УДК 621.311

Иванков М.Я.
магистрант 2 курса
кафедра ГГЭЭС
Саяно-Шушенский филиал
Сибирский федеральный университет
(п. Черёмушки, г. Саяногорск, Россия)

Научный руководитель:
Литвинов И.И.
кандидат технических наук, доцент
кафедра ГГЭЭС
Саяно-Шушенский филиал
Сибирский федеральный университет
(п. Черёмушки, г. Саяногорск, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ, УПРАВЛЯЕМЫМ КОНВЕРТОРОМ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMINTECH

Аннотация: *на сегодняшний день при проектировании электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, сталкиваются с проблемами применения устройств РЗА. Связано это с тем, что на ветроэлектростанциях в качестве преобразователя электроэнергии из постоянного в переменный ток используется конвертор — комплексное устройство, предназначенное не только для преобразования тока, но и для защиты как себя, так и генерирующего оборудования. С проектированием этого устройства возникают проблемы, суть которых состоит в том, что конвертор изготавливается на заводе и там же программируется, т. е. только завод-изготовитель знает, как конвертор осуществляет защиту. Это делает невозможным создание стандартизированного*

устройства, которое будет подходить к любой электростанции, работающей на возобновляемых источниках энергии.

Предполагается, что общий анализ будет производиться инженером, обладающим большим опытом проектирования и анализа поведения существующих схем конверторов и защит возобновляемых источников энергии. Предпринимаются попытки создания математической модели офшорной ветряной электростанции с конвертором для определения характера поведения устройства при переходных процессах, происходящих в энергосистеме, и создания алгоритма работы устройства при возникновении токов короткого замыкания.

Актуальность работы обоснована существующими темпами внедрения электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии и требующих наличия стандартизированного конвертора, который будет подходить к более широкому спектру электростанций.

Ключевые слова: *возобновляемый источник энергии, офшорная ветроэлектростанция, конвертор, релейная защита, математическая модель, переходный процесс, ток короткого замыкания, алгоритм защиты, стандартизация оборудования.*

SimInTech (Simulation In Technic) – среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев.

SimInTech предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах управления.

В данной главе будет описан процесс моделирования простейшей математической модели энергосистемы с возобновляемым источником энергии, созданной в программном комплексе SimInTech.

Простейшая модель части энергосистемы с ВИЭ состоит из:

Блок возобновляемого источника энергии (далее ВИЭ),

Блок энергосистемы,

Блоки силовых трансформаторов,

Блок высоковольтной кабельной линии,

Блок трёхфазной нагрузки,

Блок получения различного вида КЗ,

Блок управляемого инвертора,

Блок сглаживания выходного напряжения инвертора.

Исходная схема модели энергосистемы представлена на рисунке №1.

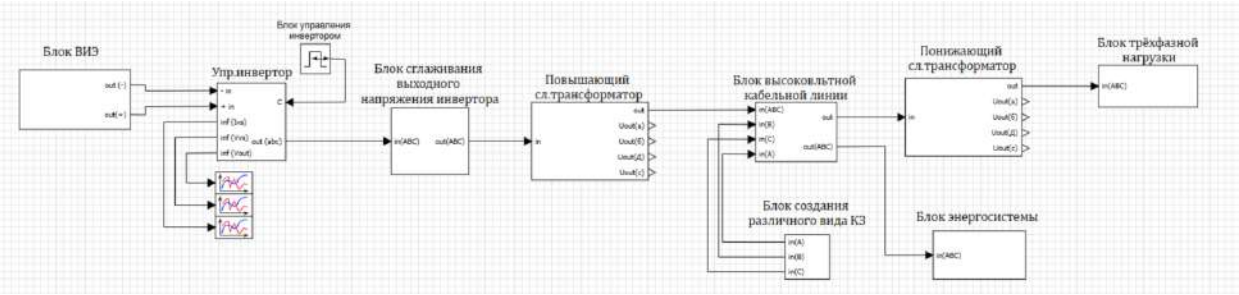


Рисунок 1. Исходная схема модели энергосистемы.

Блок ВИЭ представлен имеет на своём борту восемь элементов представленные на рисунке №2.

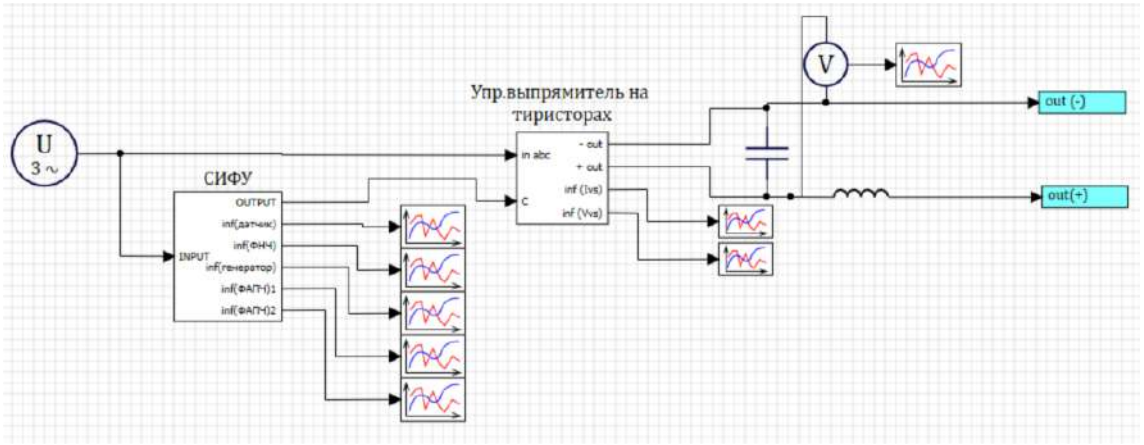


Рисунок 2. Внутреннее строение блока ВИЭ.

Он состоит из:

Источник напряжения трёхфазный,

Блок СИФУ (система импульсно-фазового управления),

Измерительных модулей,

Управляемого выпрямителя на тиристорах,

Сглаживающий LC – фильтр.

Данная схема представляет собой повышающий AC/DC конвертер с коррекцией коэффициента мощности, это позволяет проводить отбор тока от первичного источника в те периоды времени, когда напряжение на входе меньше, чем на выходе.

Далее представлены таблица 1 с характеристиками блоков: источник трёхфазного напряжения, СИФУ, управляемого выпрямителя на тиристорах и блок сглаживающего LC – фильтра.

Таблица 1. Характеристики блоков.

Блок трёхфазного напряжения		
Напряжение U, В	380	
Частота f, Гц	50	
Фазовый сдвиг в град.	0	
Блок СИФУ		
ФНЧ	Частота среза, Гц	0.016
	Число каналов	3
ФАПЧ	Коэф.усл. Kp	1000
	Коэф.усл.Ki	100
	Постоянная времени ФНЧ, с	0.016
	Начальная рад. частота, 1/с	314
Генератор импульсов (3-ф/6 имп.)	Ширина импульсов, град.	150
	Опорное напряжение	AB-BC-CA
Управляемый тиристорный выпрямитель		
R в прямом направлении	0.01	

Блок трёхфазного напряжения	
Падение U в прямом направ.	0.7
Вид снаббера	R
R снаббера	1000000
Сглаживающий LC - фильтр	
Индуктивность L, мГн	1
Ёмкость C, мкФ	10

Осциллограмма LC – фильтра представлена на рисунке №2.1.

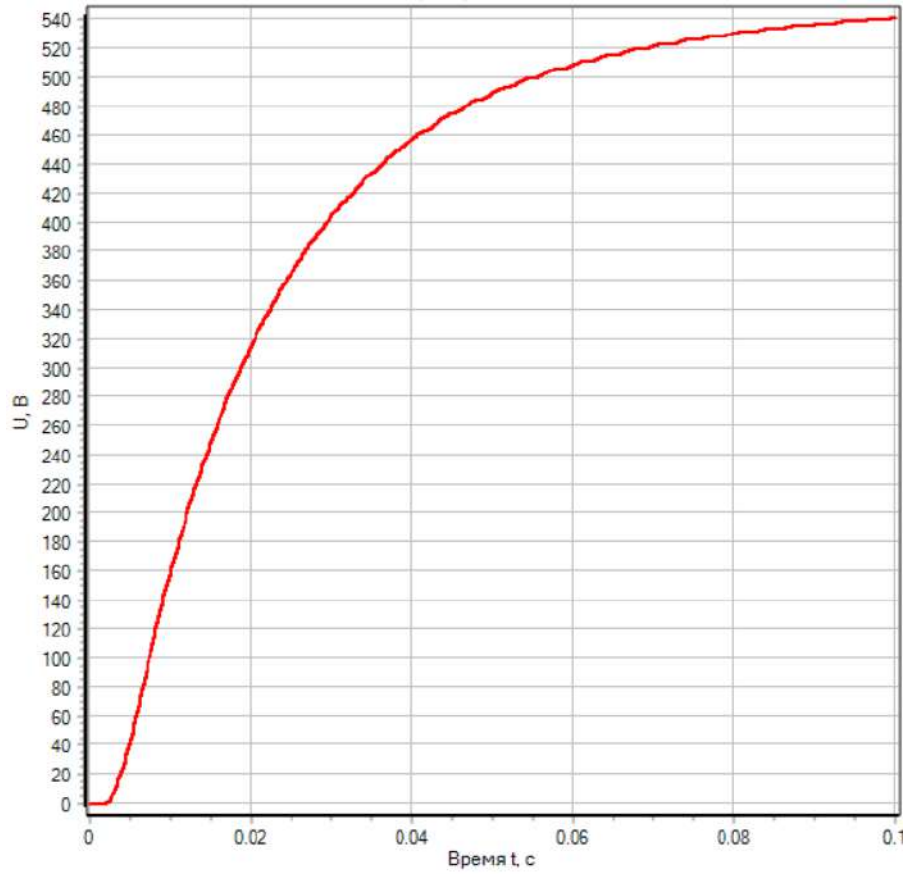


Рисунок 2.1. Осциллограмма сглаживающего LC – фильтра.

После блока ВИЭ рассмотрим блок энергосистемы, характеристики блока сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Характеристики блока энергосистемы.

Блок энергосистемы	
Напряжение, кВ	35
Полная мощность, МВА	1
Частота, Гц	50
Длина линии, км	100

После блока энергосистемы рассмотрим «Блоки силовых трансформаторов», изображение представлено на рисунке №3, характеристики блока сведены в таблицу 3.

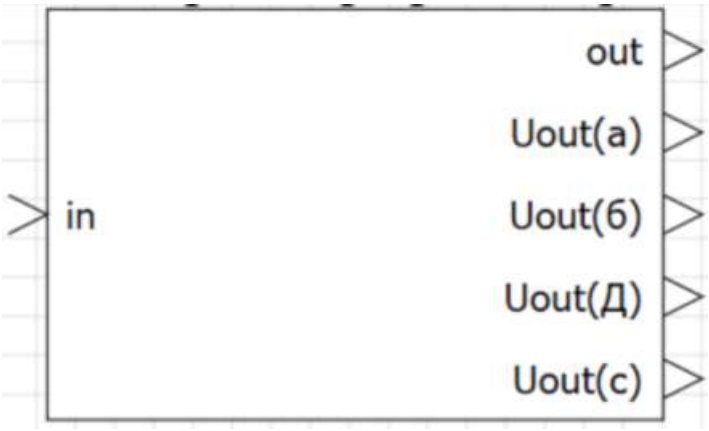


Рисунок 3. Блок силовых трансформаторов.

Таблица 3. Характеристики повышающего и понижающего трансформатора.

Повышающий и понижающий трансформаторов	
Мощность S, МВА	2,5
Напряжение ВН. кВ	35
Напряжение НН, кВ	0.4
Частота, Гц	50
Группа соединения обмоток	11

Далее рассмотрим блок высоковольтной кабельной линии, отходящей от ВИЭ и связывающей энергосистему и трёхфазную нагрузку, изображение блока представлено на рисунке №4, а строение блока на рисунке №4.1. Характеристики блока сведены в таблицу 4.

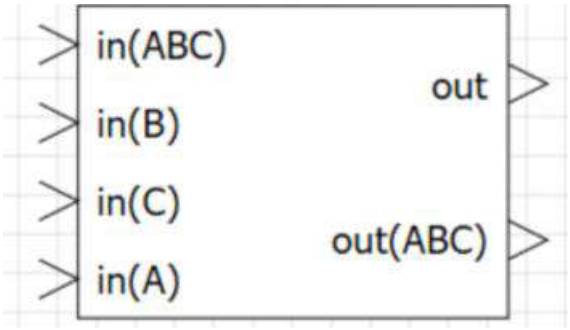


Рисунок 4. Блок высоковольтной кабельной линии.

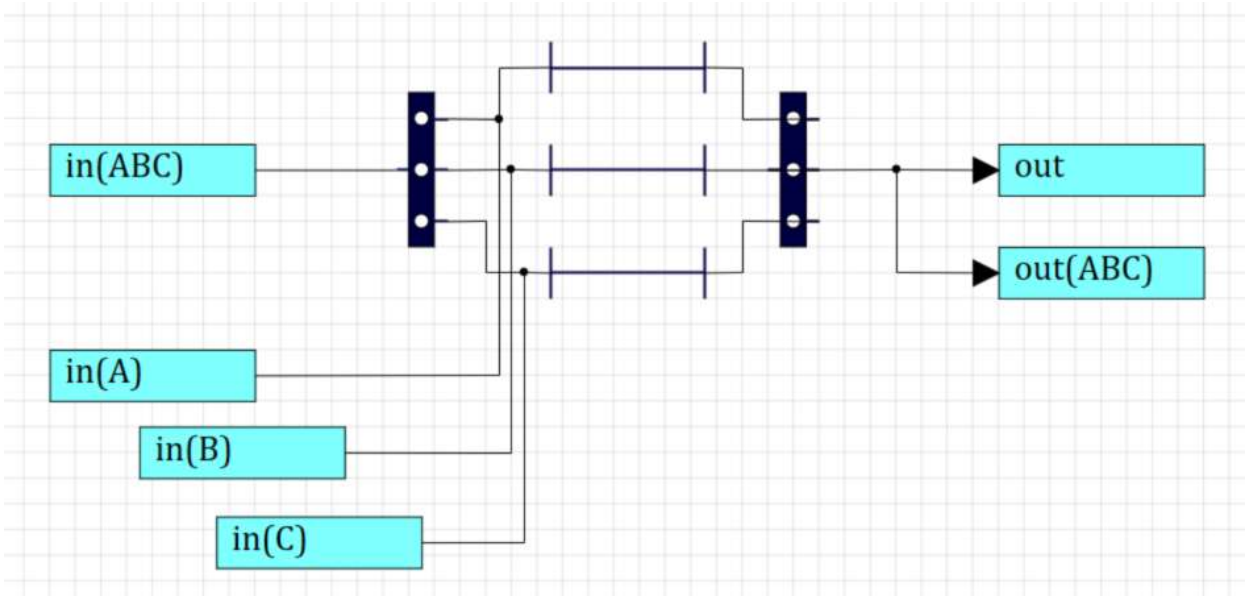


Рисунок 4.1. Строение блока.

Таблица 4. Характеристики высоковольтной кабельной линии.

Высоковольтная кабельная линия	
Длина линии, км	1,5
Номинальная частота, Гц	50
Удел.ёмкость., нФ/км	8,293
Удел.акт.сопр., Ом/км	0,121
Удел.индук, Гн/км	0,00327

Теперь рассмотрим «Блок трёхфазной нагрузки», характеристики блока сведены в таблицу 5, изображение блока представлено на рисунке №5, внутренне строение блока представлено на рисунке №5.1.



Рисунок 5. Блок трёхфазной нагрузки.

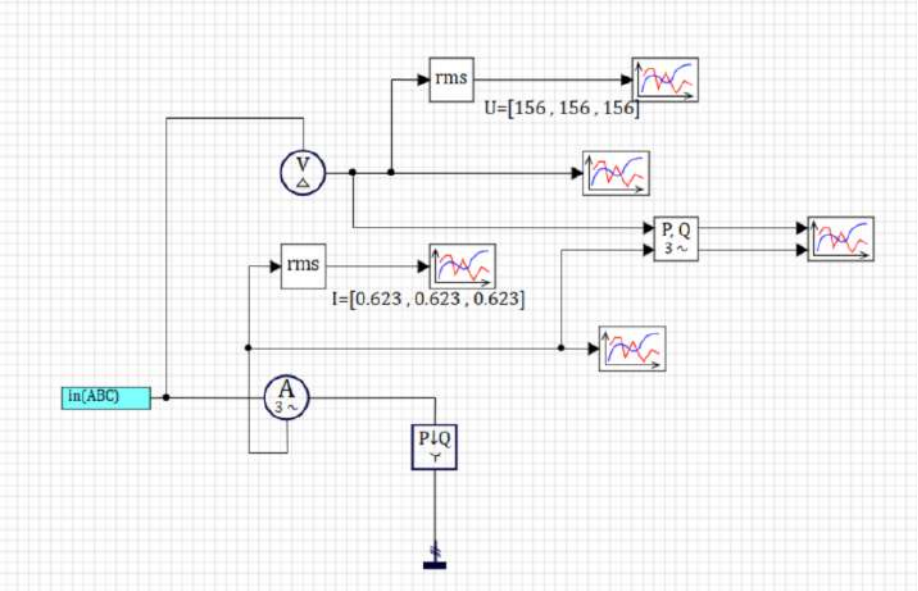


Рисунок 5.1. Строение блока.

Таблица 5. Характеристики блока трёхфазной нагрузки.

Трёхфазная нагрузка	
Напряжения, В	380
Номинальная частота, Гц	50
Мощность, кВт	100
Сопротивление, Ом	144
Индуктивность, Гн	95
Ёмкость, нФ	100

Следом за ним рассмотрим следующий блок в модели, является «Блок создания различного вида КЗ», строение блока изображено на рисунке №6, блок состоит из:

Приходящие шины (in(A, B, C)), предназначенные для коммутации с блоком высоковольтной кабельной линии,

Модули коммутаторы, они предназначены для создания разных видов КЗ,

Модулей заземляющих шин,

Ключей управления,

Модулей амперметра, предназначенного для отслеживания тока при КЗ,

Модулей среднеквадратического значения,

Модулей вывода осциллограмм.

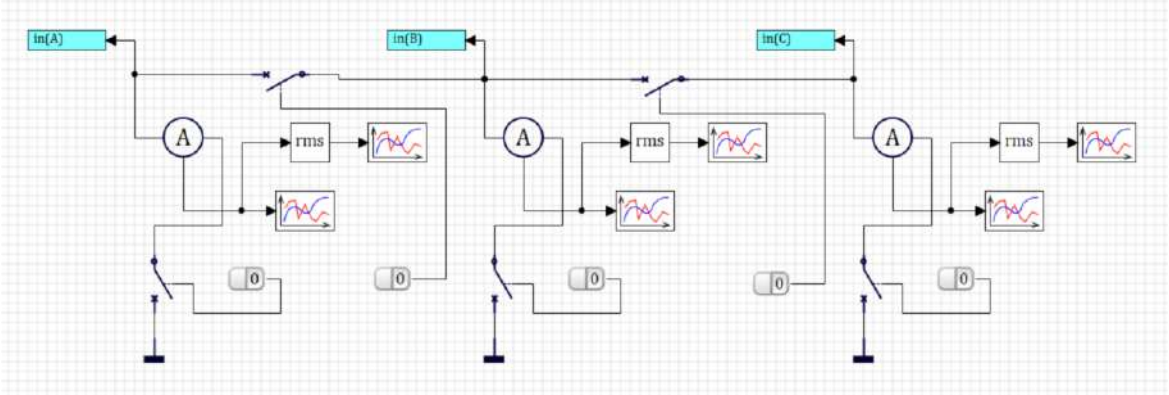


Рисунок 6. Строение блока создания различного вида КЗ.

Следом за ним рассмотрим «Блок управляемого инвертора», изображение которого представлено на рисунке №7.

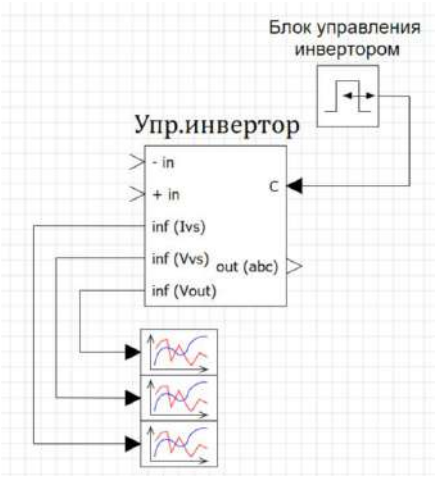


Рисунок 7. Блок управляемого инвертора.

Данный блок состоит из шести IGBT транзисторов, которые зашунтированы диодом, транзисторы соединяются по схеме моста Ларионова, для работы в трёхфазной сети, двух портов питания постоянным током, амперметров и вольтметров для снятия осциллограмм и показаний работы инвертора, шины подачи сигнала команд от генератора сигнала и шины выхода трёхфазного напряжения, внутреннее строение блока представлено на рисунке №7.1.

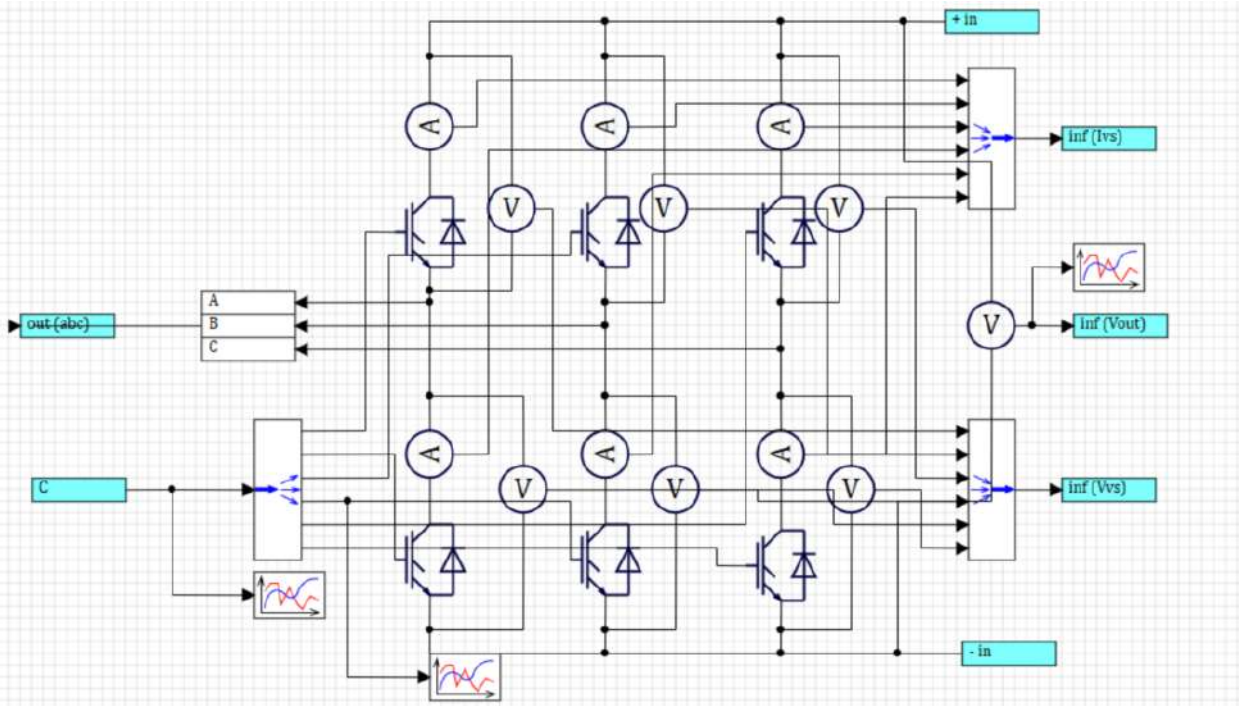


Рисунок 7.1. Строение блока.

Выходная осциллограмма работы управляемого трёхфазного инвертора представлена на рисунке №7.2.

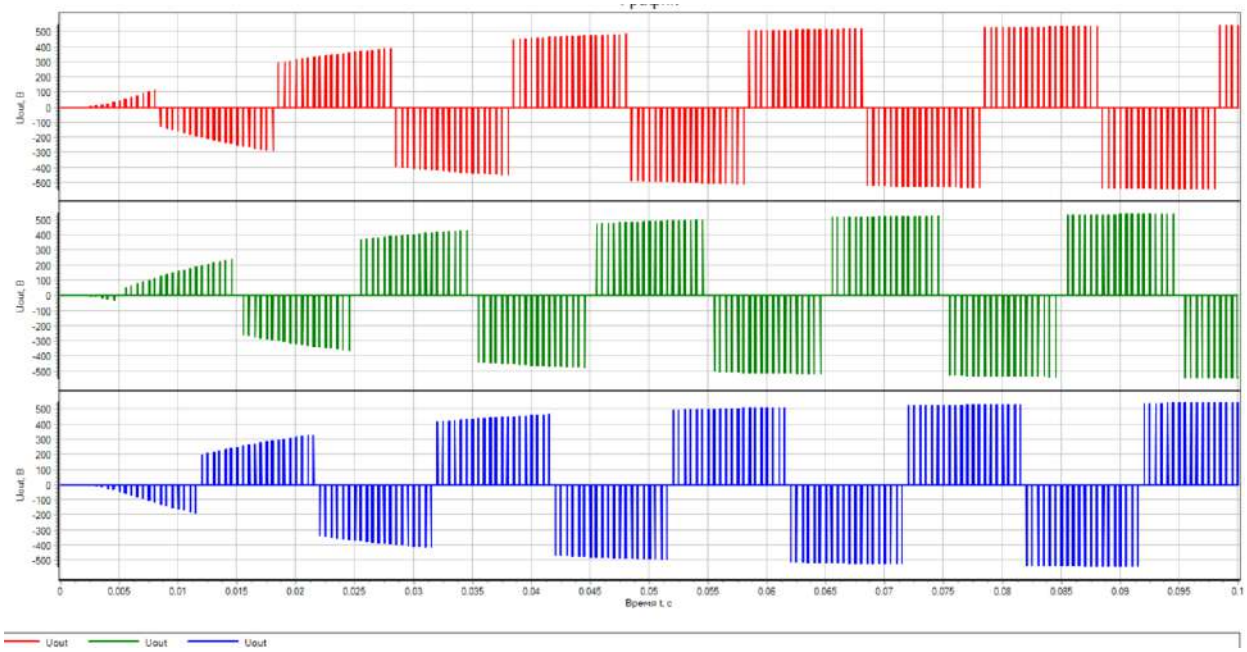


Рисунок 7.2. Осциллограмма работы управляемого инвертора.

Так же, если посмотреть на рисунок №7 помимо указанного блока имеется блок управления инвертором, кратко о нём, данный блок является трёхфазным ШИМ генератором, характеристики блока сведены в таблицу 6, также представлено осциллограмма работы ШИМ генератора на рисунке №7.3.

Таблица 6. Характеристики трёхфазного ШИМ генератора.

Трёхфазный ШИМ генератор	
Число фаз	3
Несущая частота, Гц	1000
Основная частота, Гц	50
Коэффициент заполнения	0.0 – 0.99
Фаза, град.	0

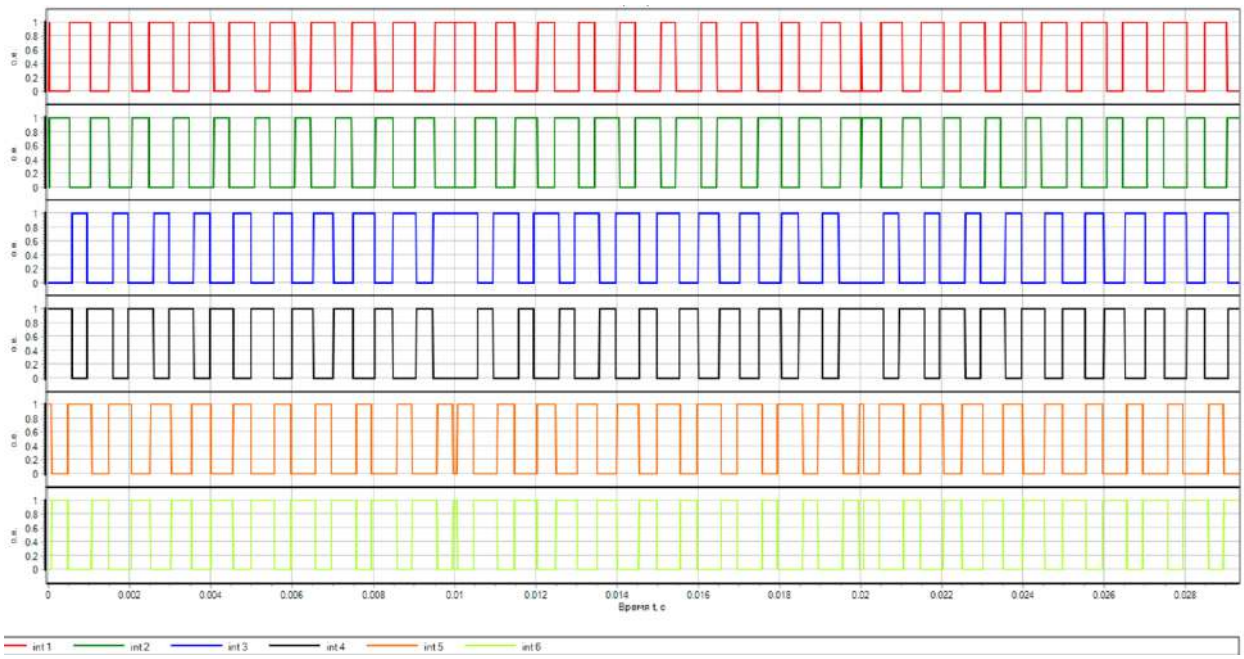


Рисунок 7.3. Осциллограмма работы ШИМ генератора.

Крайним блоком является «Блок сглаживания выходного напряжения с инвертора», изображение блока представлено на рисунке №8, а его строение и осциллограмма работы представлены на рисунке №8.1 и 8.2 соответственно. Характеристики блока сведены в таблицу №7.

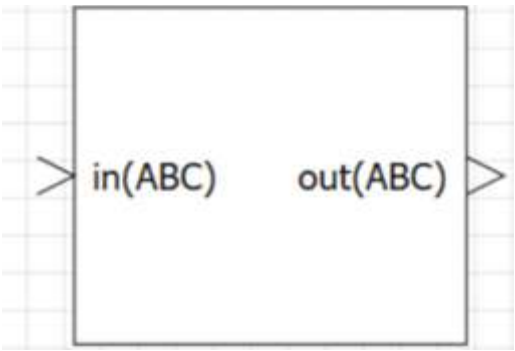


Рисунок 8. Блок сглаживания выходного напряжения с инвертора.

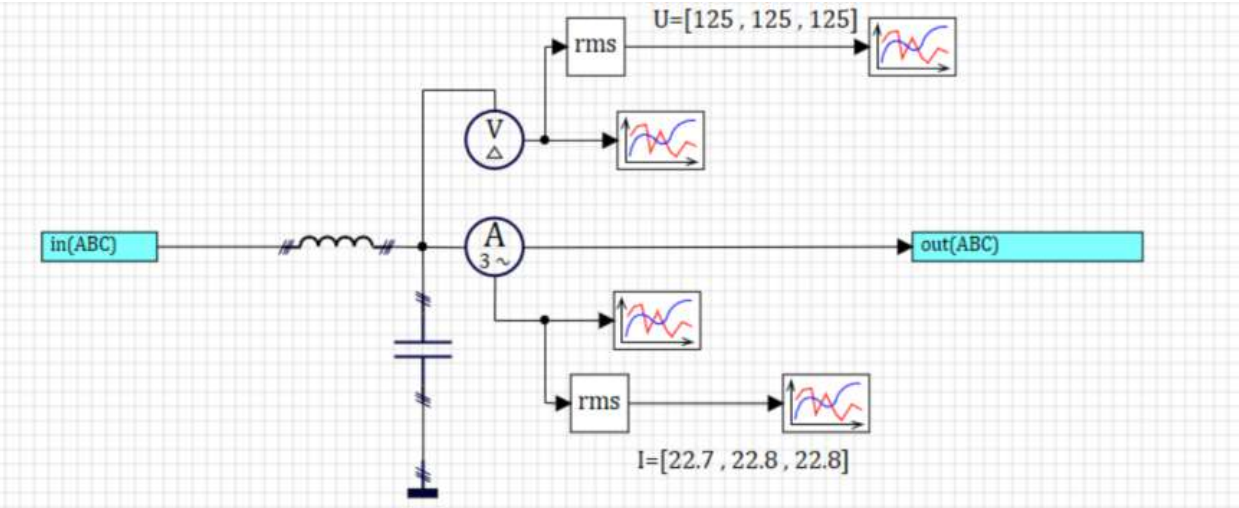


Рисунок 8.1. Строение блока.

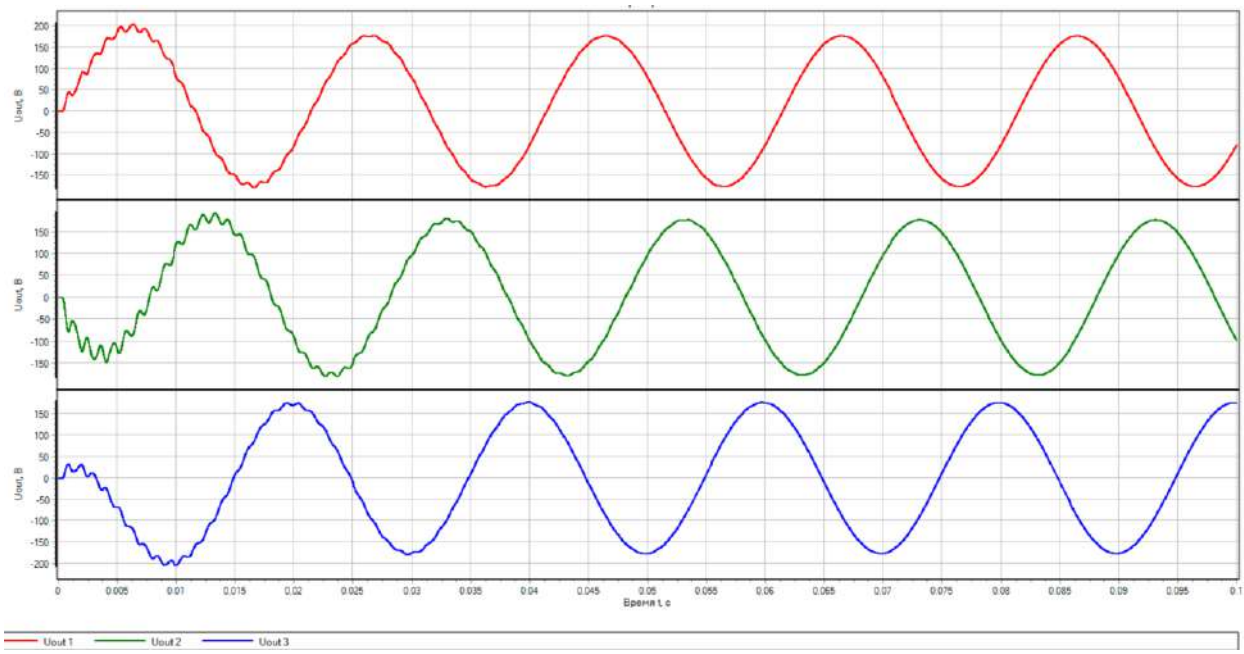


Рисунок 8.2. Осциллограмма работы сглаживающего LC – фильтра.

Таблица 7. Характеристики блока, сглаживающего выходное напряжения инвертора.

Трёхфазный LC - фильтра	
Ёмкость C, мкФ	9500
Индуктивность L, мГн	0.45

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андреев М.В., Суворов А.А., Аскаров А.Б., Киевец А.В., Рудник В.Е. Исследование влияния возобновляемых источников энергии на функционирование релейной защиты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. № 1. С. 32–37
2. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Белозёрова Е.А., Тунакова Ю.А., Кузнецова О.Н. Использование малой гидроэнергетики как экологичного и энергоэффективного альтернативного источника энергии // Вестник технологического университета. 2024. № 1. С. 32–37
3. Ефремов А.В., Ефремов В.А., Таныгин С.А., Смирнов С.Ю. Применение устройств РЗА линий электропередачи, отходящих от возобновляемых источников электроэнергии // Релейщик. 2024. № 1. С. 32–37
4. MathWorks. Wind Turbine [Электронный ресурс] // MathWorks Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html (дата обращения: 21.08.2026)
5. MathWorks. Large-scale wind farm modeling and simulation in MATLAB and Simulink [Электронный ресурс] // MathWorks Videos. URL: https://www.mathworks.com/videos/large-scale-wind-farm-modeling-and-simulation-in-matlab-and-simulink-81935.html (дата обращения: 12.09.2026)

Ivankov M.Ya.
master's degree student of 2nd year
Department of GGEES
Sayano-Shushensky Branch
Siberian Federal University
(Cheryomushki, Sayanogorsk, Russia)

Scientific advisor:
Litvinov I.I.
PhD in Engineering, Associate Professor
Department of GGEES
Sayano-Shushensky Branch
Siberian Federal University
(Cheryomushki, Sayanogorsk, Russia)

MODELING A BASIC POWER SYSTEM WITH A CONVERTER-CONTROLLED RENEWABLE ENERGY SOURCE IN SIMINTECH SOFTWARE

Abstract: *today, engineers designing power plants that use renewable energy sources face challenges in applying relay protection and automation devices. At wind farms, a converter is used to transform direct current into alternating current. This complex device not only converts current but also protects itself and the generating equipment. Its design presents a challenge because the converter is manufactured and programmed at the factory: only the manufacturer knows how its protection functions operate. This makes it impossible to develop a standardized device suitable for every renewable energy power plant.*

The overall analysis is expected to be conducted by an engineer with extensive experience in designing and analyzing existing converter configurations and protection schemes for renewable energy sources. Efforts are underway to develop a mathematical model of an offshore wind farm with a converter. The model is intended to characterize device behavior during power-system transients and support development of an operating algorithm for the device when short-circuit currents occur.

The study is relevant in view of the current pace of renewable energy power plant deployment and the need for a standardized converter suitable for a wider range of power plants.

Keywords: *renewable energy source, offshore wind farm, converter, relay protection, mathematical model, transient process, short-circuit current, protection algorithm, equipment standardization.*