сраб.*III*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.);
- блокировка;
- место присоединения цепей ТН (1 – шины, 0 – линия);
- вывод АОПН;
- ФОВ *A* (общий);
- ФОВ *B* (общий);
- ФОВ *C* (общий).

Выходными логическими сигналами блока логики являются:

- неготовность;
- регулирование напряжения;
- включение 1-го реактора;
- включение 2-го реактора;
- отключение линии с запретом АПВ;
- ТВ реакторов, рег-е напряж. с прот. стор.;
- ТО линии с противоположной стороны.

Сигнал ‘Неготовность’ формируется на выходе блока логики при выполнении любого из следующих условий:

- блокировке АОПН (от сигнала ‘Блокировка’);

- при выводе АОПН из работы (от сигнала ‘Вывод АОПН’);
- при отключении любой фазы линии (от сигналов: ‘ФОВ А (общий)’, ‘ФОВ В (общий)’, ‘ФОВ С (общий)’ в случае присоединения цепей ТН к шинам (от сигнала ‘Место присоединения цепей ТН’).

Предусмотрена блокировка автоматики (блока логики) от сигнала ‘Неготовность’.

Формирование сигнала АОПН на регулирование напряжения (сигнал ‘Регулирование напряжения’) происходит при выполнении любого из следующих условий:

- срабатывание I ступени с контролем стока реактивной мощности (от сигнала ‘Сраб.Ист. при откл. ВЛ с прот. стор.’);
- срабатывание I ступени при отключенном выключателе со своей стороны (от сигнала ‘Сраб.Ист. при откл. ВЛ со св. стор.’) при введенной накладке VХN516.

Действие АОПН на включение 1-го реактора со своей стороны (сигнал ‘Включение 1-го реактора’) происходит при выполнении любого из следующих условий:

- срабатывании II ступени с контролем стока реактивной мощности (от сигнала ‘Сраб.Ист. при откл. ВЛ с прот. стор.’);
- срабатывание II ступени без контроля стока мощности (от сигнала ‘Сраб.Ист. при откл. ВЛ со св. стор.’), если 1-ый реактор подключен к линии (при выведенной накладке VХN504).

Предусмотрен оперативный переключатель для запрета включения 1-го реактора (VХN506).

Действие АОПН на включение 2-го реактора со своей стороны (сигнал ‘Включение 2-го реактора’) происходит при выполнении любого из следующих условий:

- через заданное время (*DT503*) после срабатывания II ступени с контролем стока реактивной мощности (сигнал ‘Сраб.Ист. при откл. ВЛ с прот. стор.’);

- через заданное время (*DT503*) после срабатывания *II* ступени без контроля стока реактивной мощности (сигнал ‘Сраб.*II*ст. при откл. ВЛ со св. стор.’), если 2-ой реактор подключен к линии (при выведенной накладке *VXN505*).

Предусмотрен оперативный переключатель для запрета включения 2-го реактора (*VXN507*).

Действие АОПН на ТВ реакторов с противоположной стороны и регулирование напряжения (сигнал ‘ТВ реакторов, рег-е напряж. с прот. стор.’) происходит при введенной накладке (*VXN508*) и при выполнении любого из следующих условий:

- через заданное время (*DT504*) после выдачи управляющего сигнала на включение 2-го реактора от ступеней без контроля стока реактивной мощности (сигнал ‘Сраб.*II*ст. при откл. ВЛ со св. стор.’);

- через заданное время (*DT504*) после выдачи управляющего сигнала на включение 2-го реактора от *II* ступени с контролем стока реактивной мощности (сигнал ‘Сраб.*II*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.’) при введенной накладке (*VXN509*), когда с противоположного конца реакторы установлены на самой линии и средства регулирования напряжения могут влиять на уровень напряжения на линии.

Действие АОПН на ТО линии с противоположной стороны (сигнал ‘ТО линии с противоположной стороны’) должно происходить при введенной накладке (*VXN510*) и при выполнении следующего условия:

- срабатывание *III* ступени с контролем срабатывания ФОВ (от сигнала ‘Сраб.*III*ст. при откл. ВЛ со св. стор.’).

Действие АОПН на отключение линии со своей стороны (сигнал ‘Отключение линии’) должно происходить при выполнении условия:

- срабатывание *III* ступени с контролем стока реактивной мощности (от сигнала ‘Сраб.*III*ст. при откл. ВЛ с прот. стор.’). Должна предусматриваться накладка (*VXN511*) для разрешения/запрета отключения линии со своей стороны от ступени с контролем стока реактивной мощности.

5.8 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН КОНТРОЛЯ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Функционально-логическая схема ИО контроля величины и направления реактивной мощности и величины активной мощности ($PQ>$) соответствует схеме рисунка 5.9.

ИО $PQ>$ использует:

- напряжения защищаемой линии ($\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$);
- токи с 1-го выключателя $B1$ ($\underline{I}_{A_B1}, \underline{I}_{B_B1}, \underline{I}_{C_B1}$);
- токи со 2-го выключателя $B2$ ($\underline{I}_{A_B2}, \underline{I}_{B_B2}, \underline{I}_{C_B2}$);
- токи 1-го реактора ($\underline{I}_{A_P1}, \underline{I}_{B_P1}, \underline{I}_{C_P1}$);
- токи 2-го реактора ($\underline{I}_{A_P2}, \underline{I}_{B_P2}, \underline{I}_{C_P2}$).

Выходным логическим сигналом ИО $PQ>$ являются:

- пофазное срабатывание (Сраб. PQ_A , Сраб. PQ_B , Сраб. PQ_C).

В ИО $PQ>$ определяются фазные токи линии ($\underline{I}_{L_ф}$) как сумма соответствующих фаз токов 1-го и 2-го выключателей за вычетом соответствующих фаз токов 1-го и 2-го реакторов:

$$\underline{I}_{L_ф} = \underline{I}_{ф_B1} + \underline{I}_{ф_B2} - \underline{I}_{ф_P1} - \underline{I}_{ф_P2}.$$

Далее в ИО $PQ>$ определяются активная P_ϕ и реактивная Q_ϕ мощности, передаваемые по каждой фазе линии:

$$P_\phi = \operatorname{Re}[\underline{S}_\phi];$$

$$Q_\phi = \operatorname{Im}[\underline{S}_\phi],$$

где

$$\underline{S}_{\phi} = \underline{U}_{\phi} I_{\text{л}_\phi}^*$$

Сигнал срабатывания ИО $PQ>$ соответствующей фазы ('Сраб. PQ_ϕ ') формируется, если величина $-Q_\phi - K_T|P_\phi|$ превышает уставку $Q_{\text{уст}}$. Пример характеристики срабатывания ИО $PQ>$ показан на рисунке 5.8.

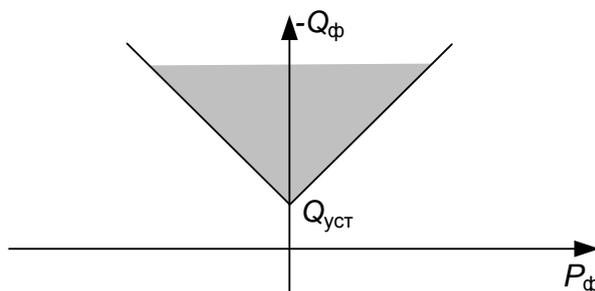


Рисунок 5.8 – Пример характеристики срабатывания ИО $PQ>$

Предусмотрен ввод/вывод ИО $PQ>$ от накладки VХN500 (типовой бланк уставок АОПН представлен в Приложении Б).

Фазные токи 1-го и 2-го реакторов не учитываются при их подключении к шинам (при введенных накладках VХN504, VХN505, рисунок 5.10), т.е. в случае, когда ток линии может быть замерен непосредственно с ТТ.

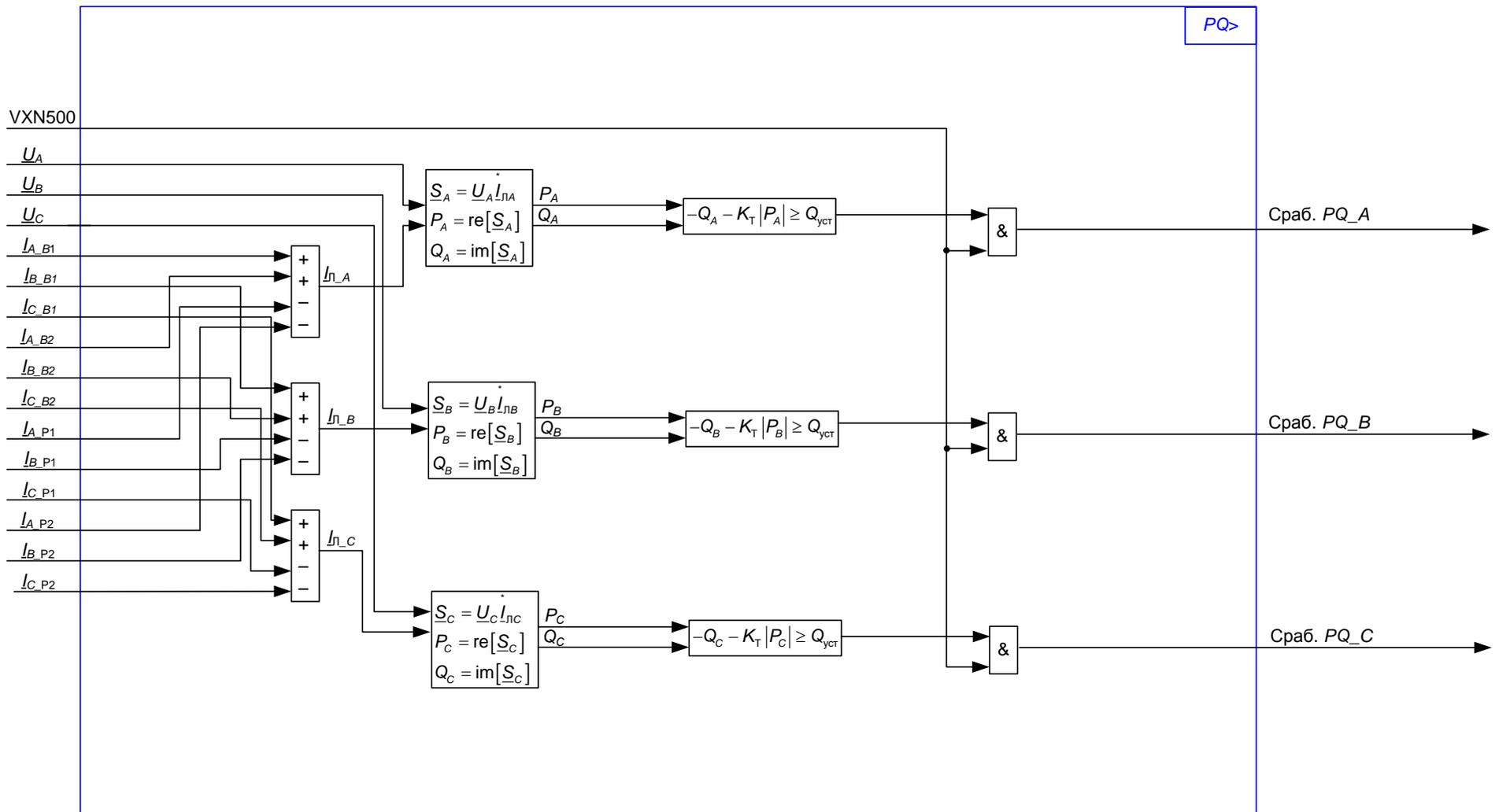


Рисунок 5.9 – Функционально-логическая схема ИО PQ>

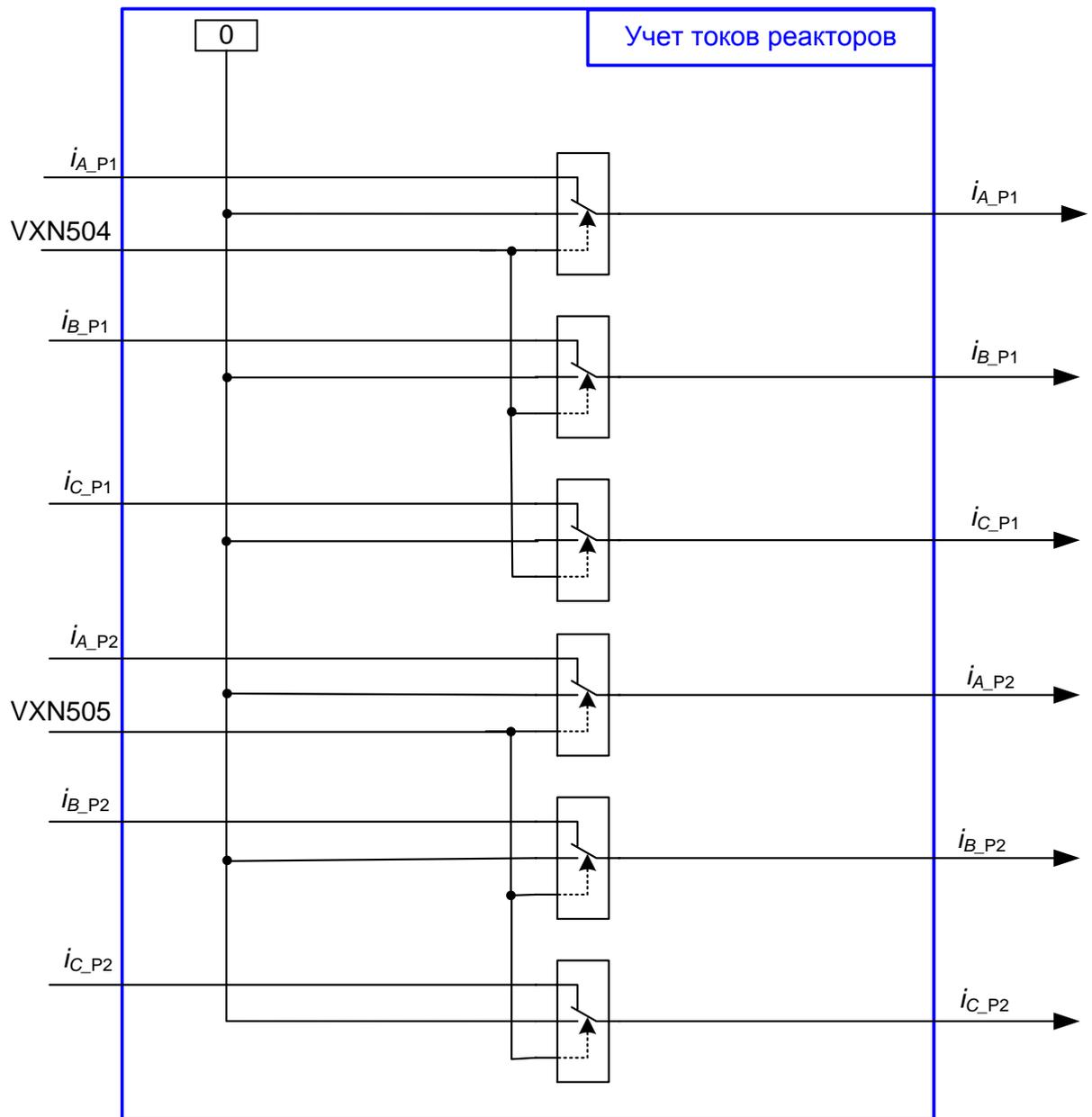


Рисунок 5.10 – Учет токов реакторов

5.9 БЛОКИРОВКА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЛИНИИ

Функционально-логическая схема блокировки при включении линии (БВЛ) показана на рисунке 5.11.

БВЛ формирует сигнал блокировки при включении линии под напряжение, т.е. в режиме, когда возможно кратковременное коммутационное перенапряжение, способное вызвать ложное срабатывание АОПН.

В БВЛ используются фазные напряжения защищаемой линии.

Выходным логическим сигналом БВЛ является блокировка при включении линии под напряжение (сигнал 'Блокировка').

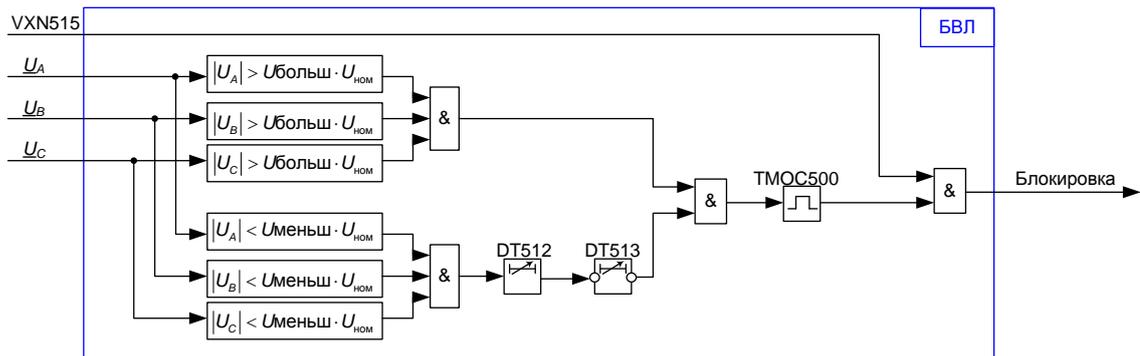


Рисунок 5.11 – Функционально-логическая схема БВЛ: $|U_{\phi}|$ – модуль фазного напряжения; $U_{\text{меньш}}$, $U_{\text{больш}}$ – коэффициенты

Предусмотрен ввод и вывод БВЛ от накладки VXN515.

5.10 ФУНКЦИЯ УРОВ АОПН

Функционально-логическая схема УРОВ АОПН соответствует схеме, показанной на рисунке 5.12.

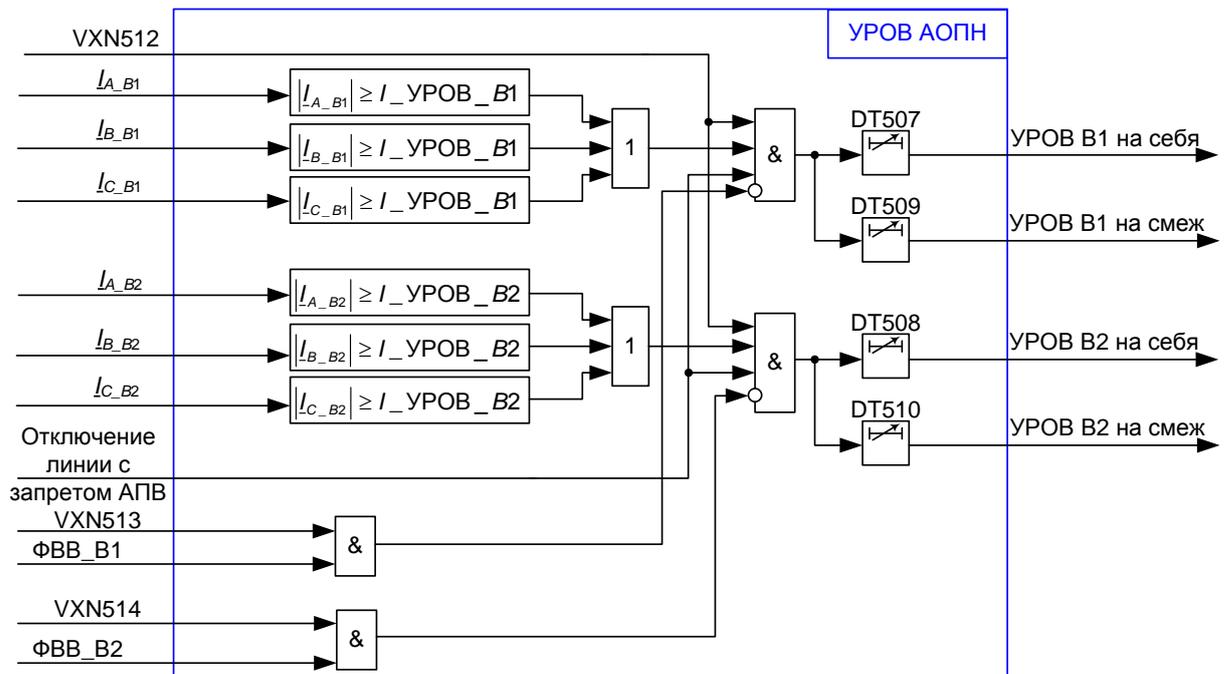


Рисунок 5.12 – Функционально-логическая схема УРОВ АОПН

В функции УРОВ АОПН используются следующие аналоговые сигналы:

- фазные токи с выключателя $B1$;
- фазные токи с выключателя $B2$.

В функции УРОВ АОПН используются следующие логические сигналы:

- отключение линии с запретом АПВ;
- ФВВ_В1 (фиксация включения выключателя $B1$);
- ФВВ_В2 (фиксация включения выключателя $B2$).

Выходными логическими сигналами функции УРОВ АОПН являются:

- УРОВ $B1$ на себя;
- УРОВ $B1$ на смеж;
- УРОВ $B2$ на себя;
- УРОВ $B2$ на смеж.

Предусмотрена дополнительная фиксация неотключения выключателей от сигналов ФВВ_В1 и ФВВ_В2.

Предусмотрен вывод дополнительной фиксации неотключения выключателей от накладок (VXN513, VXN514).

Функция УРОВ АОПН формирует логический сигнал ‘УРОВ В1 на себя’ через заданное время ($DT507$) после формирования сигнала ‘Отключение линии с запретом АПВ’, если абсолютная величина любого из фазных токов ($/I_{A_B1}/$, $/I_{B_B1}/$, $/I_{C_B1}/$), протекающего через выключатель $B1$, не меньше заданной уставки ($I_УРОВ_B1$).

Функция УРОВ АОПН формирует логический сигнал ‘УРОВ В1 на смеж’ через заданное время ($DT509$) после формирования сигнала ‘Отключение линии с запретом АПВ’, если абсолютная величина любого из фазных токов ($/I_{A_B1}/$, $/I_{B_B1}/$, $/I_{C_B1}/$), протекающего через выключатель $B1$, не меньше заданной уставки ($I_УРОВ_B1$).

Функция УРОВ АОПН формирует логический сигнал ‘УРОВ В2 на себя’ через заданное время ($DT508$) после формирования сигнала ‘Отключение линии с запретом АПВ’, если абсолютная величина любого из фазных токов ($/I_{A_B2}/$, $/I_{B_B2}/$, $/I_{C_B2}/$), протекающего через выключатель $B2$, не меньше заданной уставки ($I_УРОВ_B2$).

Функция УРОВ АОПН формирует логический сигнал ‘УРОВ В2 на смеж’ через заданное время ($DT510$) после формирования сигнала ‘Отключение линии с запретом АПВ’, если абсолютная величина любого из фазных токов ($/I_{A_B2}/$, $/I_{B_B2}/$, $/I_{C_B2}/$), протекающего через выключатель $B2$, не меньше заданной уставки ($I_УРОВ_B2$).

Более подробное описание функции УРОВ АОПН представлено в [48].

5.11 АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АОПН

Предлагаемая в работе АОПН реализована на линейке многофункциональных терминалов ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары.

Конструктивно терминалы серии ЭКРА 200 выполняются в виде блочного каркаса. Внешний вид терминала приведен на рисунке 5.13. Терминалы изготавливаются для установки в шкаф, а также как самостоятельное устройство.



Рисунок 5.13 – Общий вид терминала серии ЭКРА 200

5.12 ИСПЫТАНИЯ НА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ КОМПЛЕКСЕ RTDS

Цифровая система АОПН успешно прошла испытания на программно-аппаратном комплексе RTDS (программно-аппаратный комплекс испытаний в реальном масштабе времени). В качестве примера на рис. 5.14 показана работа цифровой системы АОПН в режиме повышения напряжения вследствие отключения линии с противоположной стороны. В опыте уровень напряжения $u^* = 1,25$ соответствует работе II ступени, которая реагирует на действующее значение. В эксперименте цифровая система АОПН сработала верно, выдав сигнал на ввод технического мероприятия для снижения напряжения (включение реактора в момент $t = 5,74$ с, сигнал 1). Моделировался отказ технического мероприятия, поэтому цифровая система АОПН в момент $t = 18,69$ с по факту

снижения остаточного ресурса электрической изоляции R до пороговой величины R_{II}^{Tn} , выявила отказ и ввела в действие технические мероприятия III степени – отключение линии (сигнал 2). Цифровая система АОПН выдала сигнал на отключение высоковольтное оборудование до момента исчерпания ресурса электрической изоляции R , исключив его повреждение. После исчезновения перенапряжения (при $t > 19$ с) цифровая система АОПН начинает вести учет восстановления ресурса электрической изоляции.

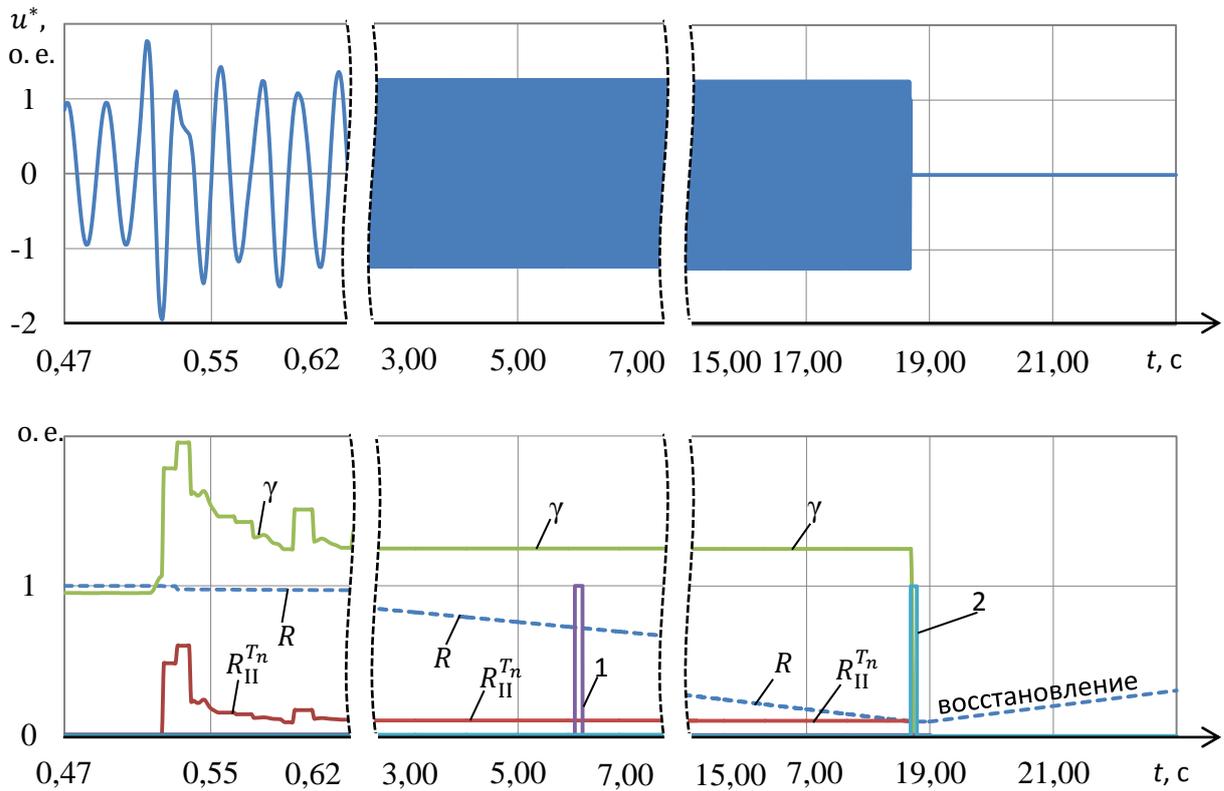


Рис. 5.14. Работа новой цифровой системы АОПН в режиме повышения напряжения при отключении ЛЭП с противоположной стороны: u^* – относительная величина напряжения, 1 – введение в действие технического мероприятия II степени (включение реактора), 2 – фиксация отказа технического мероприятия II степени и введение в действие технического мероприятия III степени (отключение линии)

ВЫВОДЫ:

1. Результаты исследований настоящей диссертационной работы использованы при разработке современной микропроцессорной АОПН на

линейке многофункциональных терминалов серии ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары. Разработка подготовлена к серийному производству.

2. В разработанном устройстве реализованы:

– новые измерительные органы оценки максимального и действующего значения;

– новый измерительный орган оценки расходования и восстановления ресурса изоляции защищаемого высоковольтного электрооборудования;

– новый измерительный орган формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения;

– новый способ коррекции локального искажения во входных сигналах.

3. Разработанное устройство соответствует стандартам ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС», а также требованиям правил устройства электроустановок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1 Предложены способы повышения точности оценки контролируемой величины (способы оценки максимального и действующего значения напряжения), обладающие повышенной точностью измерения при отклонении частоты сети от номинального значения, а также при наличии в сигнале высших гармоник. При параметрическом резонансе с отклонением частоты сети до 12 Гц – в режиме, отмеченном для АОПН как самый тяжёлый, – точность оценки при $f_s = 1000$ Гц предлагаемыми способами максимального значения в 5 раз выше и действующего значения более 3 раз выше, чем аналогичные оценки, сформированные классическими способами. Предложенные в работе способы защищены патентами РФ № 2525832 и 2521745.

2 Разработаны новые алгоритмы цифровой системы АОПН на основе предложенного в работе способа учета восполнения ресурса электрической изоляции защищаемого электрооборудования и способа формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации перенапряжения. Предложенные способы исключают преждевременное отключение электрооборудования, а также продолжение его эксплуатации при исчерпанном ресурсе электрической изоляции. На предлагаемые способы поданы заявки на изобретение РФ № 2014106471 и 2014121980.

3 Введено новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции, а также используется в процессе своевременной реализации технических мероприятий при ликвидации перенапряжения.

4 Предложен способ повышения устойчивости функционирования цифровой системы АОПН в условиях локального искажения входного сигнала

(способ восстановления контролируемой величины). Способ обладает повышенной чувствительностью к локальным искажениям и высокой точностью восстановления отсчета сигнала (погрешность восстановления отсчета сигнала частоты 50 Гц не превышает 0,1 % при $f_s = 1000$ Гц). Способ может определить и устранить локальное искажение величиной 5 % от максимального значения при $f_s = 1000$ Гц в сигнале параметрического резонанса, включающего в себя первую и вторую синфазные гармоники равной амплитуды при отклонении частоты основной гармоники на 12 Гц от номинальной. На предлагаемый способ подана заявка на изобретение РФ № 2014144793.

5 Результаты исследований диссертационной работы использованы при разработке современной микропроцессорной системы АОПН на линейке многофункциональных терминалов серии ЭКРА 200 производства ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары. Разработка подготовлена к серийному производству. Устройство соответствует стандартам ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС», а также требованиям Правил устройства электроустановок.

6 Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

7 Основные теоретические и практические положения диссертации могут быть использованы при разработке новых цифровых систем РЗ и А.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АОПН	автоматическое ограничение повышения напряжения
АПВ	автоматическое повторное включение
АФЧХ	амплитудно-фазовая частотная характеристика
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
БВЛ	блокировка при включении линии
БНН	блокировка при неисправностях цепей напряжения
ВЛ	воздушная линия
ВВХ	вольт-временная характеристика
ИО	измерительный орган
ЛЭП	линия электропередачи
ОПН	ограничитель перенапряжения
РЗА	релейная защита и автоматика
РПВ	реле положения “включено”
РПО	реле положения “отключено”
ТН	трансформатор напряжения
ТТ	трансформатор тока
УРОВ	устройство резервирования отказа выключателя
ФВВ	фиксация включения выключателя
ФОВ	фиксация отключения выключателя
ФОГ	фильтр основной гармоники
ФЧХ	фазо-частотная характеристика
ХХ	холостой ход
ЭЭС	электроэнергетическая система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 59012820.29.240.001-2011 Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – ОАО «СО ЕЭС», 2011. – 30 с.

2. Акинин, А.А. Микропроцессорное устройство автоматики ограничения повышения напряжения с контролем ресурса оборудования / А.А. Акинин, И.А. Иванов, Д.Р. Любарский // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 1. – С. 92-101.

3. Алпатов, М.Е. Проблема высокочастотных перенапряжений в силовых трансформаторах / М.Е. Алпатов, В.В. Базуткин // Электро. – 2009. – № 3. – С. 11-16.

4. Антонов, В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем / В.И. Антонов, Н.М. Лазарева, В.И. Пуляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 84 с.

5. Антонов, В.И. Эффективные алгоритмы обработки входных сигналов цифровой автоматики ограничения повышения напряжения / В.И. Антонов, В.А. Наумов, В.С. Петров // Электрические станции. – 2013. – № 11. – С. 42-45.

6. Арсентьев, А.П. Новые функциональные возможности устройств РЗА высокого напряжения / А.П. Арсентьев, Г.С. Нудельман, А.А. Шапеев // Релейная защита и автоматика энергосистем 2004: сборник докладов конференции. – Москва, 2004. – С. 234-237.

7. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.И. Атабеков. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.

8. СТО 56947007-33.040.20.123-2012 Аттестационные требования к устройствам противоаварийной автоматики (ПА). – ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2012. – 71 с.

9. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 462 с.

10. Балыгин, И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков / И.Е. Балыгин. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 227 с.
11. Барзам, А.Б. Системная автоматика / А.Б. Барзам. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
12. Белецкий, З.М. Электрическая прочность изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения при кратковременных воздействиях / З.М. Белецкий // Электричество. – 1978. – № 9. – С. 64-67.
13. Беляков, Н.Н. Результаты измерений внутренних перенапряжений и характеристик электрооборудования в советских электропередачах 750 кВ / Н.Н. Беляков, А.Н. Комаров, В.С. Рашкес // СИГРЭ: сборник докладов. – Париж, 1978. – № 33-08.
14. Беркович, М.А. Автоматика энергосистем / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
15. Беркович, М.А. Основы автоматики энергосистем / М.А. Беркович, А.Н. Комаров, В.А. Семенов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 с.
16. Борисов, Р.К. Новый подход к моделированию импульсных помех во вторичных цепях электрических подстанций / Р.К. Борисов, Е.С. Колечицкий, Е.В. Коломиец // Электричество. – 2007. – № 12. – С. 51-53.
17. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
18. Глушкин, И.З. Противоаварийная автоматика в энергосистемах / И.З. Глушкин, Б.И. Иофьев. – М.: Знак, 2009. – 568 с. – 1 т.
19. Глушкин, И.З. Противоаварийная автоматика в энергосистемах / И.З. Глушкин, Б.И. Иофьев. – М.: Знак, 2011. – 528 с. – 2 т.
20. Гоник, Я.Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я.Е. Гоник, Е.С. Иглицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.
21. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Мн.: ТетраСистемс, 1999. – 640 с.
22. Дементьев, Ю.А. Применение статических компенсаторов для регулирования напряжения на подстанциях 330 и 500 кВ / Ю.А. Дементьев, В.И.

Кочкин, Р.М. Идиатуллово, С.Г. Папафанасопуло, А.А. Смирнов, С.Г. Смирнов // Электрические станции. – 2003. – № 12. – С. 31-36.

23. Долгинов, А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике / А.И. Долгинов. – М: Энергия, 1968. – 464 с.

24. Дьяков, А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие для вузов / А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 336 с.

25. ГОСТ Р 55105-2012 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.

26. Ефремов, В. Устройство противоаварийной автоматики «ИЦ «Бреслер» / В. Ефремов, А. Подшивалин, Э. Кушников // Энергетика и промышленность России. – 2010. – № 22. – С. 14.

27. Иванов, В.А. Математические основы теории автоматического регулирования: учебное пособие для вузов / В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов, А.С. Ющенко. – М.: Высш. школа, 1977. – 454 с.

28. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них/ К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 367 с.

29. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: учебник для вузов / К.П. Кадомская, В.В. Базуткин, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.

30. Качесов, В.Е. Резонансные перенапряжения в неполнофазных режимах в поперечно компенсированных ЛЭП СВН / В.Е. Качесов, Д.В. Качесов // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 44-50.

31. Костенко, М.В. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения/ М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. – Ленинград: Наука, 1988. – 302 с.

32. Красильникова, Т.Г. Исключение резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах в четырехфазных линиях с помощью комбинированной компенсации / Т.Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 256-259.

33. Кротенок, В.В. Разработка устройства глубокого ограничения перенапряжений в электросети / В.В. Кротенок // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009. – № 1. – С. 59-65.

34. Кузнецов, М.Б. Защита микропроцессорной аппаратуры и ее цепей на электрических станциях и подстанциях от вторичных проявлений молниевых разрядов / М.Б. Кузнецов, М.В. Матвеев // Электро. – 2007. – № 6. – С. 10-15.

35. Кузнецов, М.Б. Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений / М.Б. Кузнецов, Д.А. Кунгуров, М.В. Матвеев, В.Н. Тарасов // Электро. – 2007. – № 1. – С. 36-42.

36. Левиуш, А. И. О возможности появления третьей гармоники при включении ВЛ 750 кВ на холостой ход / А. И. Левиуш, В.И. Катунян // Электротехника. – 1987. – № 2. – С. 55-58.

37. Левиуш, А.И. Исследование на математической модели параметрического резонанса на второй гармонике для анализа работы релейной защиты ВЛ / А.И. Левиуш, В.И. Катунян // Электричество. – 1990. – № 1. – С. 57-62.

38. Лоханин, А. К. Допустимые для электрооборудования кратковременные эксплуатационные повышения напряжения частоты 50 Гц / А. К. Лоханин, А. В. Сапожников // Электротехника. – 1981. – № 5. – С. 3-8.

39. Лысков, Ю.И. Внутренние перенапряжения и защита от них в дальних электропередачах 500 кВ. Дальние электропередачи 500 кВ / Ю.И. Лысков, Н.Н. Соколов. – М.: Энергия, 1964. – 153 с.

40. Любарский, Д.Р. Повышение устойчивости функционирования устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов: автореф. дис.

на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.02 / Любарский Дмитрий Романович. – Иваново, 2006. – 35 с.

41. Максимов, В.В. О переключениях в электрических сетях 110 – 750 кВ при неполнофазных режимах / В.В. Максимов, В.М. Максимов // Электрические станции. – 2013. – № 3. – С. 41-44.

42. Овчаренко, Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: учебник для вузов / Н.И. Овчаренко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.

43. Овчаренко, Н.И. Автоматика энергосистем: учебник для вузов / Н.И. Овчаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 475 с.

44. Овчаренко, Н.И. Аппаратные и программные элементы автоматических устройств энергосистем / Н.И. Овчаренко. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. – 512 с.

45. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ). – М.: Издательство ДЕАН, 2012. – 145 с.

46. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), 7-ое издание. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 160 с.

47. Розенблюм, Ф.М. Устройство автоматического ограничения повышения напряжения на базе шкафа автоматики ШП 2704 / Ф.М. Розенблюм, В.Г. Салова, Г.Л. Брухис, В.А. Гладышев, И.З. Глускин // Электрические станции. – 1989. – № 4. – С. 60-65.

48. Руководство по эксплуатации терминалов серии ЭКРА 200 / ООО НПП «ЭКРА». – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2014. – 153 с.

49. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. – Санкт-Петербург: Издательство ПЭИПК, 1999. – 77 с.

50. Руководящие указания по выбору уставок алгоритма АОПН (арп.б1) для МКПА / ООО «Прософт-системы». – Екатеринбург: ООО «Прософт-системы», 2007. – 3 с.

51. А. с. 1669042 СССР, МПК H02H9/04. Способ защиты от повышения напряжения электропередачи высокого напряжения / М.И. Хорошев, А.Ф. Калиниченко, К.В. Хоециан (СССР). – № 4477184; заявл. 24.08.1988; опубл. 07.08.1991, Бюл. № 29.

52. Пат. на изобретение 2422966 Российская Федерация, МПК H02H 9/04. Способ контроля ресурса изоляции / Левиуш А.И., Наумов А.М., Наумов В.А., Петров В.С., Стрелков В.М., Фокин Г.Г.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». - № 2010112951/07; заявл. 05.04.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18.

53. Степанчук, К.Ф. Техника высоких напряжений/ К.Ф. Степанчук, Н.А. Тиняков. – Минск: Вышэйшая школа, 1982. – 367 с.

54. Техника высоких напряжений: курс лекций для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика» / В.Ф. Важов, В.А. Лавринович, С.А. Лопаткин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 119 с.

55. Титков, В.В. Оценка влияния конфигурации заземляющего устройства на уровень помех во вторичных цепях при последующих разрядах молнии / В.В. Титков, А.В. Косоруков // Электро. – 2012. – № 6. – С. 41-44.

56. Тиходеев, Н.Н. Изоляция электрических сетей/ Н.Н. Тиходеев, С.С. Шур. – Л.: Энергия, 1979. – 304 с.

57. Хренников, А.Ю. Классификация основных видов дефектов и повреждений трансформаторно-реакторного оборудования и факторов, приводящих к их возникновению / А.Ю. Хренников, В.Г. Гольдштейн // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2008. – № 1. – С. 166-171.

58. РД ЭО 1.1.2.25.0363-2011 Цифровые (микропроцессорные) устройства релейной защиты и автоматики электроустановок собственных нужд нормальной эксплуатации, систем важных для безопасности и аварийного электроснабжения атомных электростанций. ОАО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях». – ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2011. – 43 с.

59. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учебное пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

60. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – Таблицы Б.1, Б.2.

61. Adibi, M.M. Overvoltage control during restoration / M.M. Adibi, R.W. Alexander, B. Avramovic // Power engineering review, IEEE. – 1992. – Vol. 7, No. 4. – P. 1464-1470.

62. Bak, Claus Leth. Overvoltage protection of large power transformer – a real-life study case / Claus Leth Bak, Kristin Erla Einarsdottir, Einar Andresson, Jesper M. Rasmussen, Jan Lykkegaard, Wojciech Wiechowski // IEEE transactions on power delivery. – 2008. – Vol. 23, NO 2. – P. 657-666.

63. Ban, G. 750 kV reactive power control, automatic reclosing and overvoltage protection / G. Ban, L. Prikler, G. Banfai // 2003 IEEE Bologna PowerTech conference. – Bologna, 2003. – Vol. 2.

64. Bissell, Chris C. Digital signal transmission / Chris C. Bissell, David A. Chapman. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – P. 321.

65. Bower, M. H. L. Remote-end overvoltage protection on Eskom's transmission lines / M. H. L. Bower, G. H. Topham // Development in power system protection, conference 2001. – Amsterdam, 2001. – P. 471-474.

66. Burnham, E.J. Overvoltage on transmission system caused by dropping load / E.J. Burnham // Transactions A.I.E.E. – 1932. – P. 105-112.

67. Cheng, G.H. A method for sustained overvoltage control during power system restoration / G.H. Cheng, Z. Xu // Power systems conference and exposition. – San Diego, 2004. – P. 473-477.

68. Coney, R.G. Over and undervoltage protection of weakly interconnected HV long line networks / R.G. Coney, G.H. Topham, P.M. Marot // Developments in power protection, Fourth international conference. – Edinburgh, 1989. – P. 162-166.

69. Dinh, Viet Thanh. Vietnamese 500kV power system and recent blackouts / Viet Thanh Dinh, Hung Huu Le // Power and energy society general meeting – conversion and delivery of electrical energy in the 21st century. – Pittsburgh, 2008. – P. 1-5.
70. Fattah, S.A. An algorithm for the identification of autoregressive moving average systems from noisy observations / S.A. Fattah, W.P. Zhu, M.O. Ahmad // CCECE 2008. – Canada, 2008. – P. 1815-1818.
71. Franz, S. Warped discrete Fourier transform: a new concept in digital signal processing / S. Franz, S.K. Mitra, J.C. Schmidt, G. Doblinger // ICASSP 2002. – USA, 2002. – P. 1205-1208.
72. Geoffrey S., Edelson. A low rank weighted matrix approximation method for robust estimation of sinusoid parameters / Geoffrey S. Edelson, Ramdas Kumaresan, Donald W. Tufts // IEEE. – 1992. – Vol. 5. – P. 533-536.
73. Haring, J. OFDM transmission corrupted by impulse noise / J. Haring, A.J. Han Vinck // ISPLC 2000. – Ireland, 2000. – P. 9-14.
74. Hauspurg, Arthur. Overvoltages on the AEP 765-kV System / Arthur Hauspurg, Gregory S. Vassell, Gerald I. Stillman, Joel H. Charkow, Jorn C. Haahr // IEEE transactions on power apparatus and systems. – 1969. – Vol, pas-88. – P. 1329-1342.
75. Horowitz, Stanley H. Relaying the AEP 765-kV system / Stanley H. Horowitz, Harold T. Seeley // IEEE transactions on power apparatus and systems. – 1969. – P. 1382-1389.
76. Implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850-9-2 / UCA international users group. – 2004. – P. 31.
77. Instruction manual for BE1-11i. Intertie protection system: Publication: 9424200993 / Basler Electric. – Illinois: Basler Electric, 2013. – P. 550.
78. Lin, Xiangning. Effective overvoltage source identification scheme for machines working in parallel / Xiangning Lin, Feng Zhao, Yan Gao, Yue He, Hanli Weng, Zhiqian Bo // IEEE transactions on energy conversion. – 2012. – Vol. 27, No. 4. – P. 938-347.

79. Mestas, P. A comparison of overvoltage control methods during three-phase reclosing varying the length of shunt compensated transmission lines / P. Mestas, M.C. Tavares // 2011 IEEE electrical power and energy conference. – 2011. – P. 352-356.

80. Mitalkumar G., Kanabar. Laboratory investigation of IEC 61850-9-2-Based busbar and distance relaying with corrective measure for sampled value loss/delay / Mitalkumar G. Kanabar, Tarlochan S. Sidhu, Mohammad R. D. Zadeh // IEEE transactions on power delivery. – October 2011. – Vol. 26, No. 4. – P. 2587-2595.

81. Mitalkumar G., Kanabar. Performance of IEC 61850-9-2 process bus and corrective measure for digital relaying / Mitalkumar G. Kanabar, Tarlochan S. Sidhu // IEEE transactions on power delivery. – April 2011. – Vol. 26, No. 2. – P. 725-735.

82. Пат. 4587620 США, МПК H04B 15/00, H04B 1/34. Noise elimination device / Koji Niimi, Takayasu Kondo. – № 373437; заявл. 30.04.1982; опубл. 6.05.1986.

83. Rafa, A. Protection of power transformer using microcontroller-based relay / A. Rafa, S. Mahmood, N. Mariam, W.Z. Wan Hassan, N.F. Mailah // 2002 student conference on research and development proceedings. – Shan Alam, 2002. – P. 224-227.

84. Sliskovic, Maja. Impulse noise detection algorithms for multicarrier communication systems – performance analysis / Maja Sliskovic // ISPA 2001. – Croatia, 2001. – P. 496-501.

85. Torres, Francisco. Application of overvoltage protection to the Peruvian power system / Francisco Torres, Yofre Jacome, Charles Henville // Developments in power system protection 2008. – UK, 2008. – P. 506-512.

86. Wei, Liu. Analysis and modification of a 500kV transmission line overvoltage problem / Liu Wei, Ning Wen-hui, Huang Dong-shan // 2010 China International conference on electricity distribution. – 2010. – P. 1-6.

87. Yan, Gao. A new overvoltage protection for powerformer based on the variety of reactive power / Yan Gao, Xiangning Lin, Pei Liu, Zhiqian Bo // PES general meeting 2007. – Tampa, 2007. – P. 1-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Допустимые в условиях эксплуатации кратковременные повышения напряжения частотой 50 Гц для электрооборудования классов напряжения от 110 до 750 кВ
«Справочное»

Таблица П.1 – Допустимые в условиях эксплуатации кратковременные повышения напряжения частоты 50 Гц для электрооборудования классов напряжения от 110 до 330 кВ включ. (таблица Б1 в [60])

Вид электрооборудования	Допустимые повышения напряжения, относительное значение, не более, при длительности t							
	20 мин ¹⁾		20с ²⁾		1с		0.1с	
	ф-ф	ф-з	ф-ф	ф-з	ф-ф	ф-з	ф-ф	ф-з
Силовые трансформаторы (автотрансформаторы)	1.10		1.25		1.50	1.90	1.58	2.00
Шунтирующие реакторы и электромагнитные трансформаторы напряжения	1.15		1.35		1.50	2.00	1.58	2.10
Аппараты, емкостные трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, конденсаторы связи, шинные опоры	1.15		1.60		1.70	2.20	1.80	2.40
¹⁾ Количество повышений напряжения длительностью 20 мин не должно быть более 50 в течение одного года. ²⁾ Количество повышений напряжения длительностью 20 с не должно быть более 100 за срок службы электрооборудования, или за 25 лет, если срок службы не указан. При этом количество повышений напряжения не должно быть более 15 в течение одного года и более двух в течение суток.								

Таблица П.2 – Допустимые в условиях эксплуатации кратковременные повышения напряжения частоты 50 Гц для электрооборудования классов напряжения 500 и 750 кВ (таблица Б2 в [60])

Класс напряжения, кВ	Вид электрооборудования	Допустимые повышения напряжения ¹⁾ , относительное значение, не более, при длительности t и количестве повышений в год n								
		$t=8$ ч	3 ч	1 ч	20 мин	5 мин	1 мин	20с	1с	0.1с
		$n \leq 200$	≤ 125	≤ 75	≤ 50	≤ 7	≤ 5	≤ 4	-	-
500	Силовые трансформаторы	1.025/ 1.025	1.05/ 1.05	1.075/ 1.075	1.10/ 1.10	1.15/ 1.15	1.20/ 1.20	1.25/ 1.25	1.90/ 1.50	2.00/ 1.58
	Шунтирующие реакторы и электромагнитные трансформаторы напряжения	1.025	1.05	1.075	1.15	1.15	1.20	1.35	2.00	2.08
	Аппараты, емкостные трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, конденсаторы связи, шинные опоры	1.025	1.05	1.075	1.15	1.15	1.20	1.60	2.20	2.40
750	Силовые трансформаторы	1.025/ 1.025	1.05/ 1.05	1.075/ 1.075	1.10/ 1.10	1.15/ 1.15	1.20/ 1.20	1.25/ 1.25	1.67/ 1.50	1.76/ 1.58
	Шунтирующие реакторы, аппараты, трансформаторы напряжения и тока, конденсаторы связи, шинные опоры	1.025	1.05	1.075	1.10	1.15	1.20	1.30	1.88	1.98

1) В числителе указаны значения допустимого повышения напряжения относительно земли, в знаменателе-между фазами.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Типовой бланк уставок цифровой системы АОПН в составе терминалов серии
ЭКРА 200
«Справочное»

	Элементы	Ед. изм.	Значение уставки по умолчанию	Диапазон уставки	Задаваемая уставка	Комментарий
Измерительные органы	U _{ном}	кВ	330	110; 220; 330; 500; 750		Номинальное напряжение
	Q _{уст}	ВАр	10	0 – 300		Величина реактивной мощности
	K _T	-	1	0 – 100		Коэффициент торможения ИО
	U _{больш}	о.е.	0,9	(0 ÷ 2) U _{ном}		Уставка максимального реле напряжения
	U _{меньш}	о.е.	0,3	(0 ÷ 2) U _{ном}		Уставка минимального реле напряжения
Выдержки времени на срабатывание	DT500	с	30	0 – 60		Время срабатывания I ступени
	DT501	с	300	0 - 600		Время выполнения технических мероприятий I ступени
	DT502	с	10	0 - 60		Время на включение 1-го реактора от II ступени (время на срабатывания II ступени)
	DT503	с	10	0 - 60		Время на включение 2-го реактора от II ступени после включения 1-го реактора
	DT504	с	10	0 - 60		Время на телевключение реакторов и регулирование напряжения с противоположной стороны после включения 2-го реактора
	DT505	с	0.1	0 - 60		Время на срабатывание III ступени
	DT506	с	1.0	0 - 60		Полное время отключения линии со своей стороны с учетом УРОВ
	DT512	с	0.1	0 - 1		Выдержка времени, необходимая для предотвращения фиксации отключения линии при быстро отключаемых трехфазных коротких замыканиях в сети
Выдержки времени на возврат	DT513	с	0.2	0 - 1		Выдержка времени, необходимая для предотвращения срыва сигнала блокировки, возможного из-за переходных процессов
Программные наклейки	VXN500	-	1	0 или 1		Ввод ИО контроля величины и направления Q и величины P
	VXN501	-	1	0 или 1		Ввод I ступени АОПН
	VXN502	-	1	0 или 1		Ввод II ступени АОПН
	VXN503	-	1	0 или 1		Ввод III ступени АОПН
	VXN504	-	1	0 или 1		Место подключения 1-го реактора

	Элементы	Ед. изм.	Значение уставки по умолчанию	Диапазон уставки	Задаваемая уставка	Комментарий
	VXN505	-	1	0 или 1		Место подключения 2-го реактора
	VXN506	-	1	0 или 1		Разрешение включения 1-го реактора со своей стороны
	VXN507	-	1	0 или 1		Разрешение включения 2-го реактора со своей стороны
	VXN508	-	1	0 или 1		Разрешение телевключения реакторов и регулирование напряжения с противоположной стороны
	VXN509	-	1	0 или 1		Разрешение телевключения реакторов и регулирование напряжения с противоположной стороны от сигнала срабатывания ступени с контролем Р и Q (при отключении ВЛ с противоположной стороны)
	VXN510	-	1	0 или 1		Разрешение телеотключения линии с противоположной стороны
	VXN511	-	1	0 или 1		Разрешение отключения линии со своей стороны
	VXN515	-	1	0 или 1		Ввод блокировки при включении линии под напряжение
	VXN516	-	1	0 или 1		Разрешение регулирования напряжения при срабатывании ФОВ (при отключении ВЛ со своей стороны)
Формирователи импульсов	ТМОС500	с	0.1	0 - 1		Длительность блокирующего сигнала БВЛ
	ТМОС501	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "Регулирование напряжения"
	ТМОС502	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "Включение 1-го реактора"
	ТМОС503	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "Включение 2-го реактора"
	ТМОС504	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "Отключение линии"
	ТМОС505	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "УРОВ В1 на себя"
	ТМОС506	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "УРОВ В1 на смеж"
	ТМОС507	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "ТВ реакторов с прот. стор., рег-е напряж"
	ТМОС508	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "ТО линии с противоположной стороны"
	ТМОС509	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "УРОВ В2 на себя"
	ТМОС510	с	0.1	0 - 1		Длительность сигнала "УРОВ В2 на смеж"