

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____ / И.М. Кирпичникова /

« ___ » _____ 2020 г.

«Разработка цифровой модели комплекта релейной защиты
транзитной ЛЭП 110–220 кВ в среде LabView»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 13.03.02.2020.264 ВКР

Руководитель, доцент

_____ / К.Е. Горшков /

« ___ » _____ 2020 г.

Автор работы

студент группы П-472

_____ / Сюэвэй Ван /

« ___ » _____ 2020 г.

Нормоконтролёр, доцент

_____ / К.Е. Горшков /

« ___ » _____ 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ / И.М. Кирпичникова /
« ___ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу бакалавра

Ван Сюэвэй
Группа П-472

1. Тема выпускной квалификационной работы «Разработка цифровой модели комплекта релейной защиты транзитной ЛЭП 110–220 кВ в среде LabView» утверждена приказом по университету от « ___ » _____ 2020 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы « ___ » _____ 2020 г.

3. Исходные данные к работе

- Правила устройства электроустановок Российской Федерации;
- Стандарты ПАО «ФСК ЕЭС»;
- Руководящие указания по релейной защите;
- Документация и руководства по эксплуатации шкафа дифференциальной защиты линии типа ШЭ2607 094 производства ООО НПП «ЭКРА»;
- Руководство пользователя к программе «LabView».

4. Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению

- Изучение релейной защиты существующих воздушных линий электропередачи 110–220 кВ и требований предъявляемых к ней;
- Разработка моделей разных видов релейной защиты для цифрового комплекта в среде «LabView»:
 - токовой отсечки без выдержки времени;
 - токовой направленной защиты нулевой последовательности;

- ненаправленной дистанционной защиты;
- продольной дифференциальной защиты.

5. Перечень графического материала

Презентация, выполненная в программе Microsoft PowerPoint.

6. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2020 г.

Руководитель работы _____
(подпись)

Задание принял к исполнению _____
(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Дата завершения этапа	Отметка руководителя о выполнении
Изучение основных видов релейной защиты	01.02.2020	
Изучение релейной защиты воздушных линий 110–220 кВ	20.02.2020	
Разработка модели токовой отсечки без выдержки времени	15.03.2020	
Разработка модели токовой направленной защиты нулевой последовательности	25.03.2020	
Разработка модели ненаправленной дистанционной защиты	15.04.2020	
Разработка модели продольной дифференциальной защиты	25.04.2020	
Оформление дипломной работы	25.05.2020	
Оформление презентации к докладу	05.06.2020	

Заведующий кафедрой _____ / И.М. Кирпичникова /

Руководитель работы _____ / К.Е. Горшков /

Студент _____ / Сюэвэй Ван /

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Массовое внедрение в электроэнергетике микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики за последние два десятилетия привело к необходимости глубокого изучения цифровой техники, программных средств и языков программирования. Особую важность приобрело такое качество как умение моделировать и программировать логику цифровых устройств. Поэтому сегодня актуально подкреплять изучение принципов работы цифровой релейной защиты разработками функциональных моделей в различных программных средах.

Цель работы – разработка цифровых моделей функций (устройств) релейной защиты транзитных ЛЭП 110–220 кВ в программной среде «LabView», согласно действующим нормативным документам.

Практическая значимость. Разработанные модели будут полезны при изучении принципов работы основных видов релейной защиты, а также могут быть использованы при проверке и имитации конкретных аварийных ситуаций.

Структура и объём. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 4 наименований. Основной материал содержит 35 илл. Общий объем работы составляет 53 стр.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	8
1 ОСНАЩЕНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ЛЭП 110–220 КВ УСТРОЙСТВАМИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.....	9
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ БЕЗ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ.....	11
2.1 Краткое описание и назначение МФТО	11
2.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования МФТО.....	11
2.3 Разработанная модель МФТО.....	13
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	16
3.1 Краткое описание и назначение ТЗНП	16
3.2 Структурная схема подключения и алгоритмы функционирования ТЗНП.....	17
3.3.1 Модель первой ступени ТЗНП	19
3.3.2 Модель второй ступени ТЗНП.....	23
3.3.3 Модель последней ступени ТЗНП.....	26
4 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕНАПРАВЛЕННОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	32
4.1 Краткое описание и назначение ДЗ.....	32
4.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования ДЗ	33
4.3 Разработанная модель ДЗ.....	34
5 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ	40
5.1 Краткое описание и назначение ДЗЛ.....	40
5.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования ДЗЛ.....	41

5.3 Разработанная модель ДЗЛ	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	53

ВВЕДЕНИЕ

Основным собственником транзитных ЛЭП 110–220 кВ, входящих в состав Единой энергетической системы Российской Федерации, является ПАО «Россети» – оператор электрических сетей России. Крупнейшей дочерней компанией ПАО «Россети» является ПАО «ФСК ЕЭС» – федеральная сетевая компания Единой энергетической системы, основным видом деятельности которой является передача электрической энергии по Единой национальной электрической сети России.

Исходя из вышеизложенного, работа основана на типовых подходах по оснащению транзитных ЛЭП 110–220 кВ устройствами релейной защиты с учётом требований, приведённых в нормативной документации (стандартах) ПАО «ФСК ЕЭС».

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ДЗЛ – дифференциальная защита линии

ДФЗ – дифференциально-фазная защита

ДЗ – дистанционная защита

ЕНЭС – Единая национальная электрическая сеть Российской Федерации

КЗ – короткое замыкание

КСЗ – комплект ступенчатых защит

ЛЭП – линия электропередачи

МФТО – междуфазная токовая отсечка

НВЧЗ – направленная высокочастотная защита

Н.П. – нулевая последовательность

ПС – электрическая подстанция

РЗА – релейная защита и автоматика

РС – реле сопротивления

ТЗНП – токовая защита нулевой последовательности

ЭЭС – электроэнергетическая система

1 ОСНАЩЕНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ЛЭП 110–220 КВ УСТРОЙСТВАМИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В соответствии с п. 3.2.106 Правил устройства электроустановок Российской Федерации (издание № 7) [1], для линий в сетях 110–500 кВ с эффективно заземленной нейтралью должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от многофазных замыканий и от замыканий на землю.

Согласно п. 12.9.1 стандарта ПАО «ФСК ЕЭС» «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 – 750 кВ» [2], на линиях 110 – 220 кВ с двухсторонним питанием, отнесенным к ЕНЭС, а также отходящих от ПС ЕНЭС, должны устанавливаться два комплекта РЗА от всех видов повреждений, в состав которых должны входить:

- быстродействующая защита с абсолютной селективностью (основная защита);

- комплект ступенчатых защит (резервная защита).

В соответствии с п. 12.9.4 [2], в качестве основной защиты транзитной ЛЭП 110 – 220 кВ следует применять ДФЗ, НВЧЗ, продольную ДЗЛ или телеускорение ступенчатых защит. Причём, при наличии ВОЛС, для организации защит ЛЭП 110–220 кВ предпочтение следует отдавать варианту с ДЗЛ.

В соответствии с п. 3.2.116 [1], при выполнении основной защиты транзитной ЛЭП 110–220 кВ в качестве резервных защит следует применять:

- от многофазных КЗ, как правило, – дистанционные защиты, преимущественно трехступенчатые;

- от замыканий на землю – ступенчатые токовые защиты нулевой последовательности (направленные или ненаправленные).

Согласно п. 3.2.111 [1], в качестве дополнительной защиты от многофазных коротких замыканий, на транзитных ЛЭП 110 – 220 кВ допускается использовать токовую отсечку без выдержки времени.

На основании вышеизложенного, предметом моделирования в рамках настоящей работы являются следующие функции релейной защиты транзитных ЛЭП 110–220 кВ:

- токовая отсечка без выдержки времени (**instantaneous overcurrent protection for phase faults**);

- токовая защита нулевой последовательности (**zero sequence current protection for earth faults**);

- дистанционная защита от междуфазных замыканий (**distance protection for phase faults**);

- продольная дифференциальная защита (**differential protection**).

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ БЕЗ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ

2.1 Краткое описание и назначение МФТО

МФТО без выдержки времени предназначена для отключения междуфазных коротких замыканий на защищаемой линии:

- двухфазных КЗ («**line-to-line**» **fault**);
- двухфазных КЗ «на землю» («**line-to-line-to-ground**» **fault**);
- трёхфазных КЗ («**three phase**» **fault**).

В силу относительной избирательности измерительного токового органа и отсутствия выдержки времени, параметры настройки данной защиты выбираются исходя из обеспечения несрабатывания защиты при любых КЗ в конце защищаемой ЛЭП. Из этого следует, что МФТО без выдержки времени защищает только часть ЛЭП во всех режимах работы ЭЭС.

Ввиду необходимости выявления и отключения от данной защиты только междуфазных повреждений, в настоящей работе предусмотрено её подключение на междуфазный ток, что обеспечивает отстройку защиты от токов нулевой последовательности. Данное решение применяется в алгоритмах функционирования устройств релейной защиты завода-изготовителя ООО НПП «ЭКРА» начиная с версий программного обеспечения терминалов РЗА типа «200» и выше.

2.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования МФТО

Структурная схема подключения МФТО, реализованной на базе терминала РЗА, представлена на рисунке 1. Алгоритм функционирования моделируемой МФТО представлен на рисунке 2.

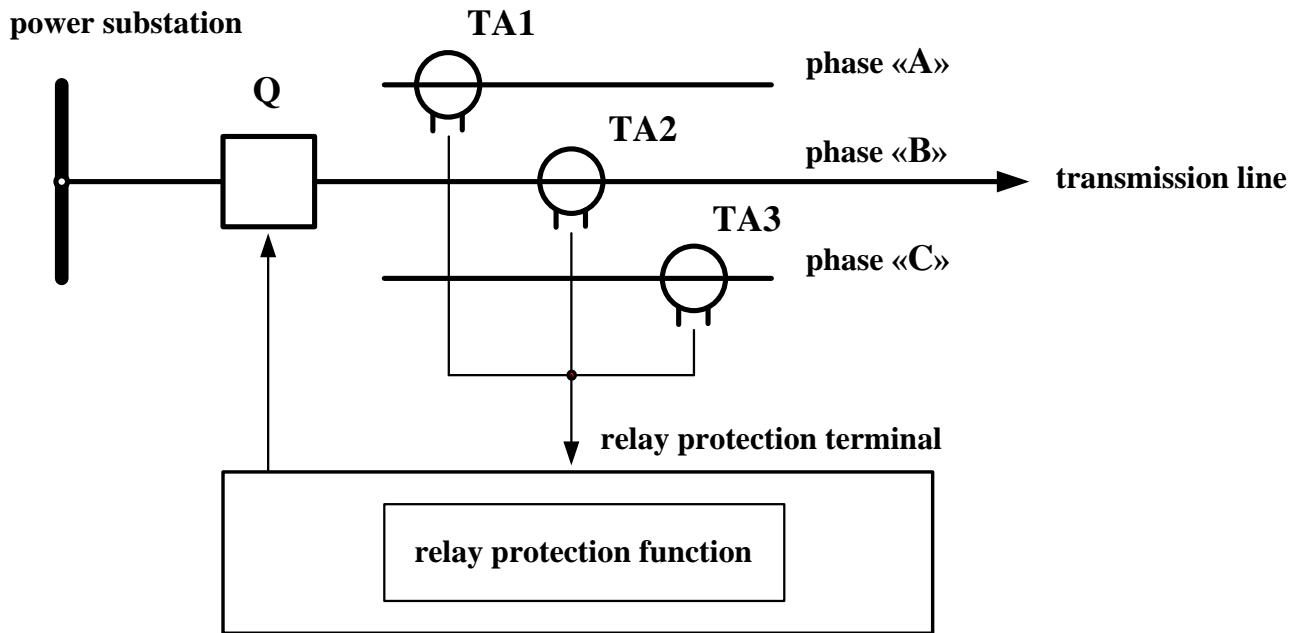


Рисунок 1 – Структурная схема подключения МФТО, реализованной на базе терминала РЗА

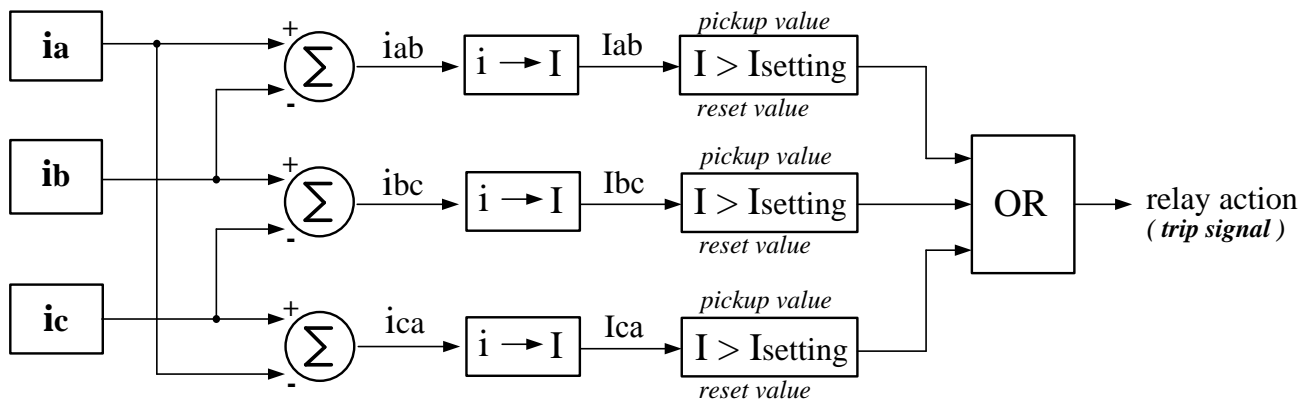


Рисунок 2 – Алгоритм функционирования моделируемой МФТО

Как показано на рисунках 1, 2, для функционирования МФТО необходимы цепи переменного тока трансформаторов тока всех трёх фаз защищаемой линии, срабатывание МФТО с действием на отключение выключателя должно осуществляться при превышении любой из междуфазных величин переменного тока уставки срабатывания (**pickup value**) защиты.

2.3 Разработанная модель МФТО

Интерфейс пользователя модели МФТО представлен на рисунке 3. Вычислительно-логическая схема модели МФТО представлена на рисунке 4.

Как показано на рисунке 3, интерфейс пользователя модели МФТО включает в себя:

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фаз защищаемой линии от времени и их действующих значений;

- графики зависимостей вычисляемых моделью междуфазных токов защищаемой линии от времени и их действующие значения;

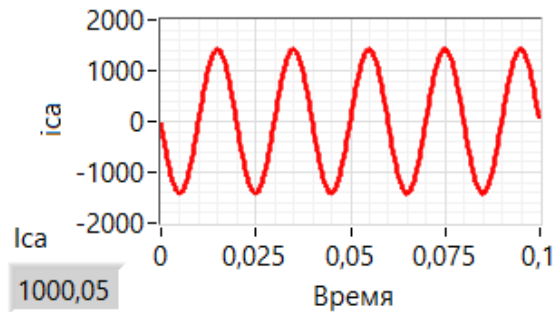
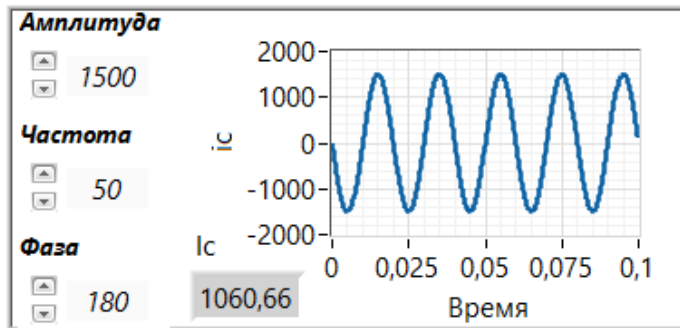
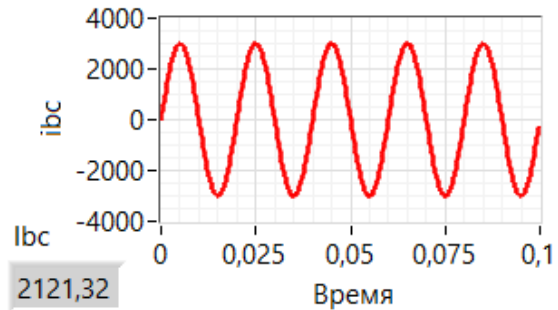
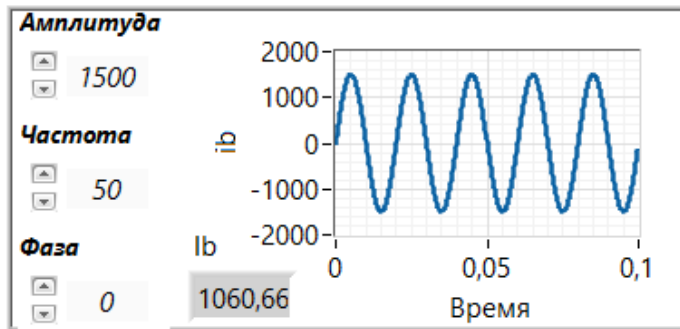
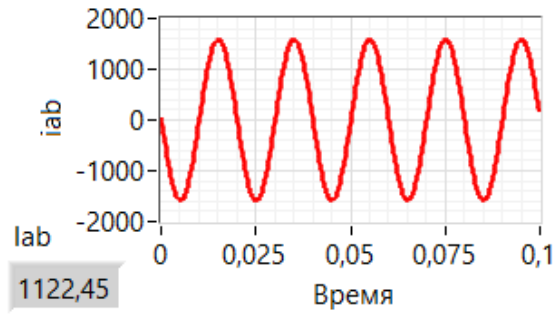
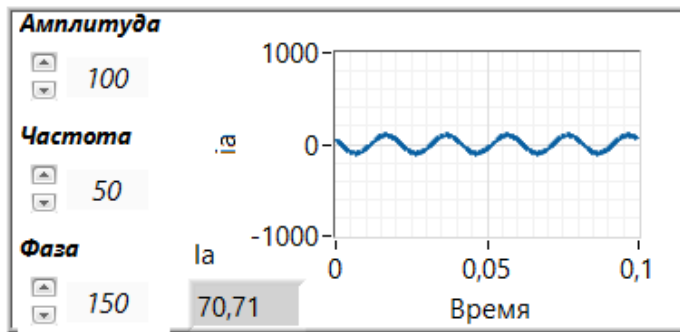
- регулятор тока срабатывания (**pickup current**) МФТО в первичных величинах;

- регулятор тока возврата (**reset current**) МФТО в первичных величинах;

- светодиод, отражающий сработавшее состояние функции.

Как показано на рисунке 4, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока фаз реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**.

Рисунок 3 также включает в себя иллюстрацию работы модели на примере случая срабатывания МФТО при междуфазном КЗ вида «А – В».




 Срабатывание защиты

Рисунок 3 – Интерфейс пользователя модели МФТО

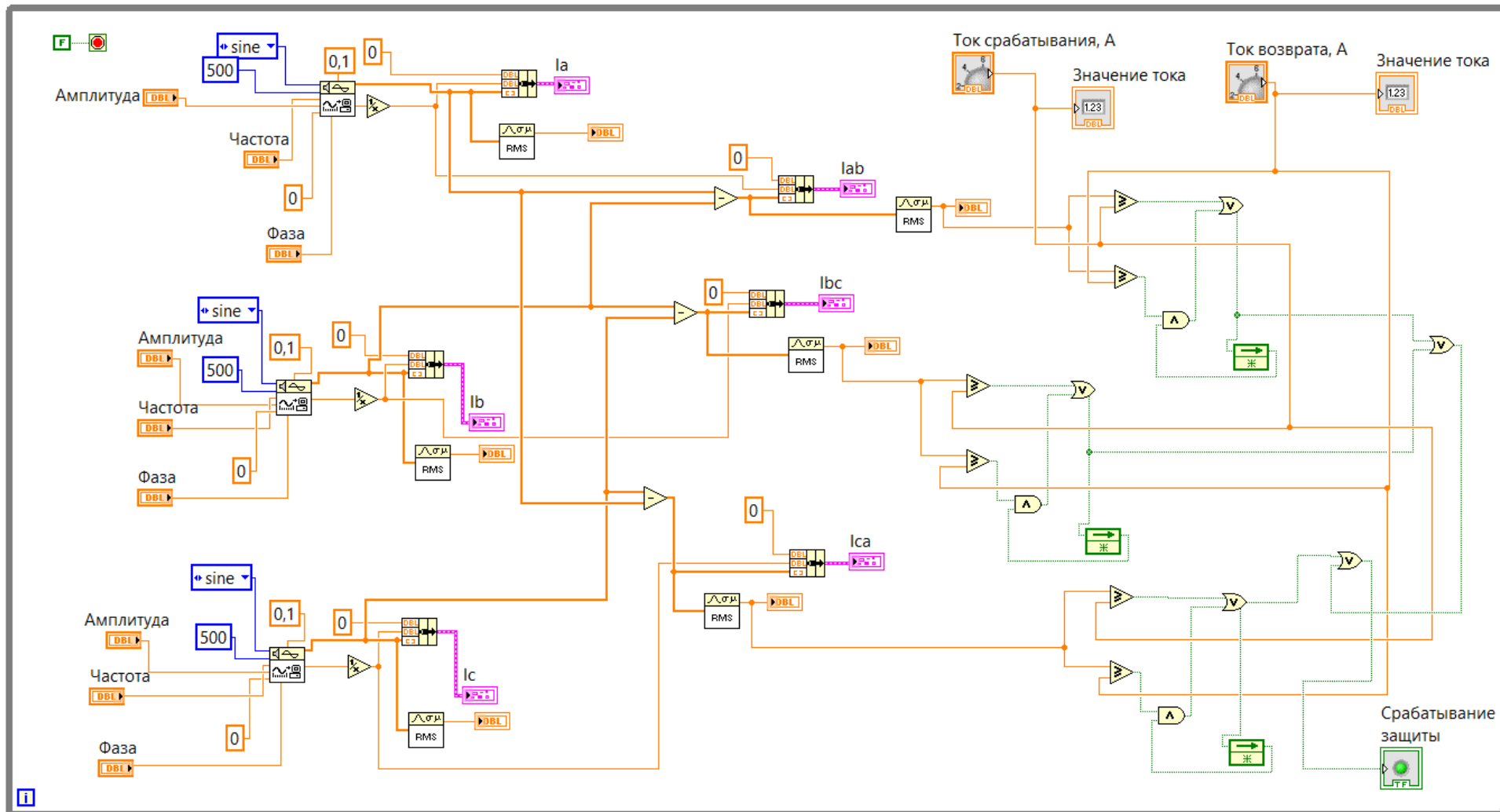


Рисунок 4 – Вычислительно-логическая схема модели ДФТО

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

3.1 Краткое описание и назначение ТЗНП

ТЗНП предназначена для отключения коротких замыканий «на землю» на защищаемой линии и в прилегающей сети:

- однофазных КЗ (**single «line-to-ground» fault**);
- двухфазных КЗ «на землю» (**«line-to-line-to-ground» fault**).

Типовой набор ступеней ТЗНП с независимой выдержкой времени транзитной ЛЭП 110–220 кВ включает в себя несколько ступеней, первая из которых предназначена для отключения КЗ без выдержки в начале защищаемой линии, последняя – для обеспечения дальнего резервирования устройств ТЗНП элементов прилегающей электрической сети.

Для обеспечения избирательной работы устройств ТЗНП транзитной сети 110–220 кВ их ступени выполняются направленными с использованием реле мощности нулевой последовательности.

В случаях, когда для обеспечения избирательной работы отдельной ступени ТЗНП реализация её направленности не требуется, с целью повышения надёжности работы защиты при неисправности измерительных цепей переменного напряжения данная ступень, согласно [3], выполняется ненаправленной.

На основании вышеизложенного, в рамках настоящей работы разработаны модели:

- ненаправленной ступени без выдержки времени (первой ступени ТЗНП);
- ненаправленной ступени с выдержкой времени (второй ступени ТЗНП);
- направленной ступени с выдержкой времени (последней ступени ТЗНП).

Упрощённая характеристика срабатывания реле мощности нулевой последовательности, использованная при разработке модели, представлена на рисунке 5.

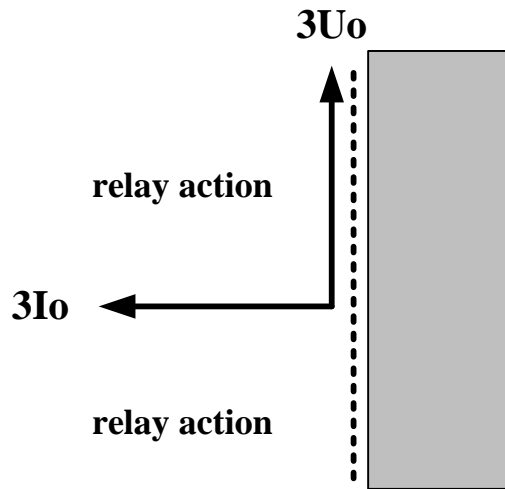


Рисунок 5 – Характеристика срабатывания реле мощности нулевой последовательности

3.2 Структурная схема подключения и алгоритмы функционирования ТЗНП

Структурная схема подключения ТЗНП, реализованной на базе терминала РЗА, представлена на рисунке 6. Алгоритмы функционирования первой, второй и последней ступеней ТЗНП, представлены на рисунках 7, 8, 9, соответственно.

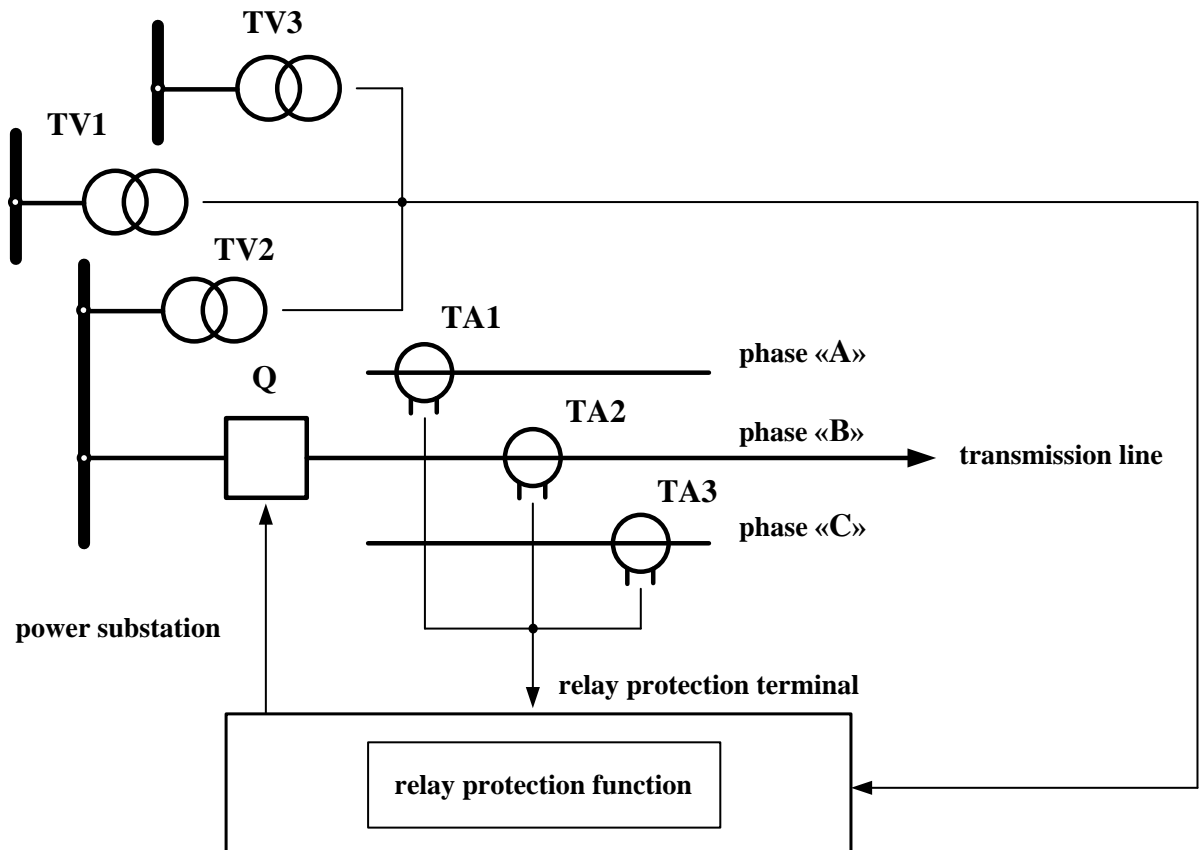


Рисунок 6 – Структурная схема подключения ТЗНП

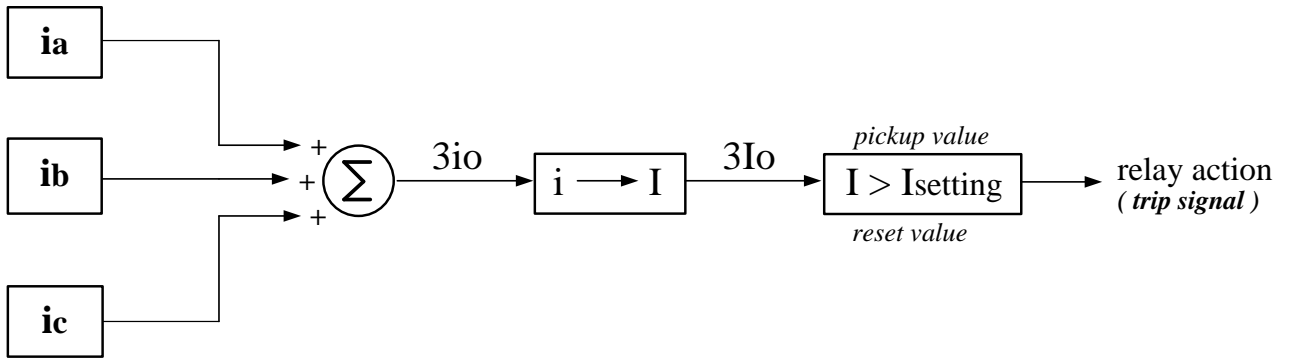


Рисунок 7 – Алгоритм функционирования первой ступени ТЗНП

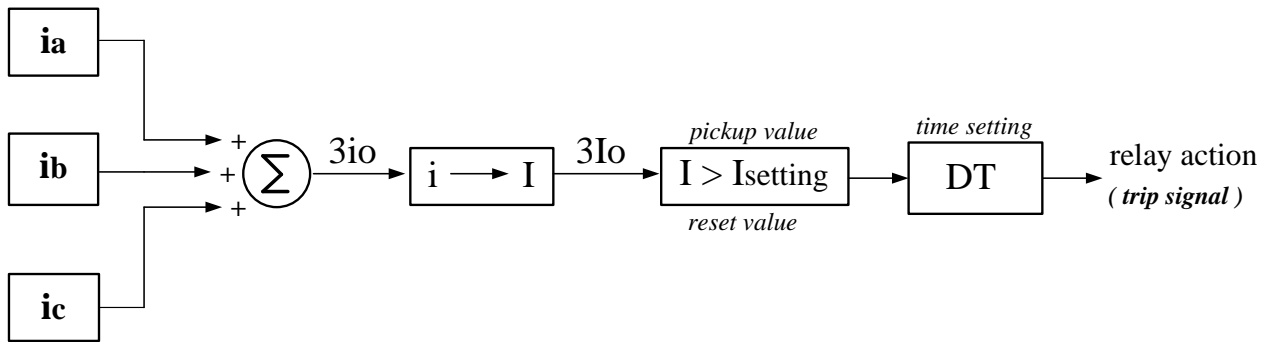


Рисунок 8 – Алгоритм функционирования второй ступени ТЗНП

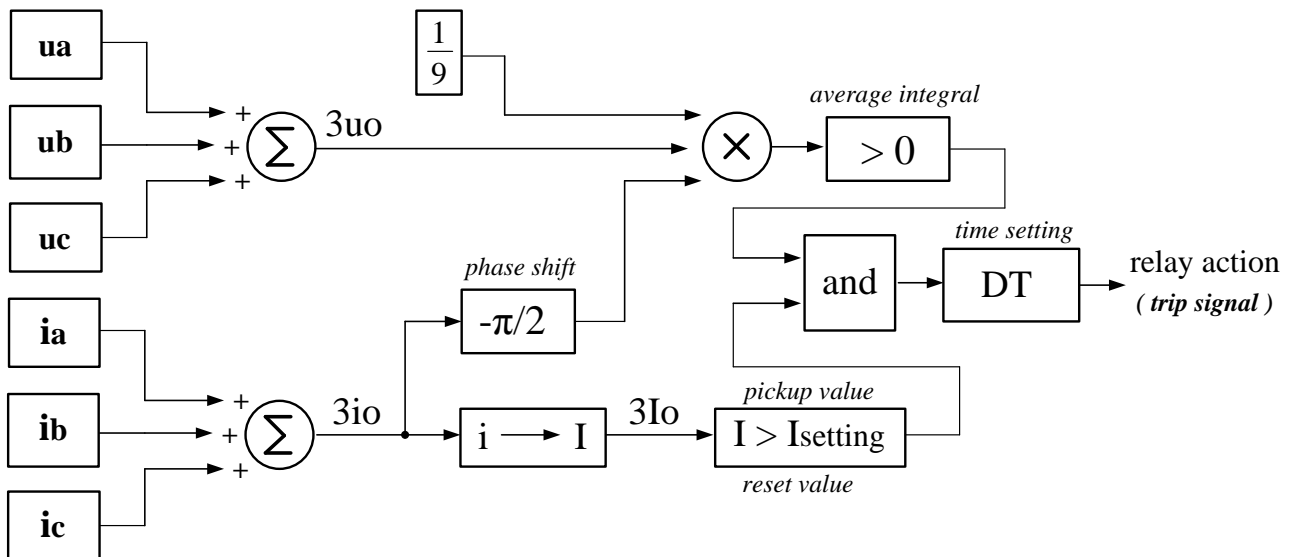


Рисунок 9 – Алгоритм функционирования последней ступени ТЗНП

Как показано на рисунке 6, для функционирования моделируемой ТЗНП необходимы цепи переменного тока трансформаторов тока всех трёх фаз защищаемой линии и цепи переменного напряжения трансформаторов напряжения всех трёх фаз соответствующей системы шин электрической подстанции.

Как показано на рисунке 9, алгоритм функционирования направленной ступени ТЗНП включает в себя схему суммирования аналоговых сигналов переменного напряжения от вторичных обмоток трансформаторов напряжения, соединённых по схеме «звезда».

Для определения направления мощности нулевой последовательности используются алгоритм сдвига синусоидальной функции по фазе, показанный на рисунке 9 как **phase shift**, и алгоритм расчёта среднего интегрального значения синусоидальной функции за период, показанный на рисунке 9 как **average integral**.

Срабатывание условного логического блока **average integral**, показанного на рисунке 9, осуществляется при выполнении условия:

$$\frac{\int_0^T f(t) dt}{T} > 0, \quad (1)$$

где $f(t)$ – функция (набор точек), описывающая синусоидальный сигнал на входе логического блока **average integral**;

T – период промышленной частоты.

3.3 Разработанная модель ТЗНП

С целью удобства в эксплуатации, разработанная модель ТЗНП состоит из трёх независимых моделей входящих в её состав ступеней.

3.3.1 Модель первой ступени ТЗНП

Интерфейс пользователя модели первой ступени ТЗНП представлен на рисунке 10. Вычислительно-логическая схема модели первой ступени ТЗНП представлена на рисунке 11.

Как показано на рисунке 10, интерфейс пользователя модели первой ступени ТЗНП включает в себя:

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фаз защищаемой линии и их действующих значений;

- график зависимости вычисляемых моделью токов нулевой последовательности защищаемой линии от времени и их действующее значение;

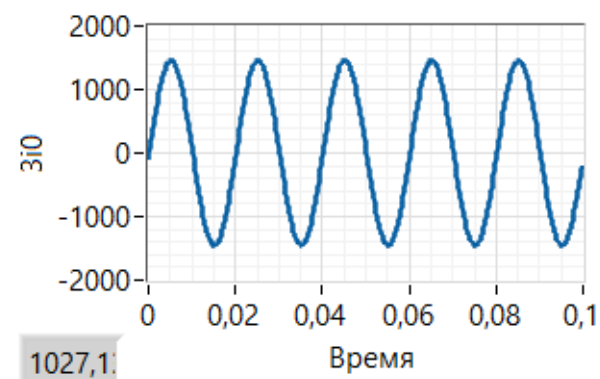
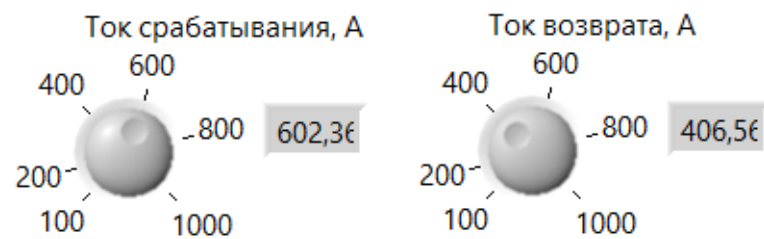
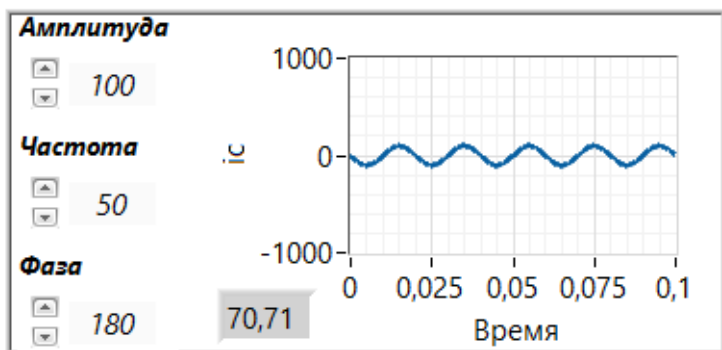
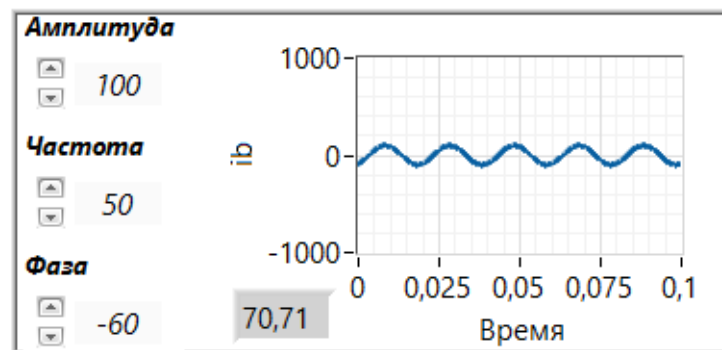
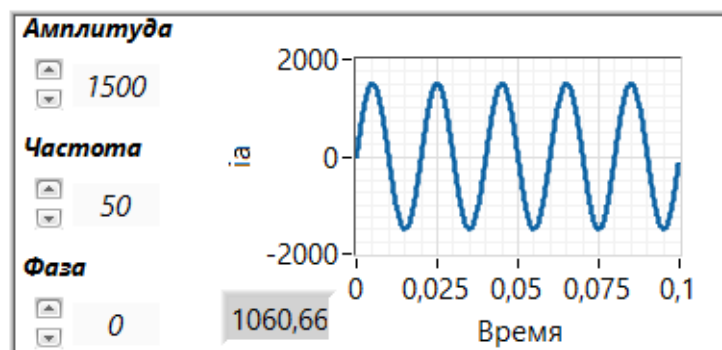
- регулятор тока срабатывания (**pickup current**) ТЗНП в первичных величинах;

- регулятор тока возврата (**reset current**) ТЗНП в первичных величинах;

- светодиод, отражающий сработавшее состояние ступени.

Как показано на рисунке 11, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока фаз реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**.

Рисунок 10 также включает в себя иллюстрацию работы модели на примере случая срабатывания первой ступени ТЗНП при КЗ вида «А – 0».



Срабатывание защиты



Рисунок 10 – Интерфейс пользователя модели первой ступени ТЗНП

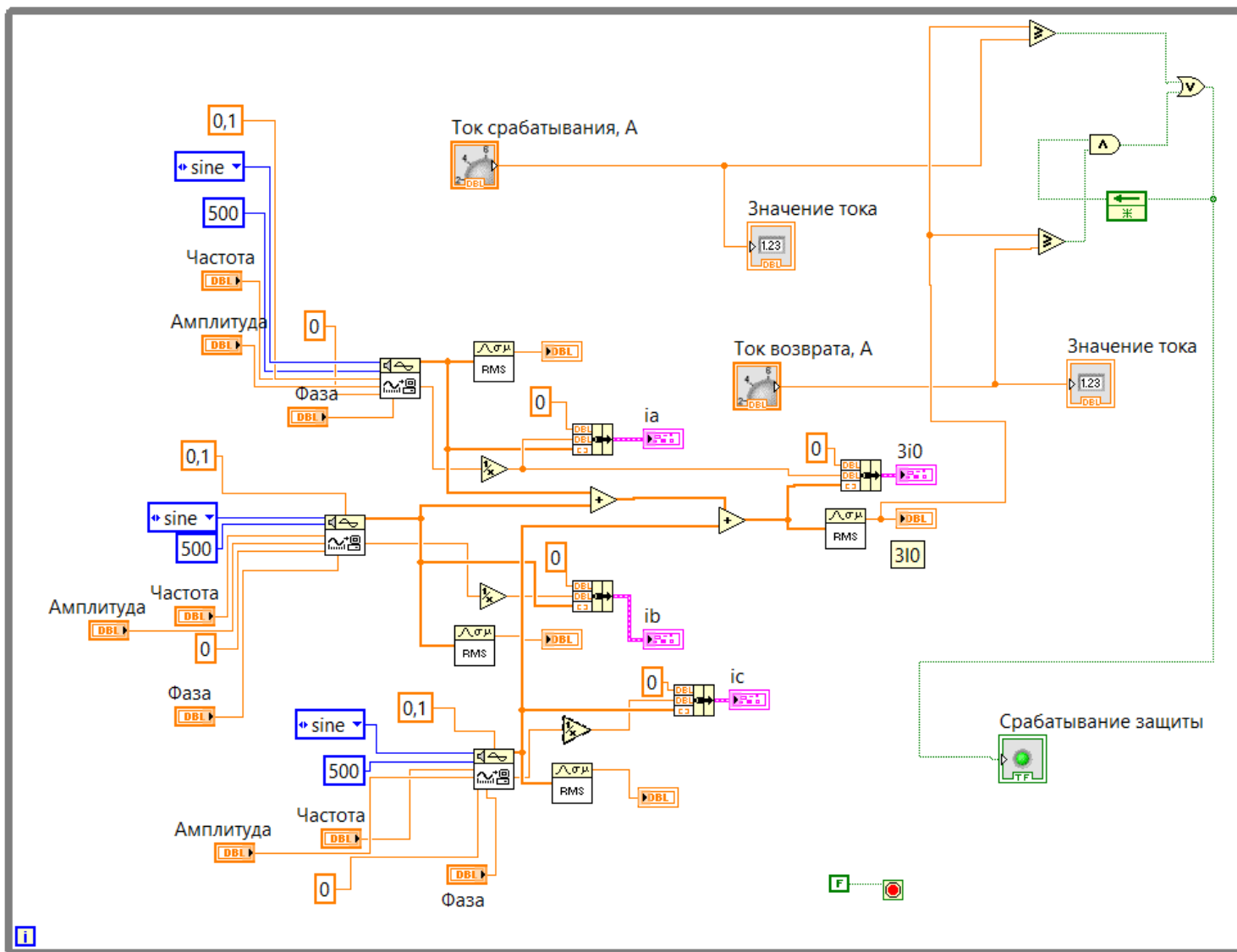


Рисунок 11 – Вычислительно-логическая схема модели первой ступени ТЗНП

3.3.2 Модель второй ступени ТЗНП

Интерфейс пользователя модели второй ступени ТЗНП представлен на рисунке 12. Вычислительно-логическая схема модели второй ступени ТЗНП представлена на рисунке 13.

Как показано на рисунке 12, интерфейс пользователя модели второй ступени ТЗНП включает в себя:

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фаз защищаемой линии и их действующих значений;

- график зависимости вычисляемых моделью токов нулевой последовательности защищаемой линии от времени и их действующее значение;

- регулятор тока срабатывания (**pickup current**) ТЗНП в первичных величинах;

- регулятор тока возврата (**reset current**) ТЗНП в первичных величинах;

- регулятор выдержки времени (**time setting**) ступени в секундах;

- табло с информацией об отсчитанном времени с момента запуска ступени;

- светодиод, отражающий сработавшее состояние ступени.

Как показано на рисунке 13, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока фаз реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**, выдержка времени ступени выполнена с помощью встроенного модуля **Elapsed time**.

Рисунок 12 также включает в себя иллюстрацию работы модели на примере случая пуска второй ступени ТЗНП при КЗ вида «А – 0».

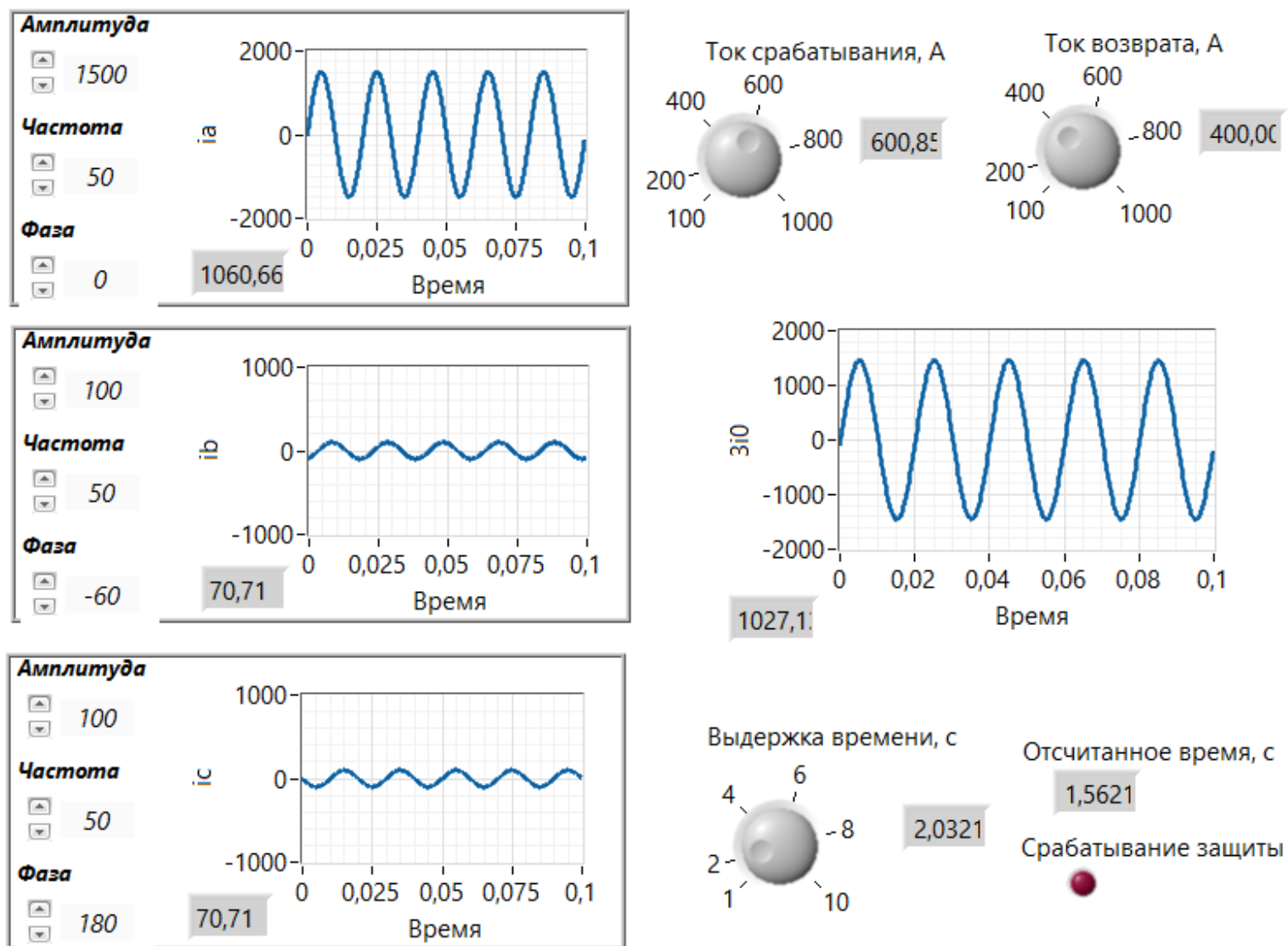


Рисунок 12 – Интерфейс пользователя модели второй ступени ТЗНП

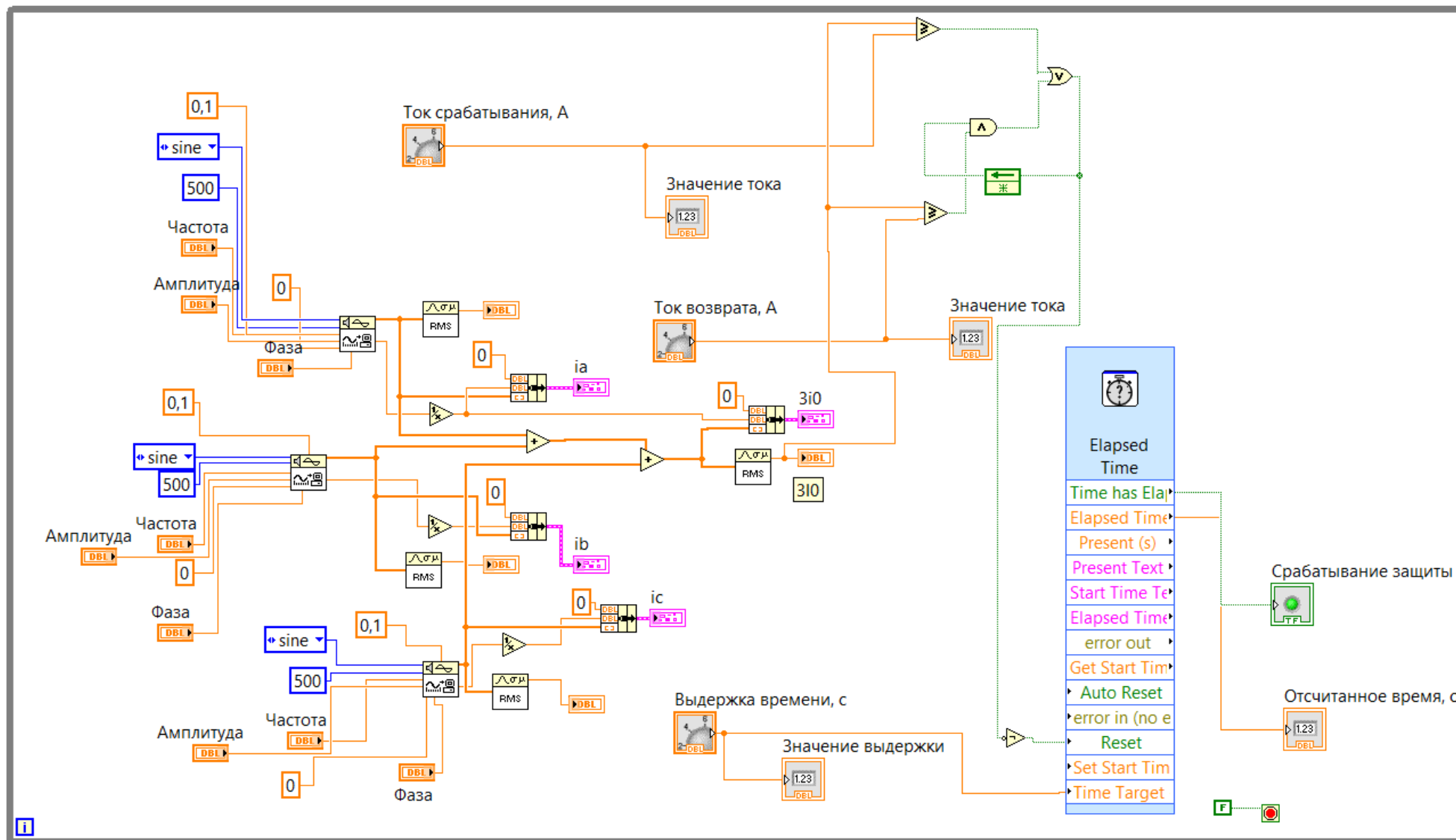


Рисунок 13 – Вычислительно-логическая схема модели второй степени ТЗНП

3.3.3 Модель последней ступени ТЗНП

Интерфейс пользователя модели последней ступени ТЗНП представлен на рисунке 14. Вычислительно-логическая схема модели последней ступени ТЗНП представлена на:

- рисунке 15 – алгоритм формирования синусоидального сигнала тока нулевой последовательности;
- рисунке 16 – алгоритм формирования синусоидального сигнала напряжения нулевой последовательности;
- рисунке 17 – алгоритмы измерительных органов и логических элементов ступени.

Как показано на рисунке 14, интерфейс пользователя модели последней ступени ТЗНП включает в себя:

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фаз защищаемой линии и их действующих значений;
- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного напряжения фаз защищаемой линии (соответствующей системы шин) и их действующих значений;
- график зависимости вычисляемых моделью токов нулевой последовательности защищаемой линии от времени и их действующее значение;
- график зависимости вычисляемых моделью напряжений нулевой последовательности защищаемой линии от времени и их действующее значение;
- регулятор тока срабатывания (**pickup current**) ТЗНП в первичных величинах;
- регулятор тока возврата (**reset current**) ТЗНП в первичных величинах;
- регулятор выдержки времени (**time setting**) ступени в секундах;
- светодиод, отражающий состояние пуска реле тока нулевой последовательности;

- светодиод, отражающий состояние пуска реле мощности нулевой последовательности;
- табло с информацией об отсчитанном времени с момента запуска ступени;
- светодиод, отражающий сработавшее состояние ступени.

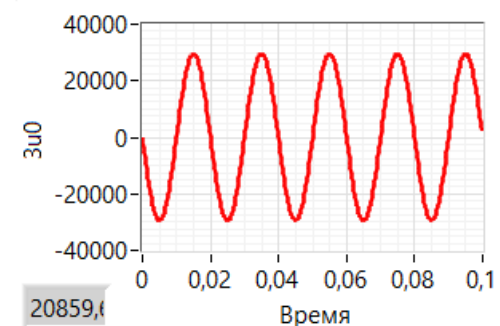
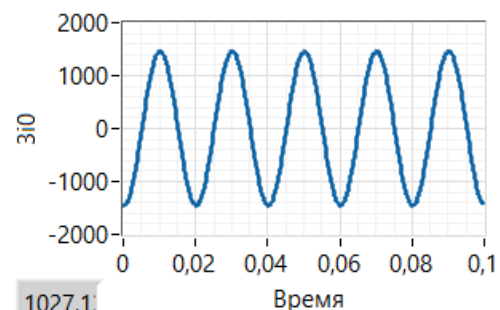
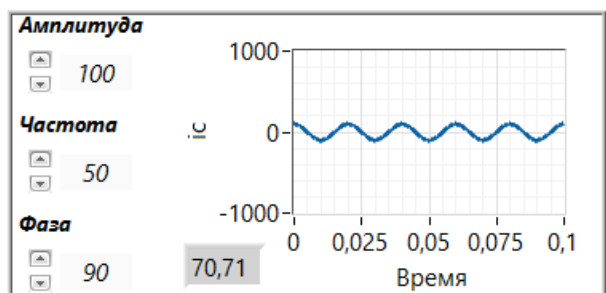
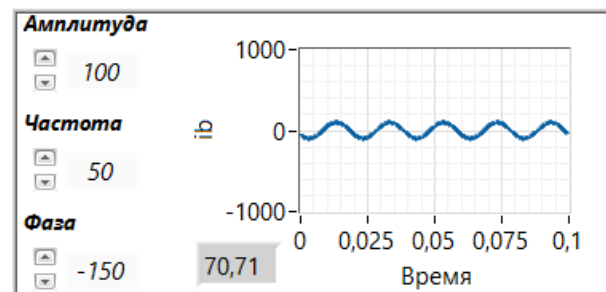
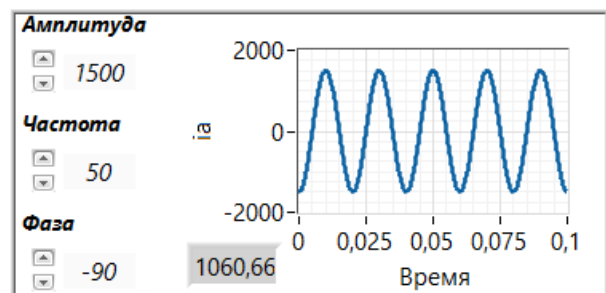
Как показано на рисунках 15, 16, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока и напряжения реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**.

Как показано на рисунке 17, выдержка времени ступени выполнена с помощью встроенного модуля **Elapsed time**.

Сдвиг синусоидального сигнала тока нулевой последовательности на угол, равный $-\pi/2$, выполняется с помощью преобразования Гильберта, осуществляемого встроенным модулем **Hilbert** (показано на рисунке 17).

Расчёт среднего интегрального значения синусоидальной величины за период выполняется с помощью встроенного модуля **Mean** (показано на рисунке 17).

Рисунок 17 также включает в себя иллюстрацию работы модели на примере случая пуска последней ступени ТЗНП при удалённом КЗ в сети 110 кВ вида «А – 0» (ток КЗ протекает «в линию»).



3I0 > SET S0 -> Отсчитанное время, с
 ● ● 8,566с
 Срабатывание защиты
 ●

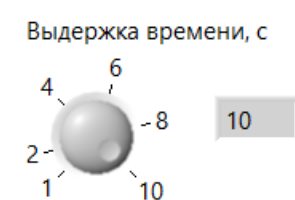
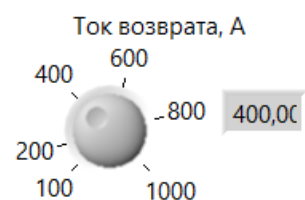
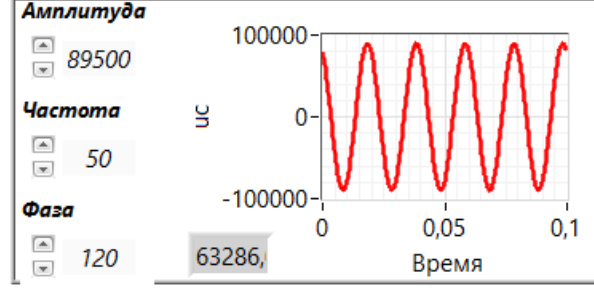
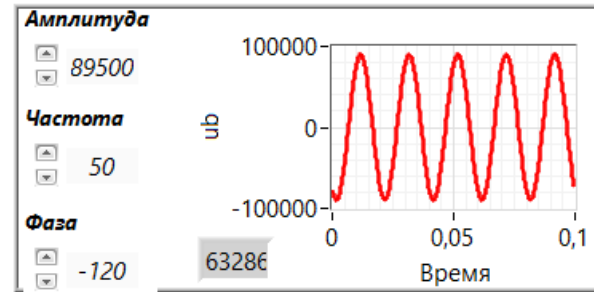
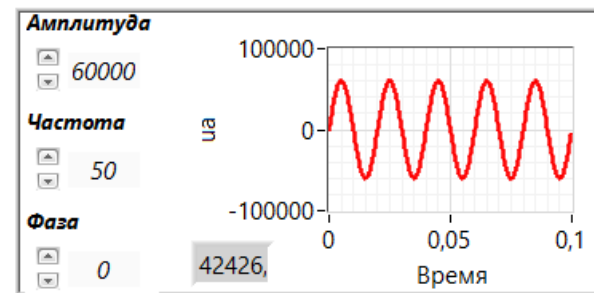


Рисунок 14 – Интерфейс пользователя модели последней ступени ТЗНП

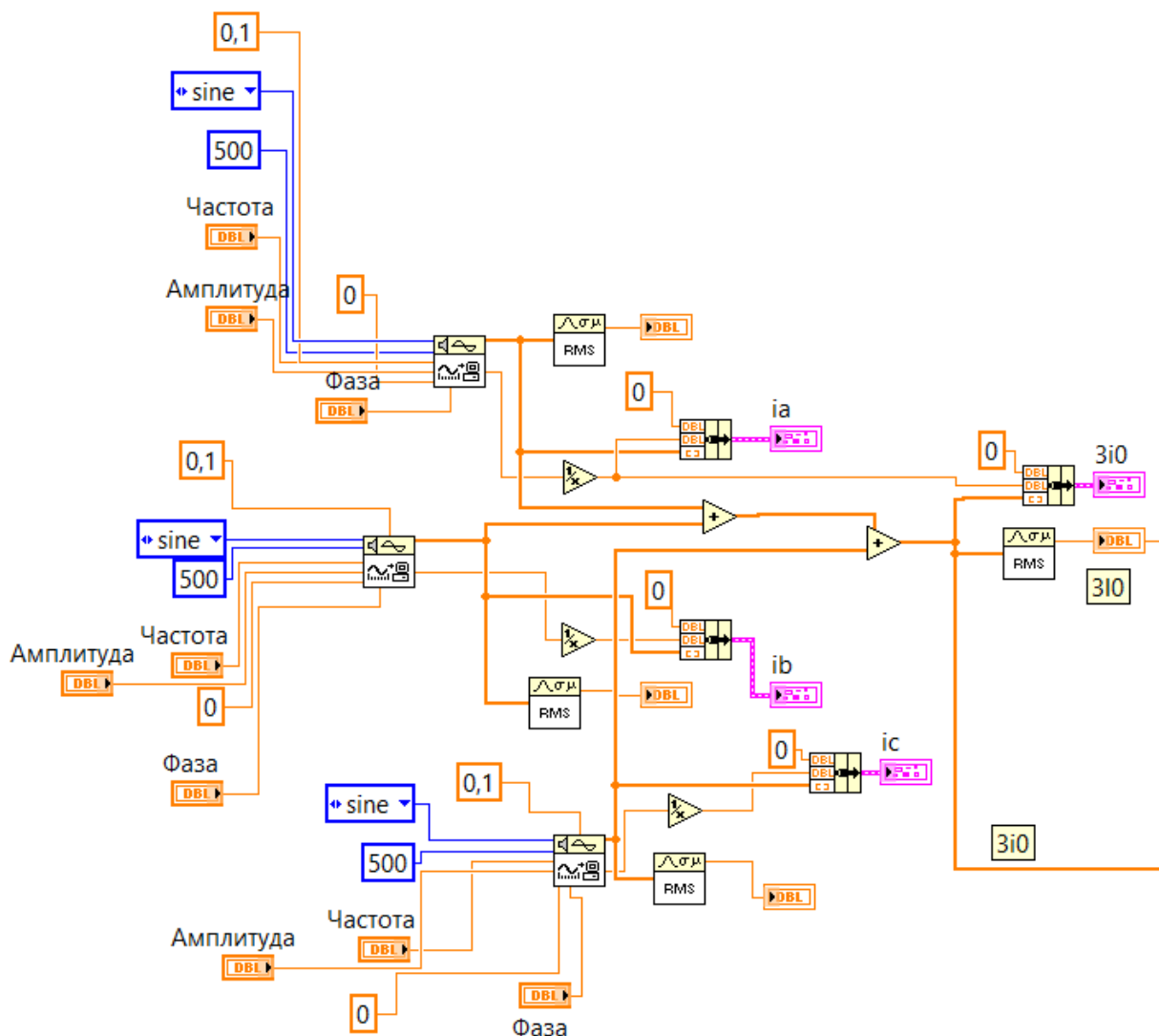


Рисунок 15 – Вычислительно-логическая схема модели последней ступени ТЗНП (формирование синусоидального сигнала тока нулевой последовательности)

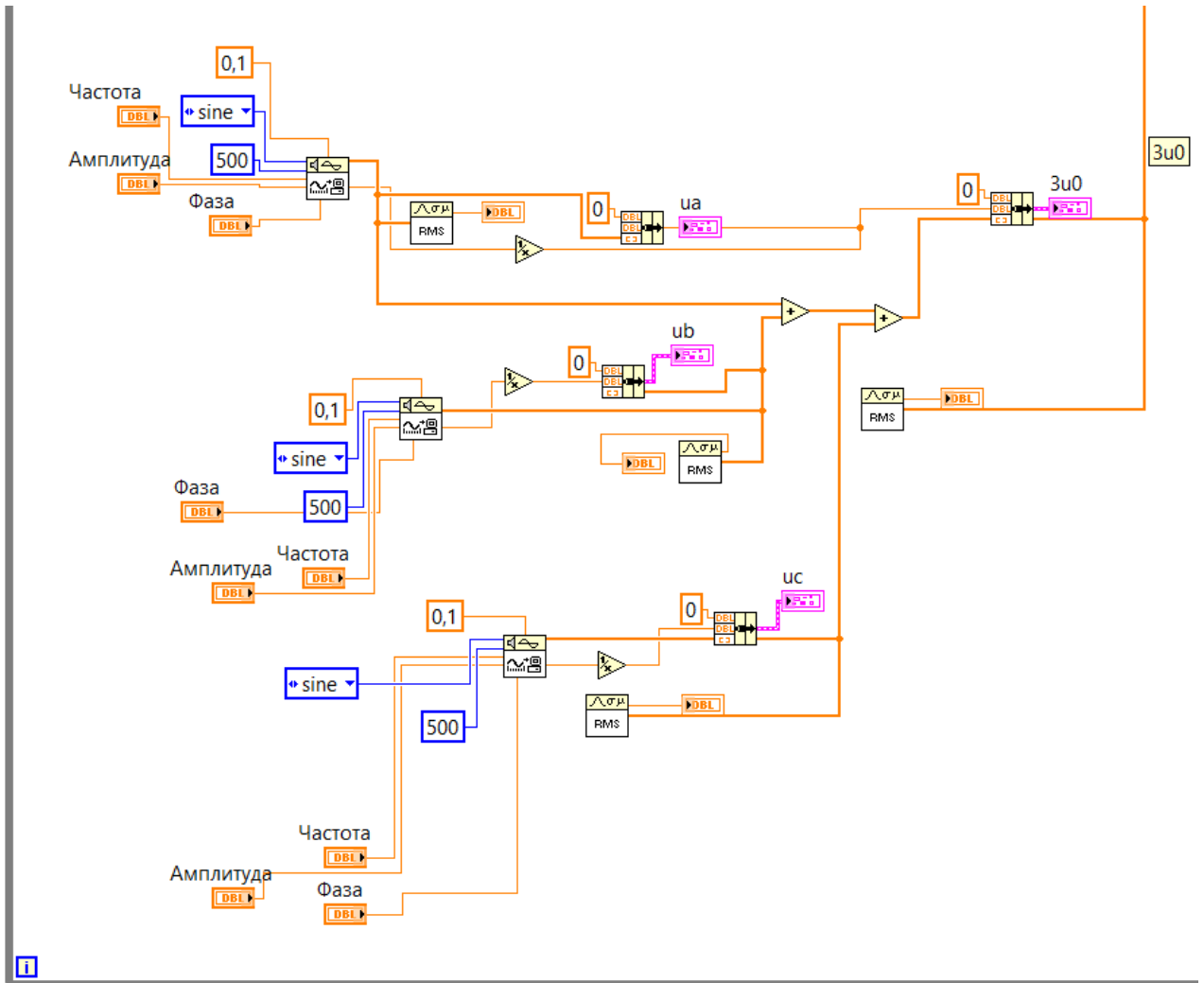


Рисунок 16 – Вычислительно-логическая схема модели последней ступени ТЗНП (формирование синусоидального сигнала напряжения нулевой последовательности)

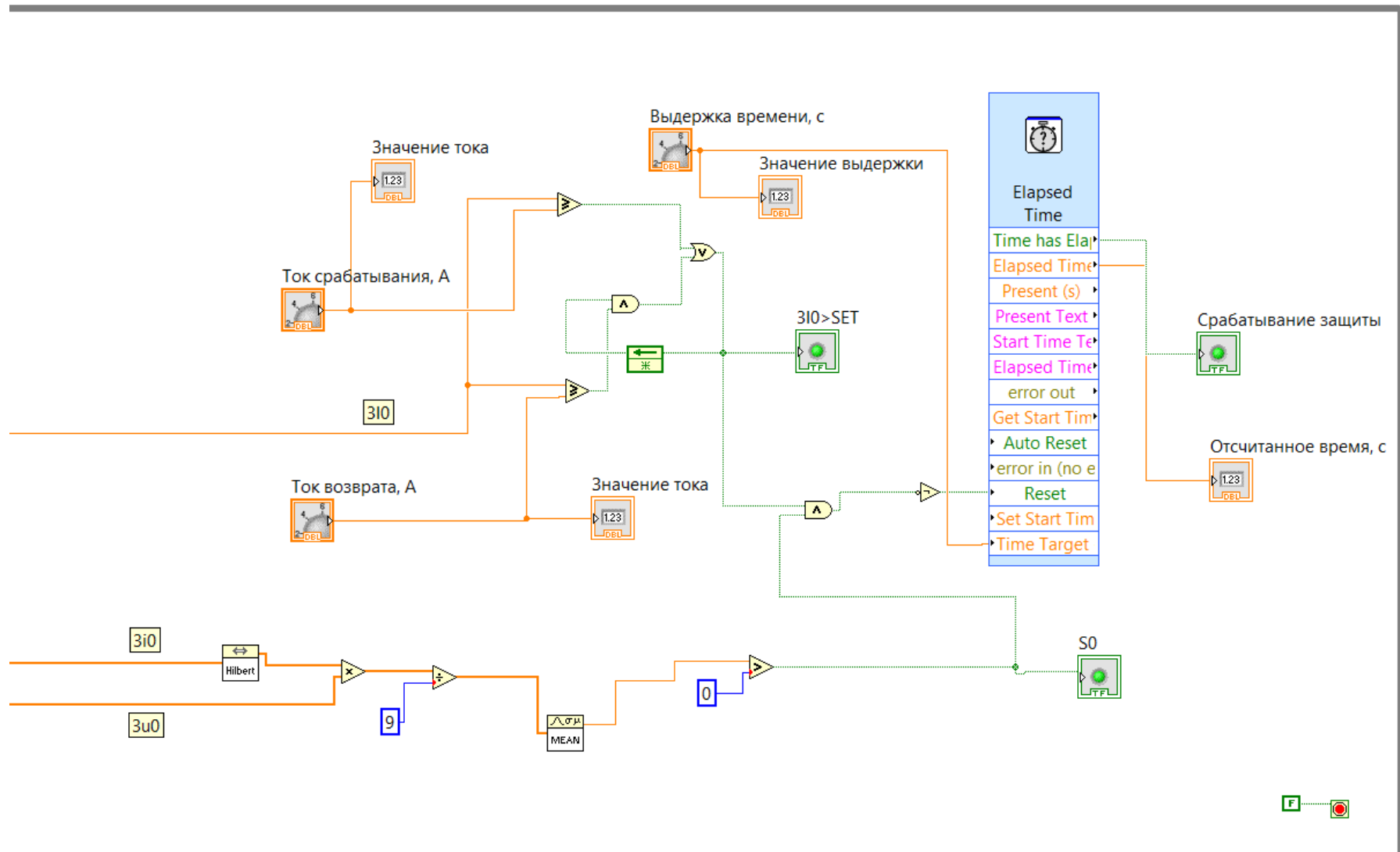


Рисунок 17 – Вычислительно-логическая схема модели последней ступени ТЗНП
(алгоритмы измерительных органов и логических элементов)

4 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕНАПРАВЛЕННОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

4.1 Краткое описание и назначение ДЗ

ДЗ от междуфазных коротких замыканий предназначена для отключения коротких замыканий на защищаемой ЛЭП и в прилегающей сети:

- двухфазных КЗ («**line-to-line**» **fault**);
- двухфазных КЗ «на землю» («**line-to-line-to-ground**» **fault**);
- трёхфазных КЗ («**three phase**» **fault**).

Типовой набор ступеней ДЗ от междуфазных КЗ транзитной ЛЭП 110–220 кВ включает в себя несколько ступеней, первая из которых предназначена для отключения КЗ без выдержки в начале защищаемой линии, последняя – для обеспечения дальнего резервирования устройств ДЗ элементов прилегающей электрической сети.

В рамках настоящей работы разработана модель последней ступени ДЗ, обеспечивающей не только защиту всей ЛЭП, но и выполняющей функцию дальнего резервирования.

Ввиду обязательного наличия у данной ступени выдержки времени, модель данной ступени выполнена с упрощённой круговой характеристикой срабатывания с центром в начале координат (показана на рисунке 18).

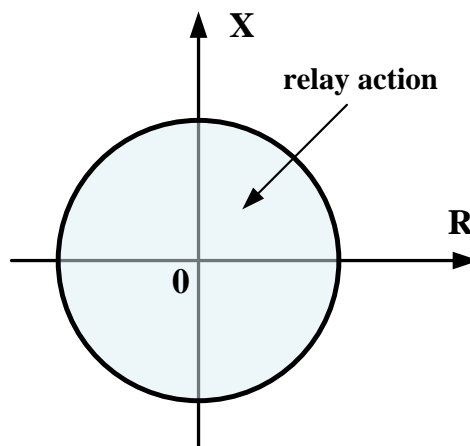


Рисунок 18 – Характеристика срабатывания ненаправленной ступени ДЗ

4.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования ДЗ

Структурная схема подключения ДЗ, реализованной на базе терминала РЗА, представлена на рисунке 19. Алгоритм функционирования моделируемой ДЗ представлен на рисунке 20.

Как показано на рисунках 19, 20, для функционирования ДЗ необходимы цепи переменного тока трансформаторов тока всех трёх фаз защищаемой линии, и цепи переменного напряжения трансформаторов напряжения всех трёх фаз соответствующей системы шин электрической подстанции, срабатывание ДЗ с действием на отключение выключателя должно осуществляться при срабатывании любого из междуфазных реле сопротивления и истечения выдержки времени защиты.

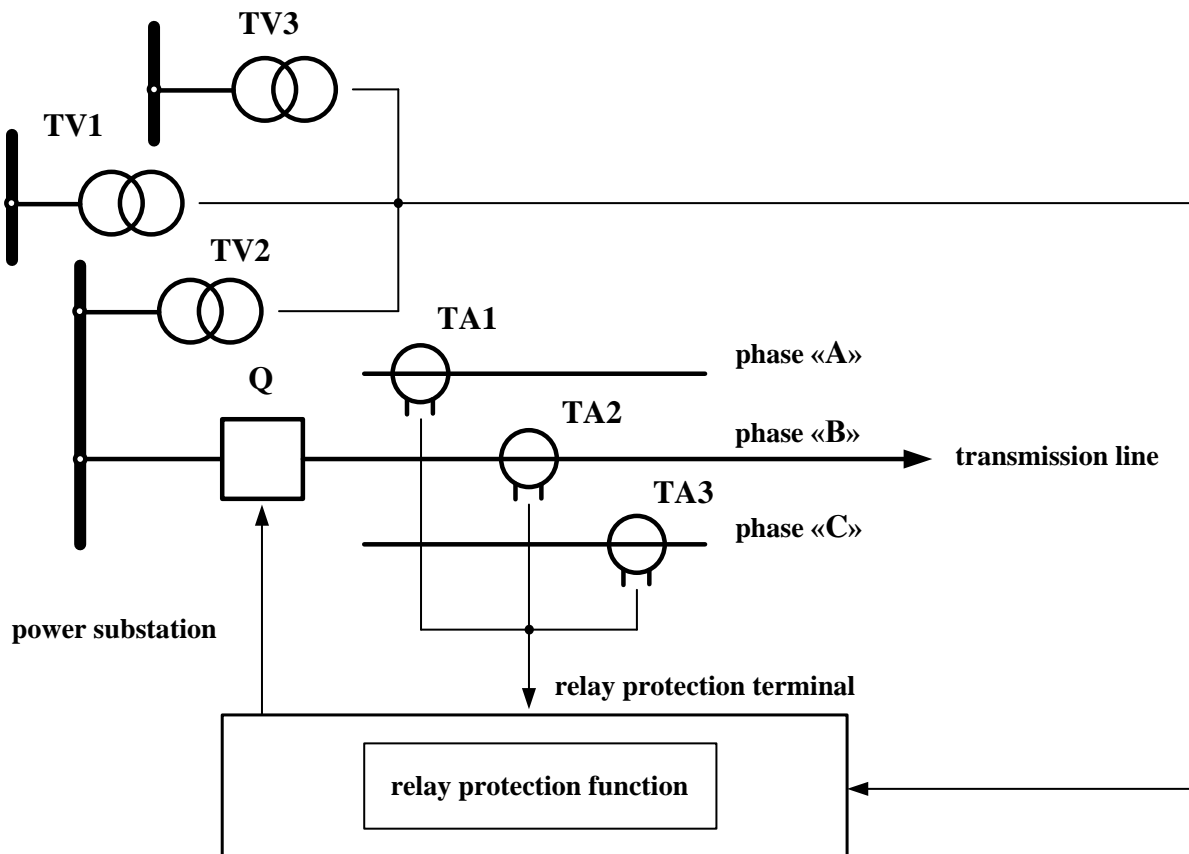


Рисунок 19 – Структурная схема подключения ДЗ

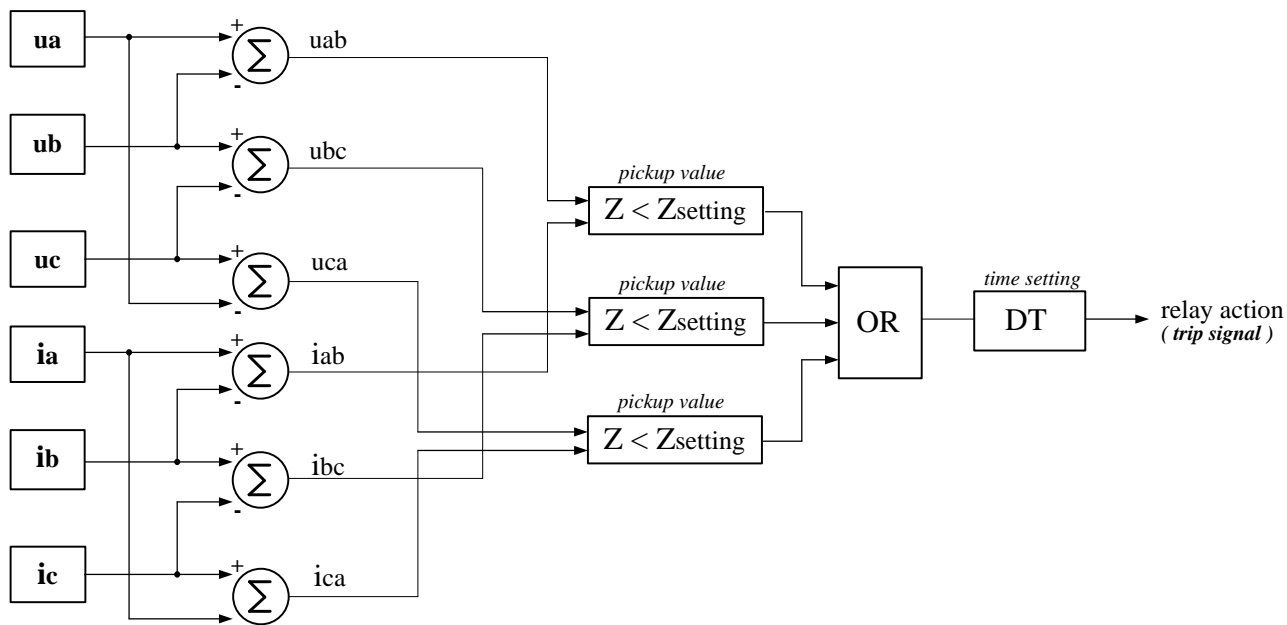


Рисунок 20 – Алгоритм функционирования моделируемой ДЗ

При разработке модели междуфазного реле сопротивления ДЗ применён типовой алгоритм сравнения величин переменного тока и напряжения посредством нуля-индикатора, срабатывающем при выполнении условия:

$$(U - I \cdot z) < 0, \quad (2)$$

где U – линейное напряжение, на которое включено РС;

I – междуфазный ток, на который включено РС;

z – сопротивление срабатывания.

4.3 Разработанная модель ДЗ

Интерфейс пользователя модели ДЗ представлен на рисунке 21.

Вычислительно-логическая схема модели ДЗ представлена на:

- рисунке 22 – алгоритм формирования синусоидальных сигналов междуфазных токов;

- рисунке 23 – алгоритм формирования синусоидальных сигналов линейных напряжений;

- рисунке 24 – алгоритмы измерительных органов и логических элементов защиты.

Как показано на рисунке 22, интерфейс пользователя модели ДЗ включает в себя:

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фаз защищаемой линии от времени и их действующих значений;

- параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного напряжения фаз защищаемой линии (соответствующей системы шин) от времени и их действующих значений;

- регулятор сопротивления срабатывания (**pickup impedance**) ДЗ в первичных величинах;

- регулятор выдержки времени (**time setting**) ДЗ в секундах;

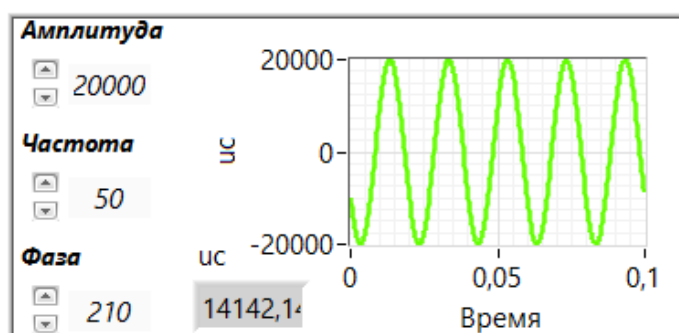
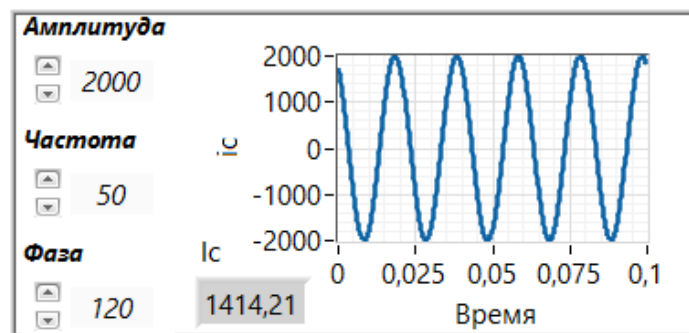
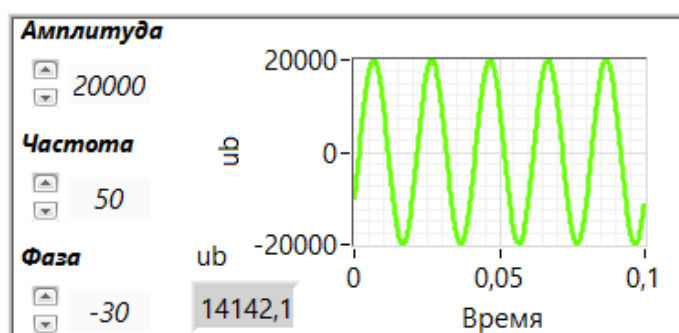
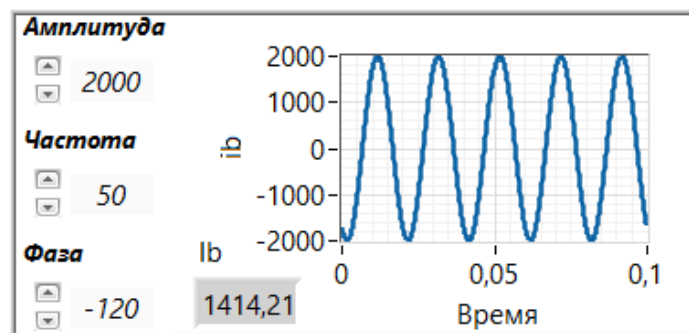
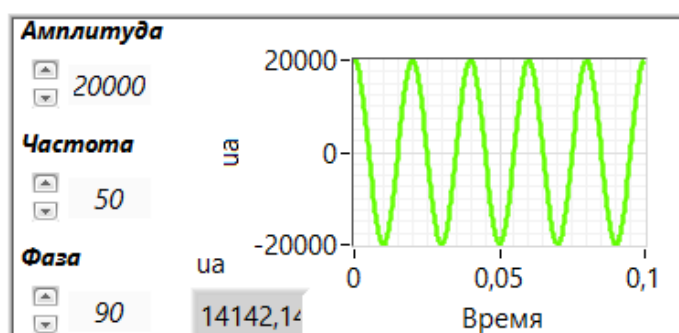
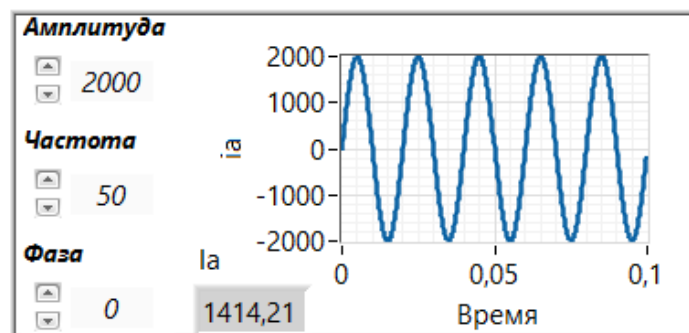
- табло с информацией об отсчитанном времени с момента запуска защиты;

- светодиод, отражающий сработавшее состояние ступени.

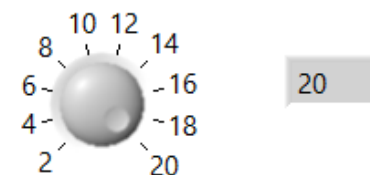
Как показано на рисунках 22, 23, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока и напряжения реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**.

Как показано на рисунке 24, выдержка времени ДЗ выполнена с помощью встроенного модуля **Elapsed time**.

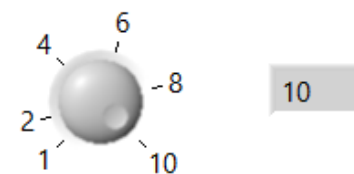
Рисунок 22 также включает в себя иллюстрацию работы модели на примере случая пуска ДЗ при удалённом трёхфазном КЗ в сети 110 кВ в зоне срабатывания защиты.



Сопротивление срабатывания, Ом



Выдержка времени, с



7,533E

Отсчитанное время, с

Срабатывание защиты

Рисунок 21 – Интерфейс пользователя модели ДЗ

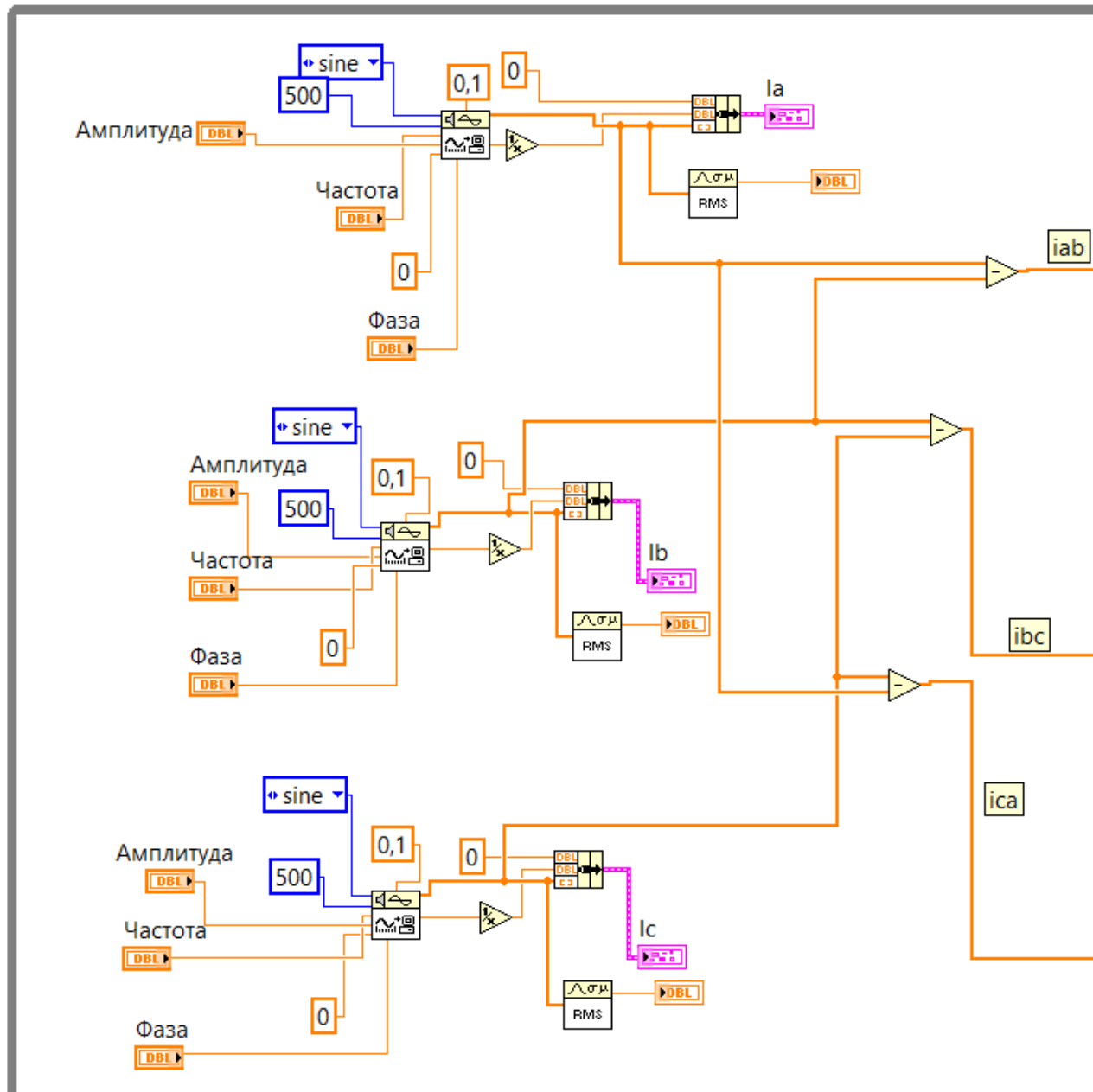


Рисунок 22 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗ
(формирование синусоидальных сигналов междуфазных токов)

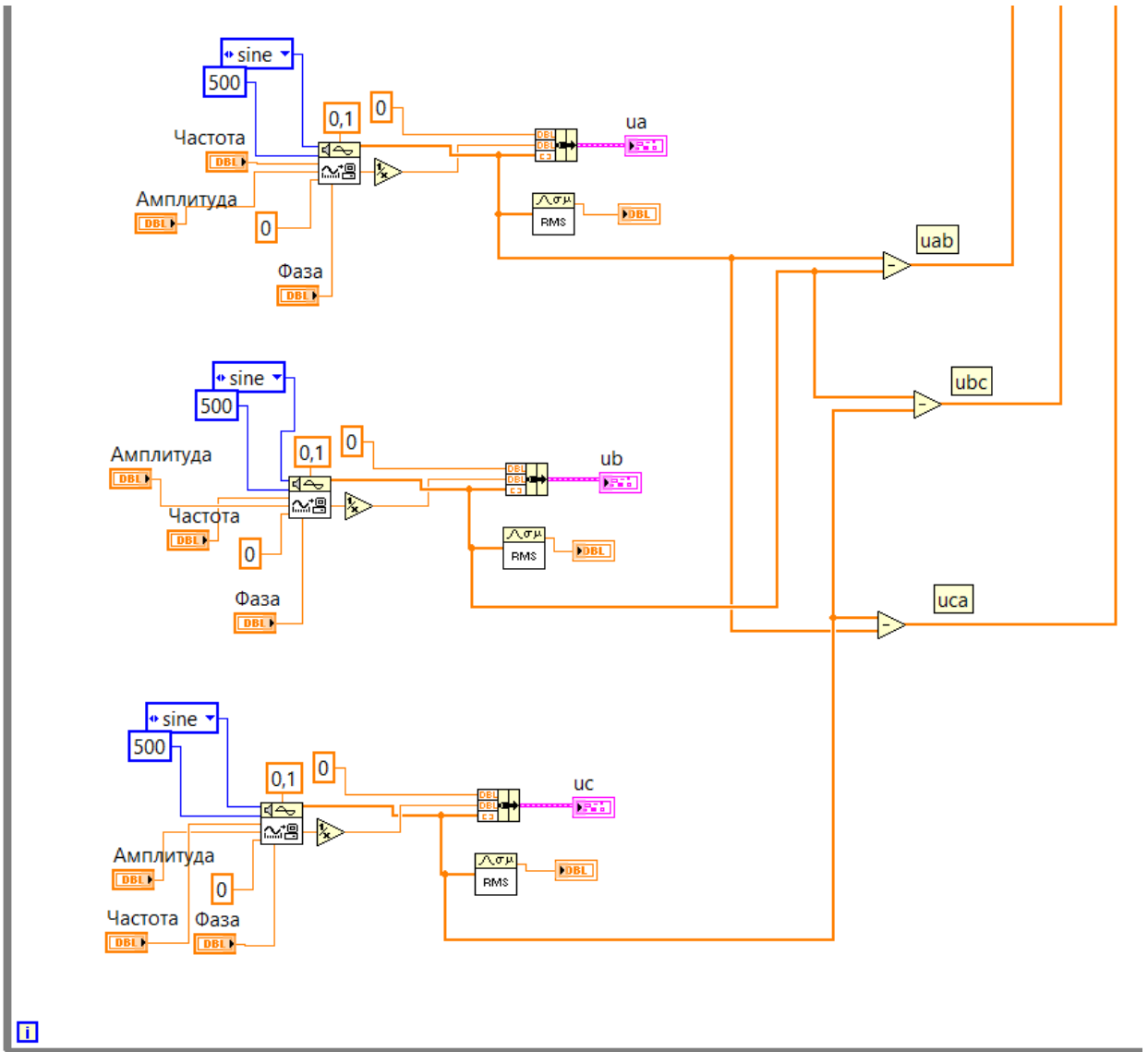


Рисунок 23 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗ
(формирование синусоидальных сигналов линейных напряжений)

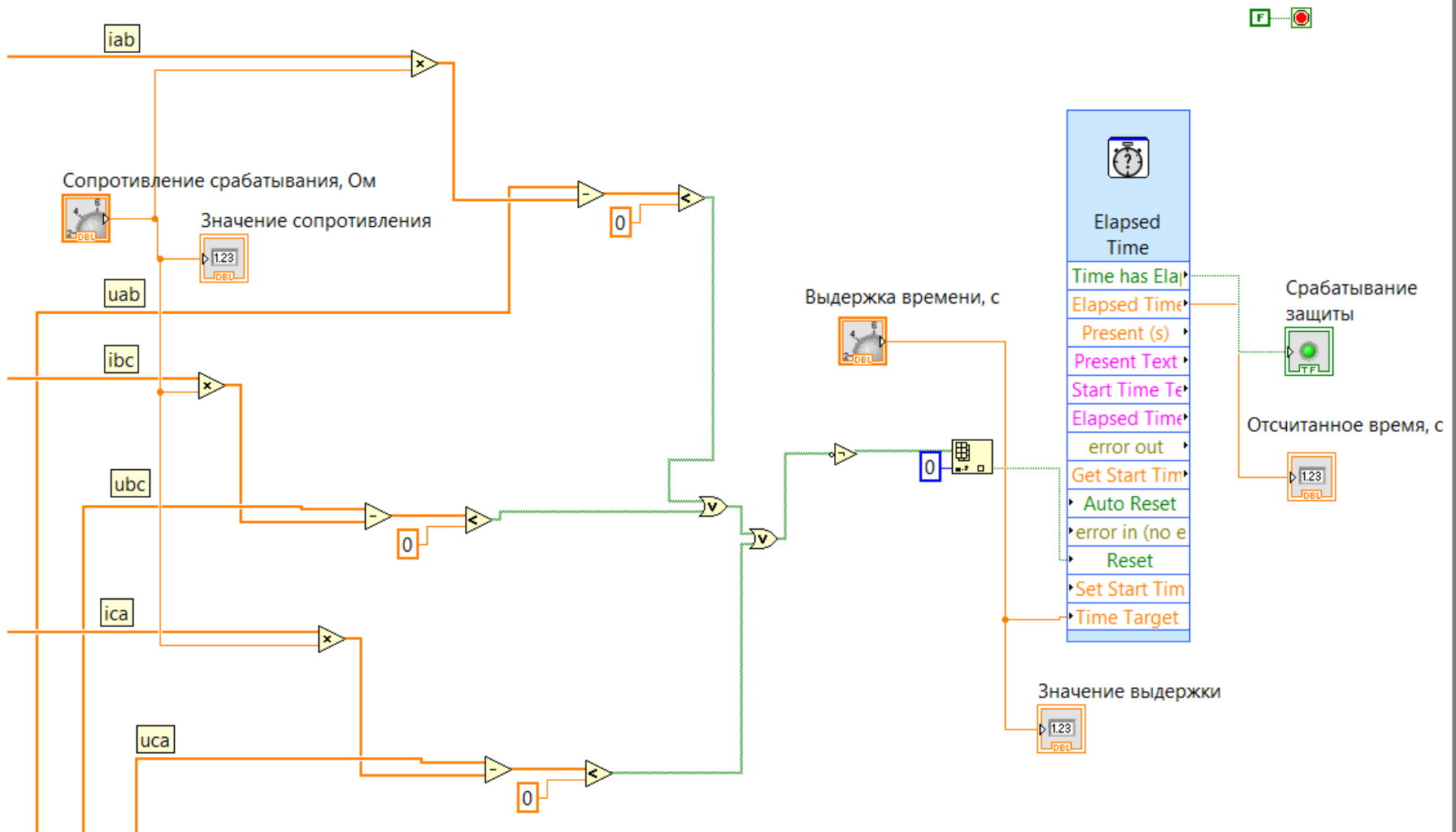


Рисунок 24 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗ
(алгоритмы измерительных органов и логических элементов)

5 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

5.1 Краткое описание и назначение ДЗЛ

Продольная дифференциальная защита ЛЭП предназначена для отключения КЗ на защищаемой ЛЭП без выдержки времени:

- однофазных КЗ (**single «line-to-ground» fault**);
- двухфазных КЗ (**«line-to-line» fault**);
- двухфазных КЗ «на землю» (**«line-to-line-to-ground» fault**);
- трёхфазных КЗ (**«three phase» fault**).

В отличие от ступенчатых защит ЛЭП, ДЗЛ состоит из нескольких комплектов (полукомплектов), устанавливаемых, со стороны всех питающих концов ЛЭП.

В качестве канала связи между полукомплектами микропроцессорной ДЗЛ используется ВОЛС.

Защищаемая зона ДЗЛ ограничена трансформаторами тока, к которым подключены её полукомплекты.

Для обеспечения отстройки защиты от токов небаланса при внешних КЗ без снижения её чувствительности ко внутренним КЗ, алгоритмы работы устройств продольной ДЗЛ включают в себя торможение – настраиваемую зависимость дифференциального тока срабатывания (**differential operating current**) от величины тока, называемого тормозным (**bias current**).

В качестве тормозной характеристики ДЗЛ при разработке модели принята ломаная характеристика срабатывания, являющаяся одним из типовых упрощённых вариантов торможения в современных микропроцессорных устройствах ДЗЛ (показана на рисунке 25). Данная характеристика представляет из себя ломаную кривую, состоящую из двух участков (звеньев) S1 и S2.

Координатами точки сочленения участков S1 и S2 являются ток начала торможения (I_{b0}) и начальный ток срабатывания (I_{d0}).

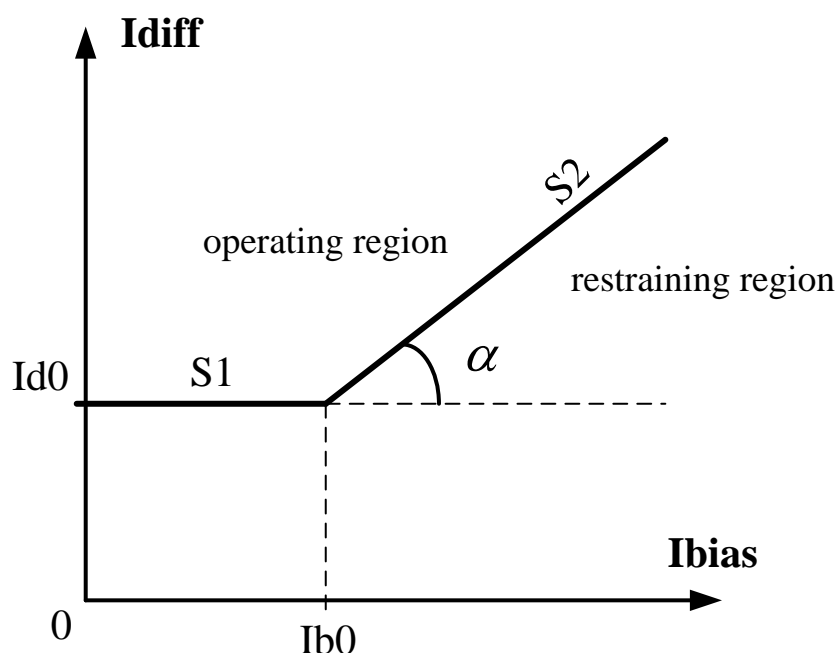


Рисунок 25 – Тормозная характеристика моделируемой ДЗЛ

Наклон участка S2 характеризуется углом α или коэффициентом торможения, определяемым как:

$$k_{bias} = tg\alpha, \quad (3)$$

где k_{bias} – коэффициент торможения.

В качестве тормозного тока при разработке модели принята сумма модулей токов, протекающих через полуккомплекты защиты, используемая, согласно [4], в устройствах ДЗЛ ЛЭП 110–220 кВ, выпускаемых ООО «НПП ЭКРА».

5.2 Структурная схема подключения и алгоритм функционирования ДЗЛ

Структурная схема подключения микропроцессорной ДЗЛ представлена на рисунке 26. Алгоритм функционирования моделируемой ДЗЛ представлен на рисунке 27.

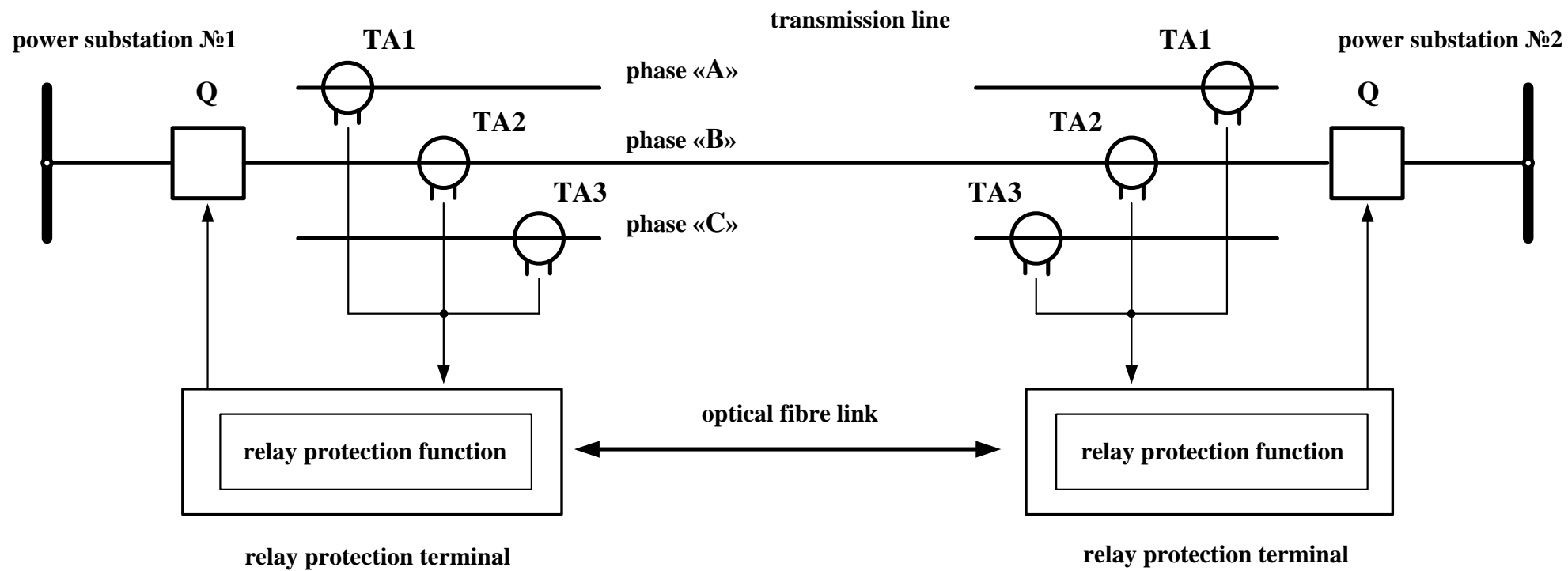


Рисунок 26 – Структурная схема подключения микропроцессорной ДЗЛ

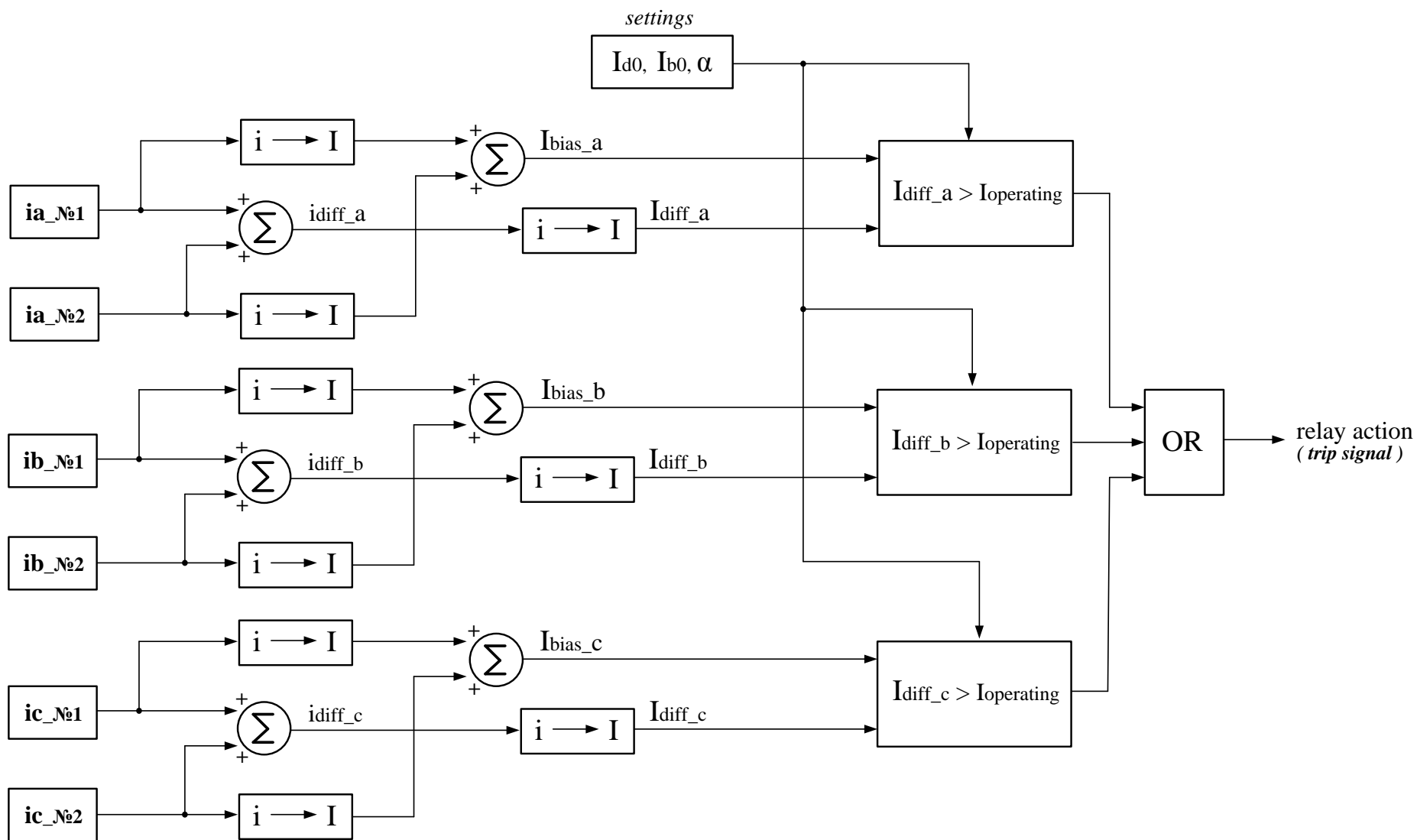


Рисунок 27 – Алгоритм функционирования моделируемой ДЗЛ

Как показано на рисунках 26, 27, для функционирования продольной ДЗЛ необходимы цепи переменного тока трансформаторов тока всех трёх фаз защищаемой линии с каждой из её сторон, где установлены полуккомплекты защиты. Срабатывание ДЗЛ с действием на отключение выключателя должно осуществляться при срабатывании любого из реле, включённых на дифференциальный и тормозной токи фазы «А», «В» или «С», соответственно.

Формирование дифференциального тока срабатывания моделируемых реле осуществляется согласно формулам:

$$I_{diff_oper} = I_{d0}, \text{ если } I_{bias} < I_{b0}, \quad (4)$$

$$I_{diff_oper} = I_{d0} + tg\alpha \cdot (I_{bias} - I_{b0}), \text{ если } I_{bias} \geq I_{b0}, \quad (5)$$

где I_{diff_oper} – дифференциальный ток срабатывания;

I_{d0} – начальный ток срабатывания;

I_{b0} – ток начала торможения;

I_{bias} – тормозной ток;

α – угол наклона участка S2.

5.3 Разработанная модель ДЗЛ

Интерфейс пользователя модели продольной ДЗЛ представлен на рисунках 28 – 31.

На рисунке 28 показаны параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фазы «А» в начале и в конце защищаемой линии от времени, а также график зависимости от времени формируемого синусоидального сигнала дифференциального тока фазы «А», значения вычисляемых моделью тормозного тока и дифференциального тока срабатывания реле фазы «А», светодиод, отображающий срабатывание данного реле фазы «А».

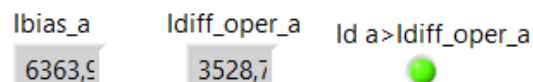
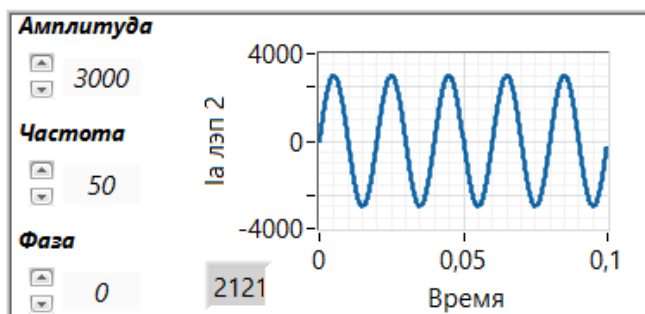
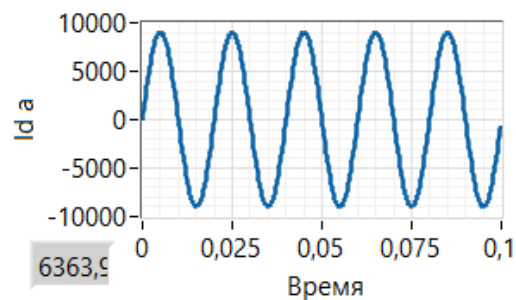
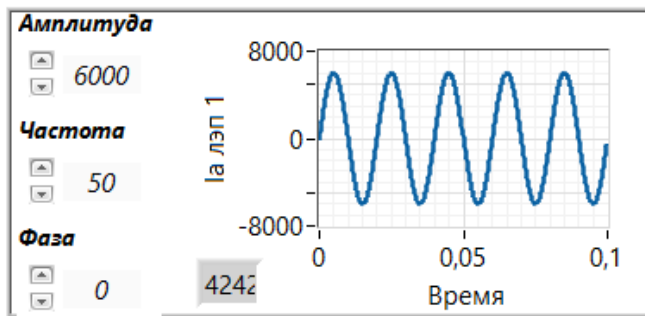


Рисунок 28 – Интерфейс пользователя модели ДЗЛ (дифференциальное реле фазы «А»)

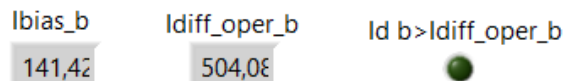
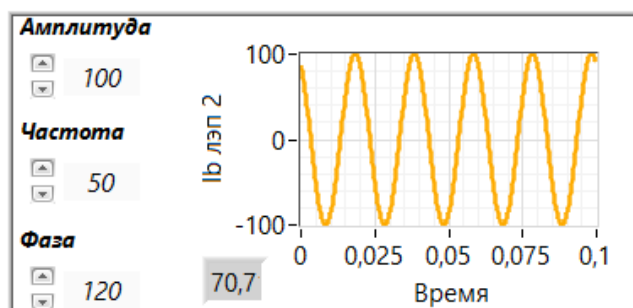
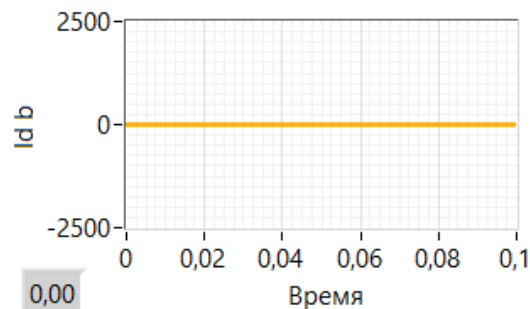
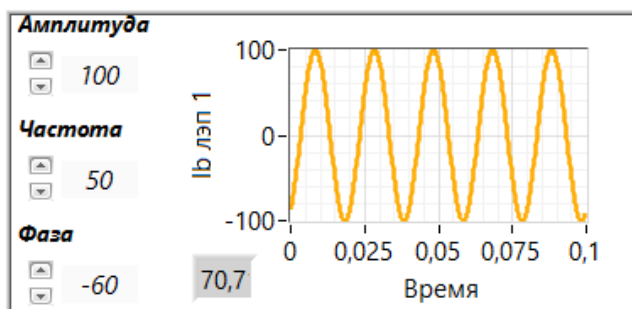


Рисунок 29 – Интерфейс пользователя модели ДЗЛ (дифференциальное реле фазы «В»)

На рисунке 29 показаны параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фазы «В»

в начале и в конце защищаемой линии от времени, а также график зависимости от времени формируемого синусоидального сигнала дифференциального тока фазы «В», значения вычисляемых моделью тормозного тока и дифференциального тока срабатывания реле фазы «В», светодиод, отображающий срабатывание данного реле фазы «В».

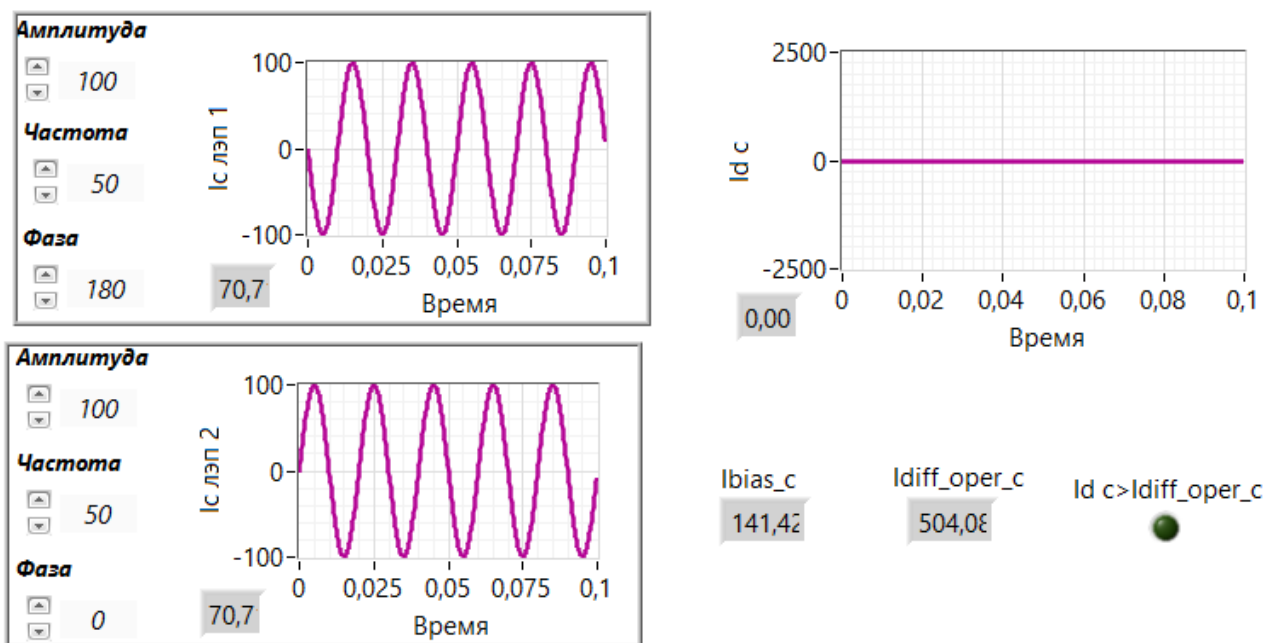


Рисунок 30 – Интерфейс пользователя модели ДЗЛ (дифференциальное реле фазы «С»)

На рисунке 30 показаны параметры регулировки и графики зависимостей генерируемых моделью синусоидальных сигналов переменного тока фазы «С» в начале и в конце защищаемой линии от времени, а также график зависимости от времени формируемого синусоидального сигнала дифференциального тока фазы «С», значения вычисляемых моделью тормозного тока и дифференциального тока срабатывания реле фазы «С», светодиод, отображающий срабатывание данного реле фазы «С».



Рисунок 31 – Интерфейс пользователя модели ДЗЛ
(панель регулировки уставок защиты)

На рисунке 31 показаны регуляторы уставок дифференциальных реле модели:

- регулятор начального тока срабатывания I_{d0} (в первичных величинах);
- регулятор тока начала торможения I_{b0} (в первичных величинах);
- регулятор угла α наклона участка S2 характеристики срабатывания.

Рисунок 31 также включает в себя табло с вычисляемым моделью тангенсом угла наклона участка S2 характеристики срабатывания дифференциальных реле и светодиод, отображающий сработавшее состояние защиты.

Рисунки 28 – 31 также включают в себя иллюстрацию работы модели на примере случая срабатывания защиты при однофазном КЗ вида «А – 0» на защищаемой линии.

Вычислительно-логическая схема модели продольной ДЗЛ представлена на рисунках 32 – 35.

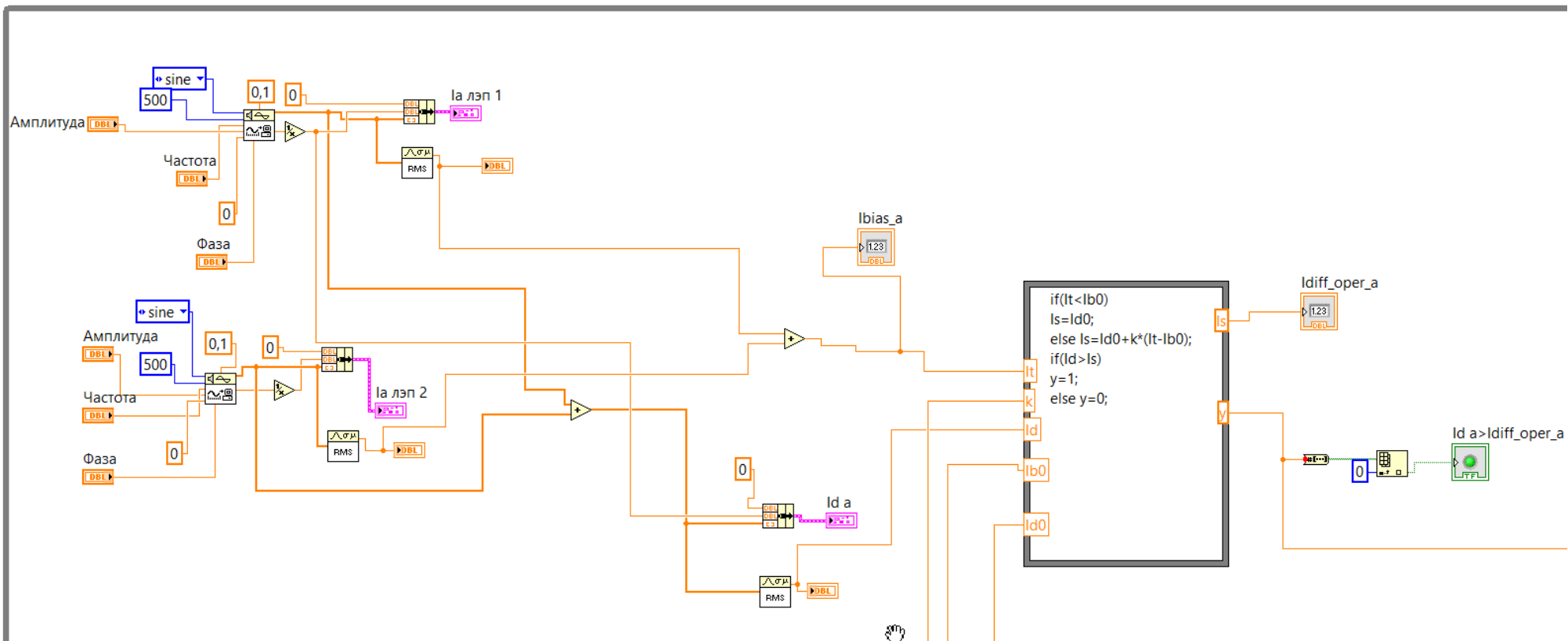


Рисунок 32 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗЛ
(модель дифференциального реле фазы «А»)

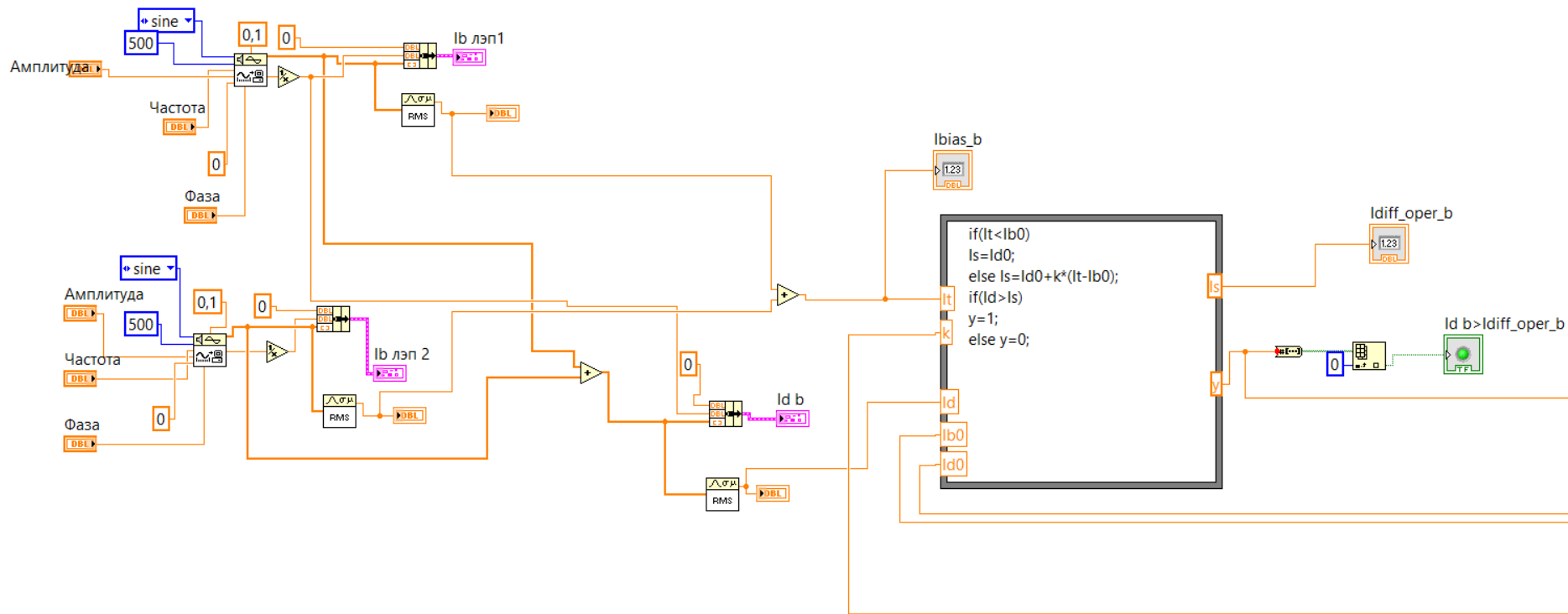


Рисунок 33 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗЛ
(модель дифференциального реле фазы «В»)

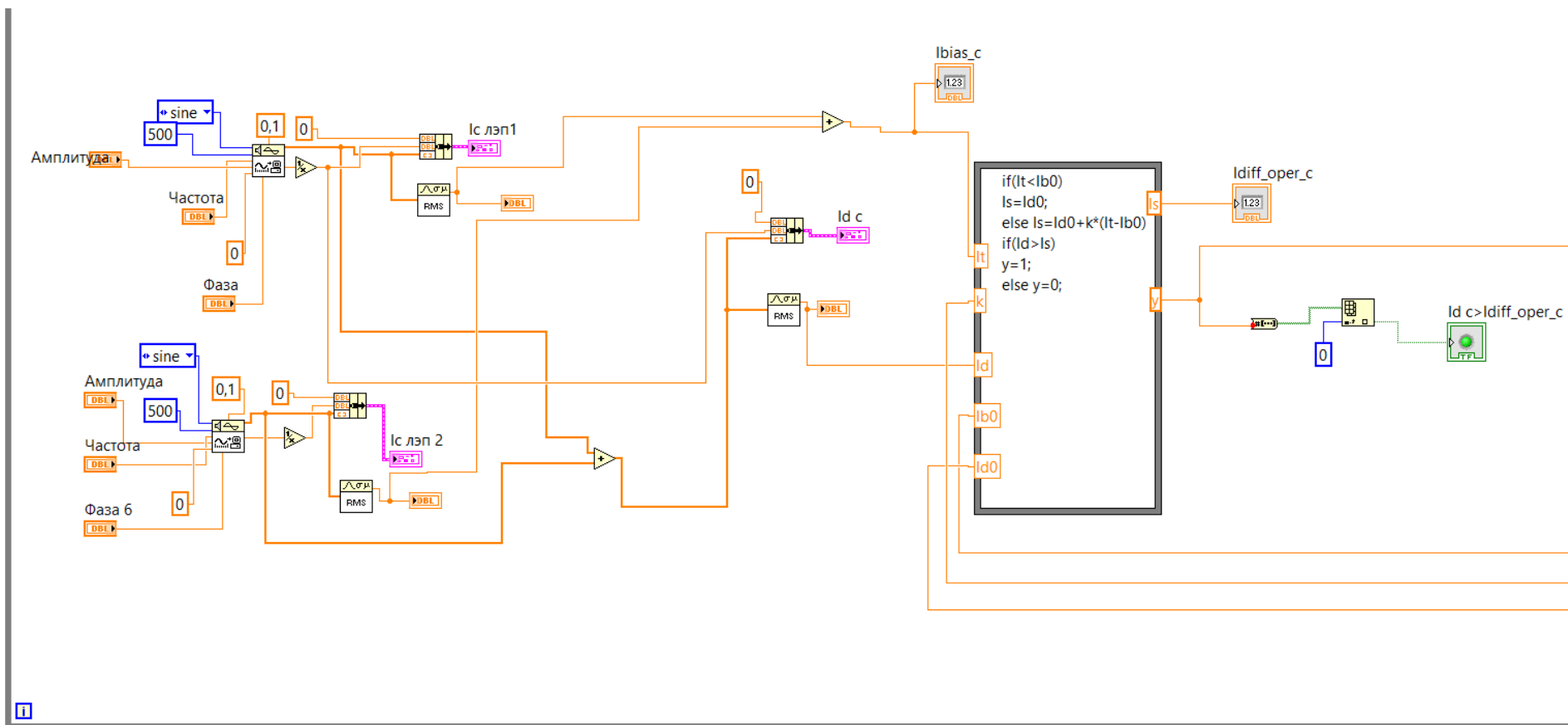


Рисунок 34 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗЛ
(модель дифференциального реле фазы «С»)

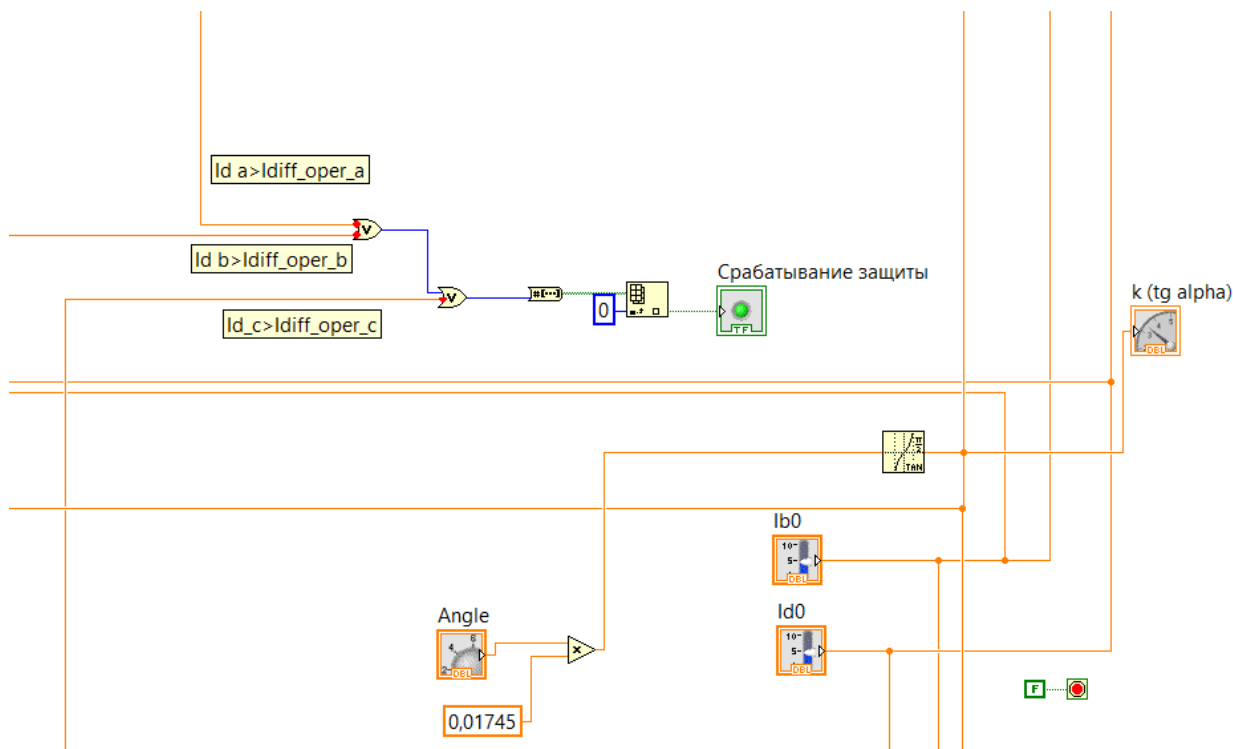


Рисунок 35 – Вычислительно-логическая схема модели ДЗЛ
(алгоритм обработки параметров настройки и
сигналов срабатывания реле)

Как показано на рисунках 32 – 34, генерируемые моделью синусоидальные сигналы переменного тока реализованы на базе встроенного модуля **Signal generator by duration**, вычисление действующих значений синусоидальных величин выполнено с помощью встроенного модуля **RMS**.

Математические формулы, задающие характеристику срабатывания дифференциальных реле, реализованы с использованием программного модуля **Formula Node** (показаны на рисунках 32 – 34).

Расчёт коэффициента наклона тормозной характеристики выполнен с помощью встроенного модуля тригонометрической функции тангенса **tan** (показано на рисунке 35).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена логика функционирования основных видов релейной защиты транзитных воздушных линий электропередач 110–220 кВ.

Для каждой защиты разработана функциональная модель в среде «Lab-View» и приведены ключевые формулы, а также структурно-логические схемы, наглядно иллюстрирующие подходы по их дальнейшему использованию. Изложенный в работе материал обеспечит:

- удобство в эксплуатации разработанных моделей;
- высокое качество изучения принципов действия рассмотренных в работе функций релейной защиты;
- возможность опытным путем воспроизводить и изучать на моделях конкретные аварийные ситуации и проверять работу релейной защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок Российской Федерации (издание № 7), утверждённые Приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204.
2. Стандарт ПАО «ФСК ЕЭС» «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 – 750 кВ», утверждённый Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 25.08.2017 № 343.
3. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 – 500 кВ. Расчёты. – М.: Энергия, 1980. – 88 с.
4. ЭКРА.656453.849 РЭ. Руководство по эксплуатации шкафа дифференциальной защиты линии типа ШЭ2607 094. – 118 с.