

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение Электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка и исследование испытательного стенда для проверки инверторов солнечных электростанций на соответствие требованиям к работе при провалах напряжения УДК 621.341.572

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Латышева Елена Владимировна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общетехнических дисциплин	Куликова Ольга Александровна	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

по основной образовательной программе подготовки магистров

### 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	<i>Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.</i>	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ПК-31), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>	Требования ФГОС (ОК-8, ОК-9, ПК-14, ПК-19), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 36) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.</i>	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7,9). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P7	<i>Выполнять инженерные проекты с применением</i>	Требования ФГОС

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	(ПК-10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-14, 36, 39 –44). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-19, ПК-23, ПК-27, ПК-30, ПК-31, ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-45, ПК-46), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-15, ПК-47, ПК-48, ПК-49, ПК-50), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-28, ПК-33, ПК-40, ПК-41, ПК-44), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики  
 Отделение электроэнергетики и электротехники  
 Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Н.Л. Бацева  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич

Тема работы:

Разработка и исследование испытательного стенда для проверки инверторов солнечных электростанций на соответствие требованиям к работе при провалах напряжения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Дата 26.12.2018 № 11130/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Характеристики фотоэлектрической станции Guironne на о. Корсика  Документация используемых на фотоэлектрической станции инверторов SC500HE
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Анализ существующих сетевых кодексов; 2. Рассмотрение эмуляторов для формирования нужной характеристики провала напряжения; 3. Разработка и сборка тестового эмулятора; 4. Тестирование и анализ работы тестового эмулятора; 5. Расчёт и анализ работы эмулятора на примере конкретной фотоэлектрической электростанции; 6. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; 7. Раздел «Социальная ответственность».

<b>Перечень графического материала</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Схема эмулятора на основе инвертора</li> </ul>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Елена Владимировна
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
2. Сетевые кодексы	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	28.12.2018 г.
-------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Уровень образования магистратура  
 Период выполнения весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
------------------------------------------	--

Дата контроля	Название раздела/ вид работы	Максимальный балл раздела
01.02.2019	Поиск и анализ литературы по имеющимся решениям поставленной проблемы	15
01.03.2019	Проведение сравнения различных типов эмуляторов	5
10.03.2019	Моделирование эмулятора в программных комплексах	15
01.04.2019	Расчет тестового эмулятора	15
15.04.2019	Сборка тестового эмулятора	15
25.04.2019	Тестирование и анализ результатов	15
01.05.2019	Работа над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	5
15.05.2019	Работа над разделом «Социальная ответственность»	5
25.05.2019	Grid codes and their relevance	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н.		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа содержит 136 страниц, 59 рисунков, 21 таблицу, 39 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: Способность поддержания непрерывности электроснабжения при низком напряжении, LVRT способность, эмулятор, провалы напряжения, фотоэлектрическая станция, сетевые кодексы.

**Целью работы** является разработка и реализация эмулятора, способного генерировать в сети в непосредственной близости от фотоэлектрических электростанций провал напряжения заданной глубины и длительности для проверки на соответствие требованиям поддержания непрерывности электроснабжения при низком напряжении.

**Методологическая основа.** При работе над диссертацией использовались основные положения теории электрических машин и электрических сетей, методы математического моделирования, методы тестирования программного обеспечения в замкнутом контуре.

**Полученные результаты и их новизна.** В результате работы проанализированы различные сетевые кодексы и требования к LVRT характеристикам. Рассмотрены 4 типа эмуляторов, реализующих различные подходы к формированию провала напряжения, и проведено их сравнение. Три из рассмотренных эмуляторов смоделированы в программных комплексах для проверки их эффективности при создании нужной характеристики. Отобран эмулятор на основе делителя напряжения.

Для выбранного эмулятора создана уменьшенная тестовая система с фотоэлектрической системой номинальной мощностью 120 Вт и инвертором мощностью 250Вт. Описан процесс расчета всех параметров тестовой системы и её сборки.

С использованием осциллографа проведён ряд тестов указанной системы. Полученные результаты показали близкое совпадение результатов математического моделирования и натурного эксперимента. Тестируемый инвертор прошел проверку на соответствие встроенных защит LVRT

требованиям. Проведены тесты по контролю тока и напряжения в инверторе при провалах напряжения. На основании сравнения с идеальными характеристиками сделаны выводы об основных погрешностях и искажениях, которые вносит сам инвертор.

Произведен расчёт характеристик, и рассмотрены основные ограничения для применения эмулятора на существующих фотоэлектрических электростанциях большой мощности.

**Объектом исследования** являются режимы работы фотоэлектрических электростанций при провалах напряжения.

**Предметом исследования** является эмулятор провала напряжения в сети.

**Область применения.** Результаты работы могут применяться для создания мобильных эмуляторов для тестирования электростанций установленной мощности до десятков МВт.

**Степень внедрения.** Компания Électricité de France применяет полученные результаты для разработки собственного эмулятора.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Результаты сравнения эффективности различных типов эмуляторов.
- 2) Результаты разработки прототипа эмулятора.
- 3) Результаты испытаний эмулятора и его основные ограничения.



## **Определения, обозначения, сокращения**

В настоящей работе использованы следующие сокращения:

СЭС – солнечная электростанция

КЗ – короткое замыкание

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

LVRT - Low Voltage Ride Through, работа при провалах напряжения

СРГ – система распределенной генерации

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных

ВЭС – ветровая электростанция

ЗКЭ – запас кинетической энергии

ЭДС – электродвижущая сила

MPPT - Maximum Power Point Tracking, отслеживание точки максимальной мощности

ВАХ – вольт-амперная характеристика

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 55993 – 2014 «Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы».

ГОСТ Р МЭК 61727 - 2016 «Системы фотоэлектрические. Подключение к распределительным электрическим сетям».

ГОСТ 30804.4.30-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии».

ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

## Содержание

Введение.....	13
1. Сетевые кодексы и их актуальность .....	17
1.1. Описание объекта исследования .....	17
1.2. Требования сетевых кодексов.....	19
1.3. LVRT способность .....	26
1.4. Моделирование инвертора .....	31
2. Эмуляторы провала напряжения .....	33
2.1. Типы эмуляторов.....	33
2.2. Эмулятор на основе синхронного генератора.....	36
2.3. Эмулятор на основе инвертора (двухзвенного преобразователя) .....	41
2.4. Эмулятор на основе делителя напряжения .....	45
3. Сборка реального эмулятора.....	49
3.1. Описание установки .....	49
3.2. Расчёт элементов эмулятора .....	50
3.2.1. Сопротивление автотрансформатора.....	50
3.2.2. Расчёт сопротивлений эмулятора.....	54
3.2.3. Расчёт мощности солнечных панелей .....	56
3.3. Управление реле для переключения ветвей.....	58
4. Тестирование и анализ применения эмулятора .....	61
4.1. Сравнение результатов физического эксперимента и PSIM моделирования .....	61
4.2. Использование записывающего устройства .....	65
4.3. Анализ изменения напряжения в ходе эмуляции .....	68
4.4. Расчет пределов применения эмулятора относительно максимальных значений тока.....	70
4.5. Совместимость эмулятора с различными СЭС.....	73
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	78
5.1. Описание проекта и потенциальные потребители .....	79
5.2 Анализ конкурентных технических решений .....	80
5.3. SWOT-анализ.....	83

5.4. Организация и планирование работ .....	85
5.5. Расчет сметы затрат на исследование .....	88
5.6. Оценка экономической эффективности НИР .....	94
6. Социальная ответственность .....	98
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ....	98
6.2. Производственная безопасность .....	102
6.3. Экологическая безопасность.....	110
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	111
Заключение .....	115
Источники .....	116
Приложение А. Схема эмулятора на основе инвертора.....	121
Приложение Б. Расчёт величин сопротивлений эмулятора.....	122
Приложение В.....	123

## Введение

Производство электроэнергии традиционным способом приводит к значительным выбросам парниковых газов в атмосферу, которые существенно влияют на окружающую среду. При этом цены на энергоносители продолжают расти. В связи с этими проблемами все более актуальными становятся электростанции на основе возобновляемых источников энергии, особенно с учетом того факта, что себестоимость вырабатываемой ими электроэнергии существенно снизилась за последние пару десятилетий.

Среди возобновляемых источников энергии солнечная энергетика по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности одна из наиболее перспективных. Общее количество солнечной энергии, падающей на поверхность Земли за год, составляет величину около  $(7.5-10) \cdot 10^{17}$  кВт·ч [1], тогда как нынешнее потребление энергии всем человечеством всего около  $0,0015 \cdot 10^{17}$  кВт·ч в год. Развитие солнечной энергетике характеризуется высокими темпами – каждый год вводится примерно 30% новой генерации. Из них более 98% – фотоэлектрические электростанции, то есть электростанции, использующие фотоэлектрический эффект для генерации электроэнергии. Установленная на конец 2017 года мощность фотоэлектрических станций, по данным International Renewable Energy Agency, составляет 385,7 ГВт, тогда как суммарная мощность к концу 2016 года равнялась 296 ГВт[2].

Вместе с ростом количества солнечных электростанций (СЭС) и их доли в общем энергобалансе растут также и требования к надежности их работы. В частности разрабатываются специализированные стандарты – сетевые кодексы, одним из требований которых является необходимость для СЭС оставаться подключенными к сети в течение определенного времени даже при значительных провалах напряжения. На рисунке 1 изображена требуемая характеристика по стандартам Франции. Если текущее

напряжение в сети находится выше этой характеристики, СЭС должна оставаться подключенной к сети.

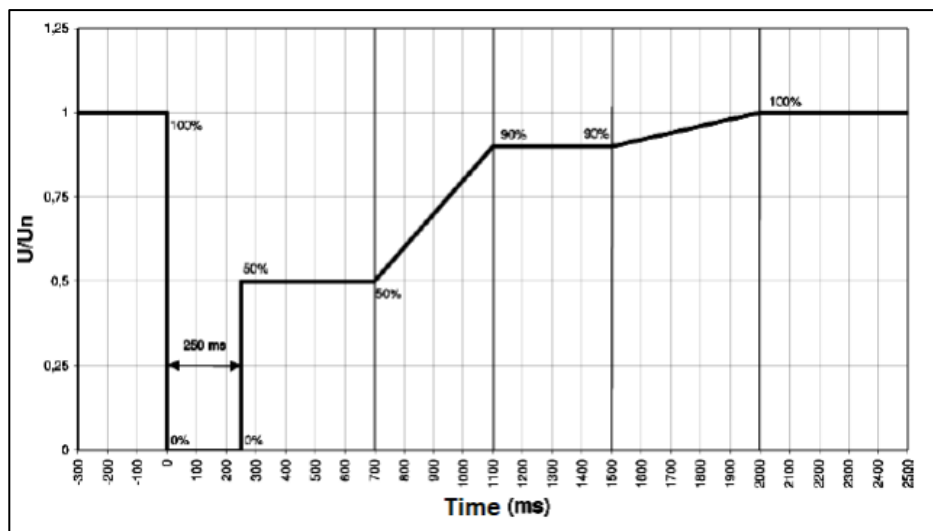


Рисунок 1 - Характеристика допустимого провала напряжения в сети, при котором СЭС должна продолжать параллельную с сетью работу

К сожалению, в данный момент далеко не вся защитная автоматика СЭС настроена в соответствии с этими стандартами, к тому же сами стандарты для СЭС совсем новые и продолжают редактироваться. В результате это может стать причиной последующего непреднамеренного отключения генерации СЭС, а в итоге и системной аварии. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо специальное испытательное оборудование, которое могло бы заранее оценить эффективность работы защитной автоматики фотоэлектрической электростанции на месте.

Таким образом, **целью** работы является разработка испытательного оборудования для проверки соответствия алгоритма работы защитной автоматики требованиям различных международных стандартов к работе при провалах напряжения в сети. А именно - сохранение подключения к сети в течение заданного времени при соответствующем уровне остаточного напряжения. Таким образом проверяется только поведение системы, в то

время как решение по обеспечению соответствия требованиям и изменение настроек защит не относятся к проблематике данной работы.

При этом оборудование должно позволять проводить испытания солнечных электростанций различной мощности, а также моделировать LVRT характеристики различной формы. Очень важным требованием является необходимость обеспечить мобильность испытательного оборудования, для возможности применения его на различных фотоэлектрических электростанциях.

Согласно вышеуказанным требованиям основными **задачами** для достижения поставленной цели являются:

- 1) Рассмотрение существующих требований по подключению и параллельной работе электростанций с сетью.
- 2) Рассмотрение нескольких типов эмуляторов, реализующих различные подходы к формированию провала напряжения.
- 3) Моделирование отобранных эмуляторов в программных комплексах и проверка их работы. Выбор наиболее подходящего варианта.
- 4) Разработка и создание уменьшенного прототипа выбранного эмулятора, его тестирование.
- 5) Расчет параметров для полноразмерного эмулятора. Исследование возможности его применения на СЭС различных конфигураций.

Часть работ проводилась в лабораториях Institute polytechnic de Grenoble, при работе использовались программные продукты Mathcad 14, Microsoft office, Adobe Photoshop SC4, PSIM, Matlab 15 и Matlab Simulink.

Студентом лично проведен литературный обзор российских и зарубежных документов по тематике исследования и, в частности, по работе электростанций при провалах напряжения. Обосновано применение мобильных эмуляторов провала напряжения. Смоделирован инвертор фотоэлектрической электростанции в программном комплексе Matlab Simulink.

Лично исследованы и рассчитаны 2 вида эмуляторов провала напряжения. Совместно с коллегами в лаборатории рассмотрены еще 2 вида. Осуществлено их моделирование в программной среде Matlab Simulink и выполнен анализ полученных результатов. Отобран наиболее подходящий под требования технического задания куратора вариант эмулятора на основе делителя напряжения.

Студентом выполнен расчет элементов конструкции для прототипа эмулятора, проведены эксперименты по определению параметров элементов тестовой системы – автотрансформатора и солнечных панелей. В программе Mathcad осуществлен расчет систем уравнений, описывающих предельные значения длительного допустимого тока для эмулятора при различных уровнях напряжения и мощности. Студентом произведена сборка схемы для контроля реле и тестовой модели эмулятора. Совместно с коллегами проведены эксперименты по исследованию работы эмулятора в различных режимах и изучено соответствующее поведение инвертора.



## 1. Сетевые кодексы и их актуальность

### 1.1. Описание объекта исследования

Работа проводилась на примере фотоэлектрической СЭС мощностью 4000 кВА, принадлежащей компании Électricité de France (EDF), расположенной на острове Корсика. СЭС состоит из 8 блоков по 500 кВА, каждый со своим инвертором. На выходе каждого инвертора напряжение 400В. Вся СЭС подключена к сети через повышающий трансформатор 0,4/20 кВ.

Корсика является четвертым по размеру островом, находящимся в Средиземном море, а также одним из регионов Франции. Население острова – 330 тыс. человек [3]. Снижения частоты и напряжения происходят на островах чаще, чем на материке, так как они могут работать в изолированном от общей сети режиме. До частичного электрического соединения с Сардинией в 1992 г. в Корсике ежегодно происходило более 200 инцидентов, когда частота падала ниже 46 Гц. [4]. В последние годы на Корсике растёт мощность возобновляемых источников энергии, в первую очередь СЭС, доля которых в общем энергобалансе становится существенной (Рисунок 2).

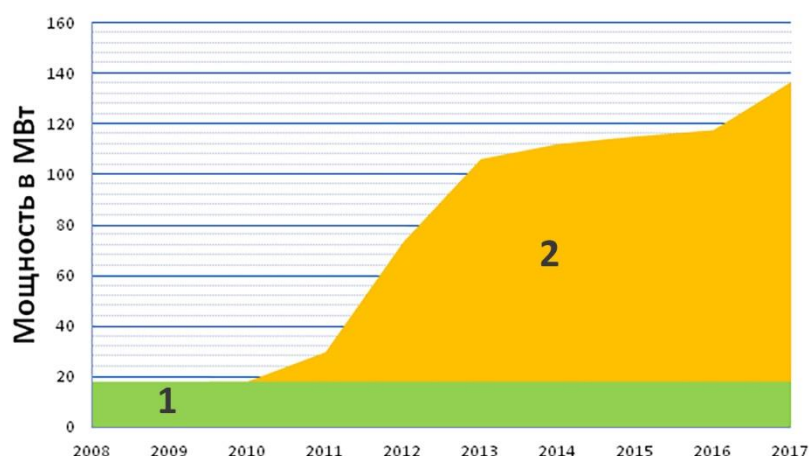


Рисунок 2 – Установленная мощность ветряных (1) и солнечных (2) электростанций на о. Корсика по годам

В связи с этим, отсутствие учёта специфики работы данного вида генерации может привести к серьёзным аварийным ситуациям. Кроме того,

из-за инверторного соединения солнечные станции не имеют обратной связи между частотой системы и собственным запасами кинетической энергии. В итоге устойчивость работы всей системы снижается. Ранее солнечные электростанции (до введения специальных требований в сетевых кодексах) отключались автоматикой сразу при значительном снижении частоты или напряжения системы, так как не могли оставаться в синхронизме с сетью [5].

27 апреля 2018 года во Франции на о. Корсика на линии 50кВ произошло трехфазное короткое замыкание, в результате которого напряжение упало до 50%. В результате провала напряжения половина СЭС, входящих в данную сеть, были отключены от сети, что не соответствовало LVRT характеристике из стандартов (ни одна станция не должна была отключиться в течение этого переходного процесса). Это привело к падению частоты в сети до уровня 48,55 Гц (рисунок 3). За счет применения автоматической частотной разгрузки частоту удалось восстановить, но как следствие, часть потребителей было временно отключено от электроснабжения. Данный пример наглядно показывает актуальность проверки соответствия защитных автоматов требованиям сетевых кодексов.

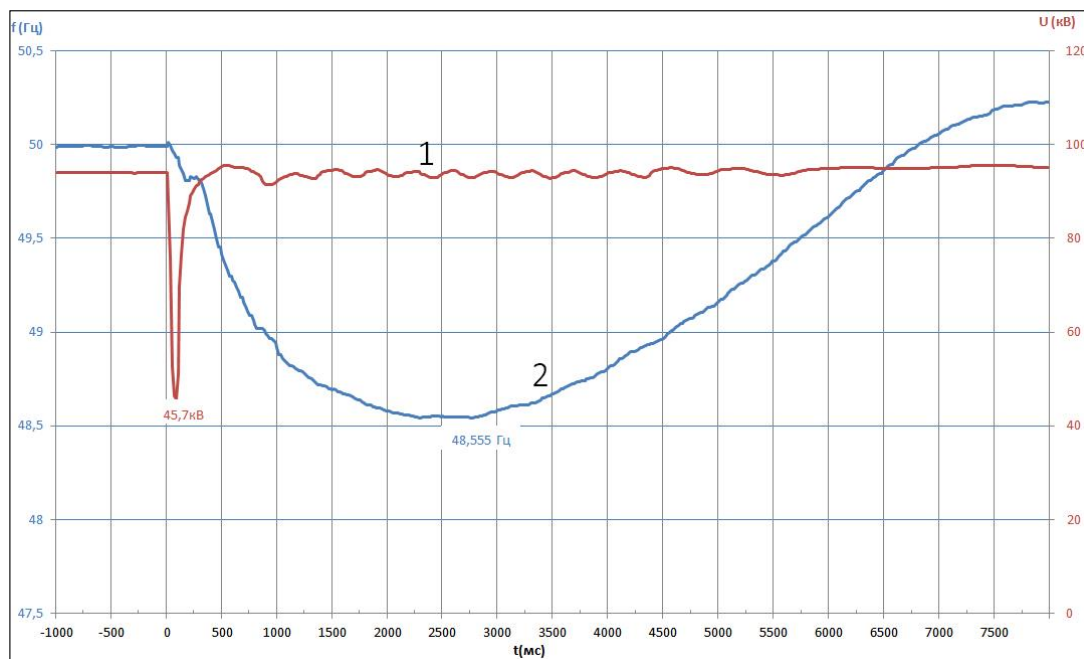


Рисунок 3 – Напряжение (линия 1) и частота (линия 2) 27.04.2018,

16:44

## 1.2. Требования сетевых кодексов

Сетевой кодекс – нормативный документ, содержащий требования ко всем участникам рынка по подключению к электрической сети, а также поддержанию её надежности, устойчивости и безопасности. Документ обычно разрабатывается сетевым/системным оператором, а затем утверждается органом регулирования электроэнергетики, представляющим правительство страны [6]. Рассмотрим несколько вариантов сетевых кодексов на примере компаний Канады.

Manitoba Hydro – электроэнергетическая и газовая компания, имеющая 15 электростанций, большинство из них – гидроэлектростанции [7]. Компания определяет 5 типов присоединения систем распределенной генерации (СРГ)[8]:

Тип 0 – непараллельная работа. При этом типе соединения используется переключатель для подключения резервного генератора к существующей нагрузке.

Тип 1 – кратковременный переход (<100мс). Этот тип соединения использует переключатель, который кратковременно подключает резервный генератор к сети. Обычно используется для проверки резервных генераторов.

Тип 2 – смещение нагрузки (сглаживание пикового потребления). СРГ работает параллельно с сетью для целей частичного покрытия локальной нагрузки. Мощность СРГ меньше, чем нагрузка, при этом запрещена работа в режиме обратного перетока в сторону сети. В основном использоваться только в периоды пиковой нагрузки.

Тип 3 – смещение нагрузки и экспорт. Аналогичен типу 2, но также можно генерировать мощность непосредственно в сеть. Manitoba Hydro покупает данную электроэнергию по заявленным тарифам. Обязательно наличие двунаправленного счетчика электроэнергии.

Тип 4 – только экспорт. Данные СРГ предназначены только для экспорта вырабатываемой электроэнергии в общую сеть.

Компания разрешает подключение к сети СРГ с мощностью до 10 МВт и напряжением до 50 кВ. При этом компания оставляет за собой право ограничивать максимальную возможную мощность ниже 10 МВт, если это необходимо по условиям устойчивости и безопасности.

В распределительной сети Manitoba Hydro действуют следующие ограничения:

- 1) Поддержание напряжения в пределах  $\pm 6\%$  от заданного уровня.
- 2) Частота должна соответствовать 60 Гц с отклонением не более  $\pm 0,2$  Гц. Если в результате аварии происходит отключение линии, в течение 10 секунд допускается максимальное отклонение частоты в пределах от -2 до +3,5 Гц
- 3) Максимальный небаланс напряжения в трехфазной сети может достигать 5% в сельской местности и 4% в городской.

Собственник СРГ перед подключением к распределительной сети должен предоставить Manitoba Hydro следующую информацию:

- Тип генератора и используемое топливо
- Заявленные полную и активную мощность
- Уровень напряжения для присоединения
- Тип присоединения

Если СРГ удовлетворяет требования по данным пунктам, то Manitoba Hydro также запрашивает:

- Схемы СРГ
- Мощность короткого замыкания и импеданс
- Подробное описание схемы защиты
- Предполагаемые испытания при вводе в эксплуатацию

На основе данной информации Manitoba Hydro принимает решение о возможности подключения.

Manitoba Hydro устанавливает следующие технические требования для присоединения к распределительной сети:

1) Генерируемая СРГ электроэнергия должна соответствовать определенным нормам качества. К ним относятся ограничения на следующие характеристики:

- Гармоники и фликер согласно документу PQS2000- 01 [9]
- Возможность регулирования напряжения и коэффициента мощности на заданном уровне (как для синхронных генераторов, так и для инверторов в случае СЭС)
- Небаланс напряжения
- Резонанс и самовозбуждение – должны быть учтены все основные возможные типы

Для СРГ на базе синхронных генераторов большой мощности также может требоваться наличие системы регулирования скорости.

2) СРГ должны быть оснащены соответствующей защитой в случае аварийных режимов, сопровождающихся большими отклонениями напряжений, токов и частоты от номинальных.

К проектируемой системе релейной защиты СРГ предъявляются требования реагировать как на изменения режима внутри самой СРГ, так и в сети, к которой будет выполнено подключение.

Для типов присоединения 3 и 4 обязательно наличие как минимум защит, реагирующих на:

- Пониженное напряжение (мгновенное срабатывание при  $V \leq 50\%$ )
- Повышенное напряжение (мгновенное срабатывание при  $V \geq 120\%$ )

- Пониженную частоту (мгновенное срабатывание при  $f \leq 58$  Гц)
- Повышенную частоту (мгновенное срабатывание при  $f \geq 63,5$  Гц)
- Повышенный ток

Для всех типов присоединений должны устанавливаться защиты:

- Реагирующие на замыкание между фазами
- Реагирующие на замыкание между фазой и землей
- Отключающие СРГ от сети при обесточивании сети другими защитами (предотвращающие образование «островов»)

3) Перед подключением СРГ к сети обязательна синхронизация. Схема синхронизации должна быть согласована с Manitoba Hydro. Подключение запрещено, если частота, напряжение или фаза в сети и СРГ отличаются от нормальных значений больше, чем указано в таблице 1.

Таблица 1 – Допустимые пределы отклонений

Мощность генерации	Разность частоты	Разность напряжений	Разность фаз
0 – 500 кВА	0,3 Гц	10%	20°
500-1500 кВА	0,2 Гц	5%	15°
>1500 кВА	0,1 Гц	3%	10°

Для индукционных генераторов и СРГ с инверторами синхронизация не требуется.

4) В некоторых случаях в зависимости от расположения и мощности СРГ может потребоваться система мониторинга, предоставляющая информацию в реальном времени Manitoba Hydro, а именно: сигналы срабатывания защит, значения фактической мощности, напряжения и тока.

Если установлено, что СРГ может оказывать существенное влияние на распределительную сеть Manitoba Hydro, то предъявляются дополнительные требования к составу информации, передаваемой собственником СРГ

посредством SCADA (почасовые значения МВт·ч и МВар·ч, мгновенные значения МВт и МВар, температура и т.д.).

5) СРГ должна удовлетворять требования электромагнитной совместимости согласно IEEE C37.90.2.

6) Ёмкости аккумулирующих устройств должно быть достаточно, чтобы обеспечить как минимум 10 минут бесперебойной работы релейной защиты при потере питания.

Запрещено подключать к сети напрямую источники постоянного тока.

7) В случае использования собственного трансформатора, его характеристики также должны быть согласованы с компанией, обязательно наличие заземления, а также всех необходимых типов релейной защиты.

Перед подключением к сети кроме необходимости предоставления всей документации компанией может проводиться ряд тестов:

- Температурная стабильность
- Реагирование на повышенную и пониженную частоту
- Реагирование на повышенное и пониженное напряжение
- Тест на синхронизацию
- Тест на антиобразование непреднамеренных изолированных участков сети
- Реагирование на потерю одной фазы
- Тест на гармоники
- Тест на автоматическое повторное включение после срабатывания защиты
- Проверка работы разъединителей

Также необходимо обеспечивать соответствующее техническое обслуживание согласно Rule 2- 300 of the Canadian Electrical Code и согласовать любую модификацию непосредственно с компанией.

BC Hydro – другая компания Канады, обслуживающая 1,9 млн. потребителей[10].

Большинство требований к подключению СРГ к их распределительной сети (до 35кВ) аналогичны Manitoba Hydro. К основным отличиям требований от предыдущей компании, которые прописаны в ее регламенте, можно отнести следующие пункты [11]:

1) Отдельно рассмотрен выбор точки подключения к сети BC Hydro. В распределительной сети они выделяют две категории:

- Подключение к линии, от которой уже питаются другие потребители. Может происходить как на линии первичного напряжения (от 4,16 до 35кВ), так и вторичного (до 600В).

- Подключение к распределительной шине через линию первичного напряжения, не имеющей других потребителей

Обслуживание линии от точки подключения до СРГ выполняет собственник СРГ. Также необходима минимальная защита линии – плавкий предохранитель или реклоузер.

В зависимости от результатов, полученных в каждом конкретном случае, компания решает, разрешено ли осуществлять подключение в запрашиваемой точке.

2) Стандартная максимальная мощность подключаемых индукционных генераторов должна быть ограничена 500кВА. Они также должны быть способны изменять коэффициент мощности в пределах 90%. Так как для индукционного генератора нет возможности регулировать реактивную мощность, необходима дополнительная установка шунтирующих конденсаторов

3) Возможно подключение синхронных генераторов мощностью свыше 10МВА, но с условием размещения оператора, который будет способен в течение 5 минут отреагировать на запрос BC Hydro и отрегулировать напряжение и мощность согласно требованиям.



Системам такой мощности также необходимо оставаться в работе не менее 30 секунд при напряжения на выводах от 0,7 о.е. до 1,2 о.е. и не менее 30 минут при напряжении от 0,9 о.е. до 1,1 о.е. Система возбуждения для них должна обеспечивать регулирование 95% от разности напряжений между номинальным уровнем и максимально возможным за время 0,1с или менее.

4) Тесты на соответствие требованиям проводятся собственником СРГ, но ВС Hydro может предоставить своего представителя, который имеет право засвидетельствовать каждый из них. Обязательной частью является тестовая параллельная работа с сетью на протяжении 72 часов с минимальным коэффициентом мощности.

5) С увеличением мощности синхронных генераторов возрастают важность требований оставаться в работе для устойчивости и гашения колебаний частоты и напряжения. ВС Hydro индивидуально высылает требования для СРГ большой мощности с минимальными уставками реле для пониженной и повышенной частоты. Стандартные требования по уставкам для аномальных значений частоты и напряжения указаны в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 - Уставки для повышенной и пониженной частоты

Пониженная частота, Гц	Повышенная частота, Гц	Минимальное время уставки
60.0-59.5	60.0-60.5	Продолжительный режим
59.4-58.5	60.6-61.5	3 мин.
58.4-57.9	61.6-61.7	30 с.
57.8-57.4		7,5 с.
57.3-56.9		45 циклов
56.8-56.5		7,2 цикла
меньше 56.4	больше 61,7	мгновенно

Таблица 3 - Уставки для повышенного и пониженного напряжения

Отношение напряжения к номинальному	Минимальное время уставки, с
$V < 50\%$	0,16
$50\% < V < 90\%$	2
$90\% < V < 106\%$	Продолжительный режим работы
$106\% < V < 120\%$	1
$V \geq 120\%$	0,16

### 1.3. LVRT способность

Из рассмотренных выше примеров становится понятным, что подключение генерации к сети – сложный и трудоемкий процесс по выполнению всех требований и нормативов, устанавливаемых сетевым/системным оператором.

Введенные сетевые кодексы описывают требования работы при отклонениях напряжения, частоты, требования к регулированию активной и реактивной мощности и многое другое. Важной частью этих кодексов являются требования к длительности параллельной работы с сетью при провалах напряжения - (англ. Low Voltage Ride Through - LVRT) [12]. Примеры таких норм приведены в требованиях ВС Hydro (таблица 3). Для дальнейшего использования введем терминологию согласно ГОСТ 30804.4.30-2013.

Провал напряжения характеризуется следующими основными величинами: глубиной провала напряжения, остаточным напряжением и длительностью провала.

Глубина провала напряжения – величина, равная разности между опорным напряжением (за опорное обычно принимают номинальное напряжение сети или напряжение согласно договорным условиям) и остаточным напряжением, выраженная, как правило, в процентах к опорному напряжению.

Остаточное напряжение – наименьшее из значений, измеренных в течение провала напряжения.

Длительность провала напряжения вычисляется как разность между окончанием и началом провала напряжения.

Требования к работе при провалах напряжения указаны в ГОСТ Р МЭК 61727-2016, который регулирует подключение фотоэлектрических СЭС к распределительным электрическим сетям на территории РФ. Согласно данному стандарту, фотоэлектрические электростанции могут оставаться подключенными к электrorаспределительной сети, если величины напряжений не выходят за рамки диапазонов, приведенных в таблице 4. Данное требование применяется и к однофазным, и к трехфазным сетям.

Таблица 4. Уставки для фотоэлектрических электростанций при аномальном уровне напряжения

Отношение напряжения к номинальному	Время уставки, с
$V < 50\%$	0,1
$50\% \leq V < 85\%$	2
$85\% \leq V \leq 110\%$	Непрерывный режим работы
$110\% < V < 135\%$	2
$V \geq 135\%$	0,05

Отклонение определяется по среднеквадратичным значениям напряжения, измеренным в точке подключения к распределительной сети. При этом требуется учитывать падение напряжения на участке между точкой подключения и выводами инвертора.

После отключения СЭС от распределительной сети, ее подсистема управления должна оставаться подключенной к сети для контроля ее параметров и обеспечения возможности повторного подключения.

Провалы напряжения могут возникать, например, при коротких замыканиях (КЗ) или небалансе реактивной мощности. Ранее

электростанциям на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволялось отключаться от сети, а затем подключаться вновь через некоторое время после устранения аварии. В случаях, когда суммарная установленная мощность СЭС составляет существенную долю в энергобалансе, применение подобных послаблений уже недопустимо, так как единовременное отключение генерации еще больше усугубляет режим сети. Кроме требования оставаться подключенными к сети, многие сетевые кодексы предписывают электростанции дополнительно поддерживать сеть в течение аварийного режима, питая ее реактивным током, чтобы поднять напряжение [12].

Перед подключением новой электростанции к сети системный оператор требует специальный сертификат, одним из требований для получения которого является проверка на LVRT способность. Данный тест проводится, как правило, независимой сертифицированной лабораторией, но обычно не для каждой электростанции, а только для одного прототипа данной серии. Однако в ряде случаев инверторы для СЭС не тестируют на LVRT способность. В связи с этим для проверки адекватного поведения защитной автоматики на уже работающей станции используют специальные мобильные трейлеры-эмуляторы [12].

Проверку на LVRT способность могут проводить согласно различным стандартам:

- IEC 61400-21 (Франция)
- FGW TR3 (Германия)
- The Grid Code (Великобритания),
- PO 12.3 and PO 12.2 draft (Испания)
- CEA Connectivity Standards 2013 (Индия)

Для последнего, к примеру, предписано, что ветровые электростанции (ВЭС) при напряжениях сети 66кВ и выше должны оставаться работе, если характеристика напряжения не ниже той, что указана на рисунке 4 [13] .

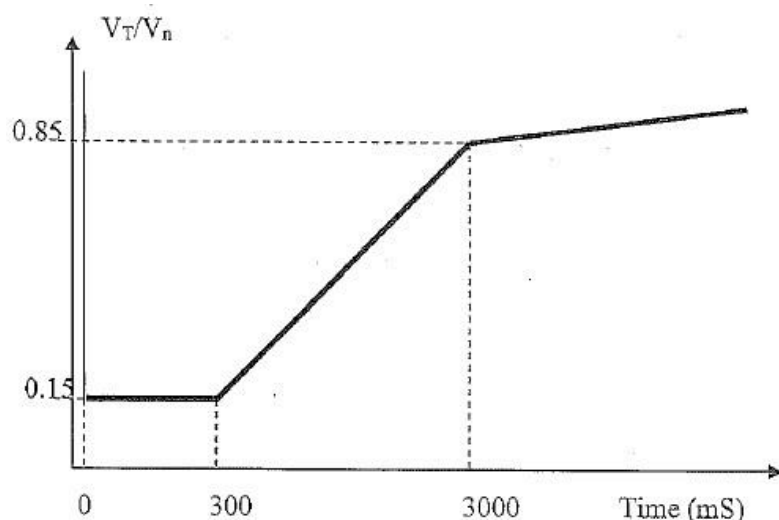


Рисунок 4 – Максимально допустимые провалы напряжения и промежутки времени, указанные в СЕА 2013

Где  $V_T$  – фактическое напряжение в сети в точке присоединения,  
 $V_n$  – номинальное напряжение в сети в точке присоединения.

При этом в течение провала напряжения в сети, ВЭС должны генерировать активную мощность пропорционально остаточному напряжению, а также максимизировать подпитку реактивным током в течение 300 мс или менее, если напряжение восстановится быстрее[13].

Для международного кодекса IEC 61400-21 дополнительно указаны также требования к минимально допустимому диапазону регулирования реактивной мощности, которые напрямую влияют на возможность поддержки сети при провалах напряжения (Рисунок 5) [14].

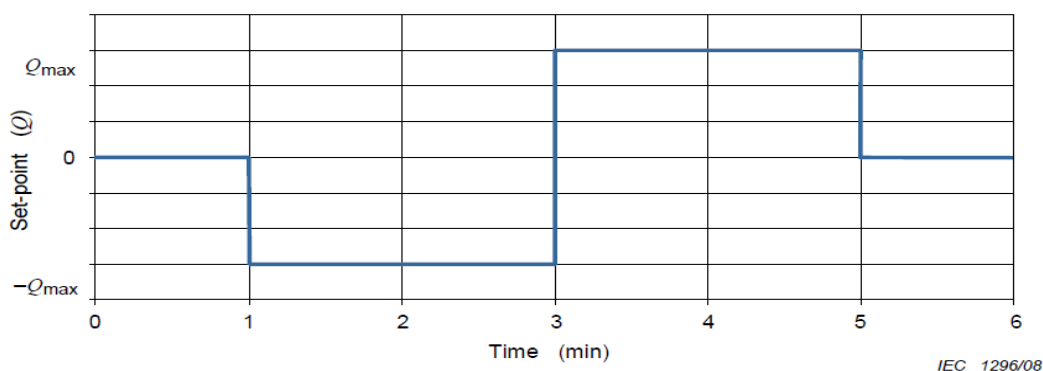


Рисунок 5 – Допустимые пределы регулирования реактивной мощности

Аналогичные требования к СЭС в различных странах и кодексах только начинают вводиться, и это происходит на несколько лет позже, чем для ВЭС. Связано это с несколькими причинами.

В первую очередь, солнечная энергетика ранее развивалась медленнее, чем ветровая, и только в 2016 году в первый раз суммарный объем новых установленных мощностей за год у солнечной энергетике превысил ветровую, а в 2017 году их суммарный разрыв еще больше сократился в пользу солнечной энергетике [2]. Поэтому с ростом доли солнечной энергетике начала расти и актуальность дополнительных требований к СЭС.

Другая проблема СЭС заключается в том, что в отличие от некоторых ВЭС у них отсутствуют запасы кинетической энергии (ЗКЭ). ЗКЭ являются быстродействующим резервом мощности, который позволяет обеспечить устойчивость работы системы до того, как начнут реагировать первичные регуляторы частоты и активной мощности. ВЭС без инверторных соединений обладают инерционным откликом, то есть способностью увеличивать мощность машины в первые секунды переходного режима. Для СЭС в последние годы эту проблему решили введением контроллера виртуальной инерции. В случае внезапного роста нагрузки или потери генерирующих мощностей мощность СЭС для обеспечения инерционного отклика изменяется в рамках оперативного резерва на загрузку станции (Рисунок 6) [5]. Одним из основных параметров для определения величины инерционного отклика является коэффициент виртуальной инерции  $k_{ви}$ , который выступает в качестве пропорционального звена в структуре контроллера.

Благодаря контроллеру виртуальной инерции для СЭС уже нет необходимости отключаться в первые моменты после нарушения устойчивости.

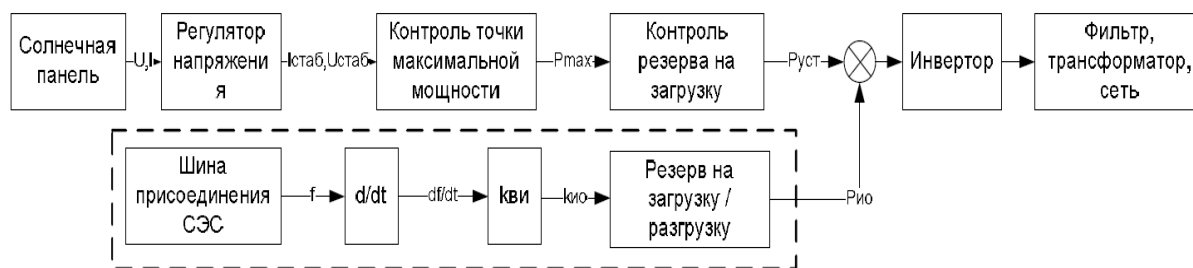


Рисунок 6 – Схема контроллера виртуальной инерции для управления СЭС

В связи с приведенными выше причинами видится обоснованным введение требований к работе СЭС в аварийных режимах, в первую очередь LVRT способность. И именно поэтому необходимы мобильные трейлеры-эмуляторы, так как на большинстве уже введенных в эксплуатацию СЭС данные требования ранее не предусматривались.

#### 1.4. Моделирование инвертора

Инверторы СЭС имеют трехфазное подключение и способны как выдавать, так и поглощать реактивную мощность в режиме генерации активной мощности в сеть. Это возможно благодаря схемам управления на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которые обеспечивают синхронизацию по времени трех ветвей инвертора и нужный фазовый сдвиг относительно напряжения сети.

Пример трехфазного инвертора с ШИМ был смоделирован программе Matlab Simulink и изображен на рисунке 7.

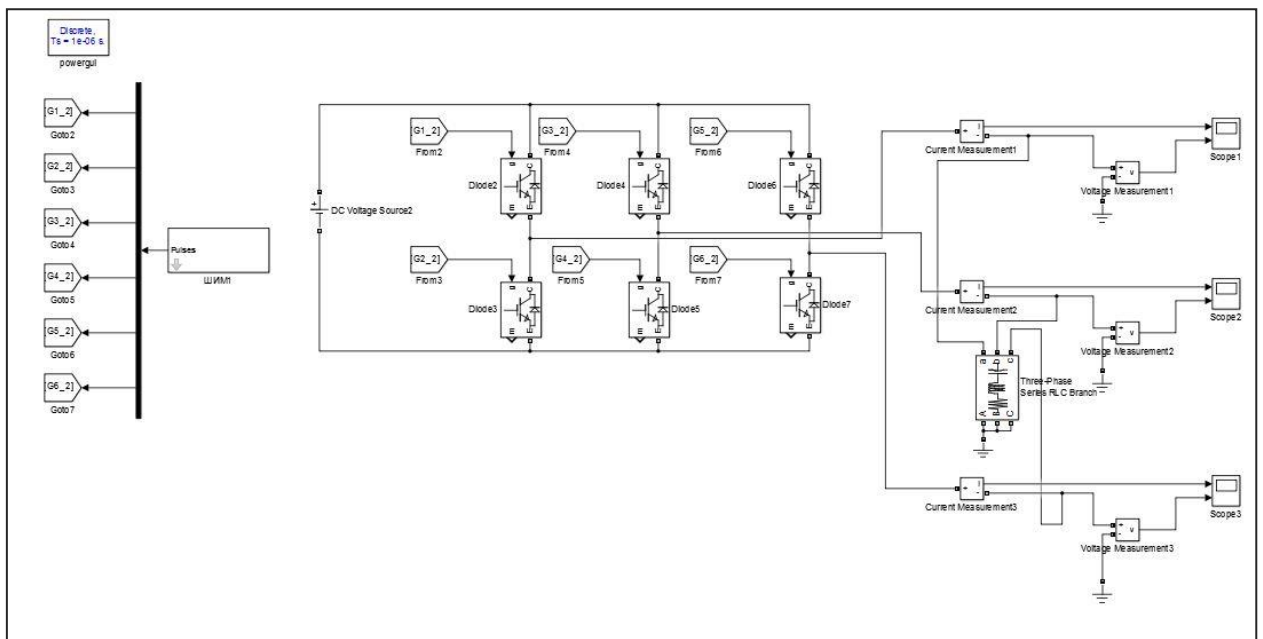


Рисунок 7 – Схема инвертора с ШИМ

В качестве нагрузки выступает RL цепь, в качестве генератора - источник постоянного напряжения. Величина несущей частоты выбрана 10кГц, что является компромиссом между качеством выходной характеристики (частота должна быть выше) и приемлемыми потерями на коммутацию (частота должна быть ниже).

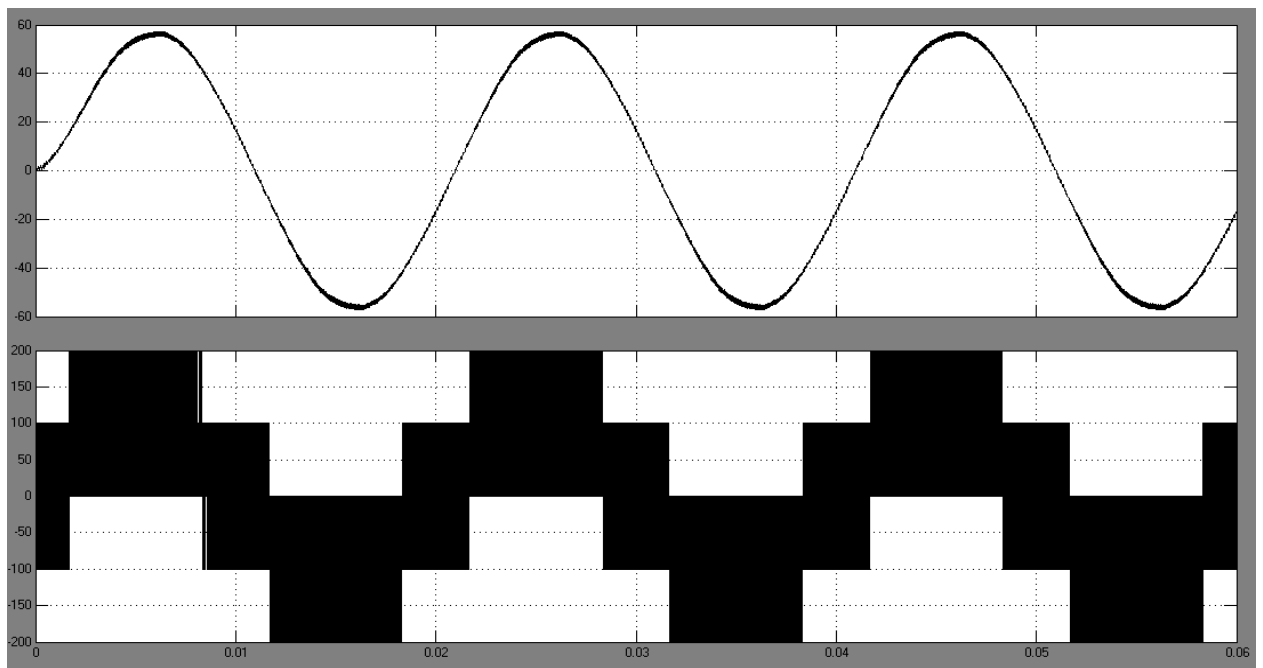


Рисунок 8 – Ток в фазе и соответствующе фазовое напряжение после инвертора с несущей частотой 10кГц



## 2. Эмуляторы провала напряжения

### 2.1. Типы эмуляторов

Различные сетевые кодексы требуют специального испытательного оборудования. Например, согласно международному стандарту IEC 61400-21, применяемому во Франции, для измерения характеристик ветровых турбин при провале напряжения рекомендуется использовать оборудование на основе делителя напряжения [14]. Всего же обычно выделяют 4 основных типа эмуляторов [15]:

#### 1) Эмулятор на основе синхронного генератора

Дизельный двигатель вращает синхронный генератор. Через изменение напряжения возбуждения осуществляется регулирование реактивной мощности, а, следовательно, и напряжения (Рисунок 9).

Однако так как синхронные машины обеспечивают только симметричное регулирование напряжения, данный тип эмулятора возможно использовать только для создания симметричных провалов напряжения. С другой стороны, изменяя скорость вращения дизельного двигателя, можно изменять частоту напряжения, которое создает генератор, то есть проводить также опыты для пониженной и повышенной частоты.

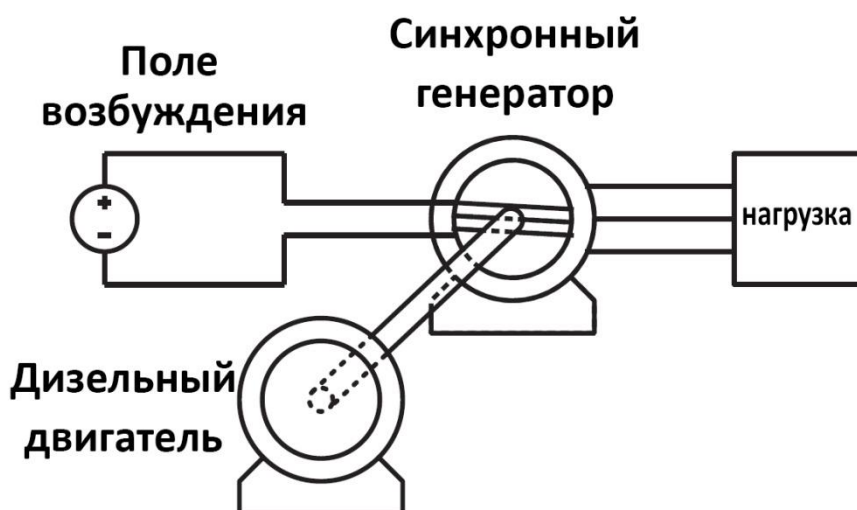


Рисунок 9 – Схема эмулятора на основе синхронного генератора

## 2) Эмулятор на основе делителя напряжения

Данная система основана на изменении сопротивления шунта, через который сеть замыкается на землю. В результате в точке  $S_{2n}$  можно создать нужное напряжение, регулируя величину импеданса  $Z_{pn}$ . Также необходимо комплексное сопротивление  $Z_s$ , установленное последовательно с сетью, чтобы ограничить влияние провалов напряжения, создаваемых эмулятором, но остальную сеть (Рисунок 10).

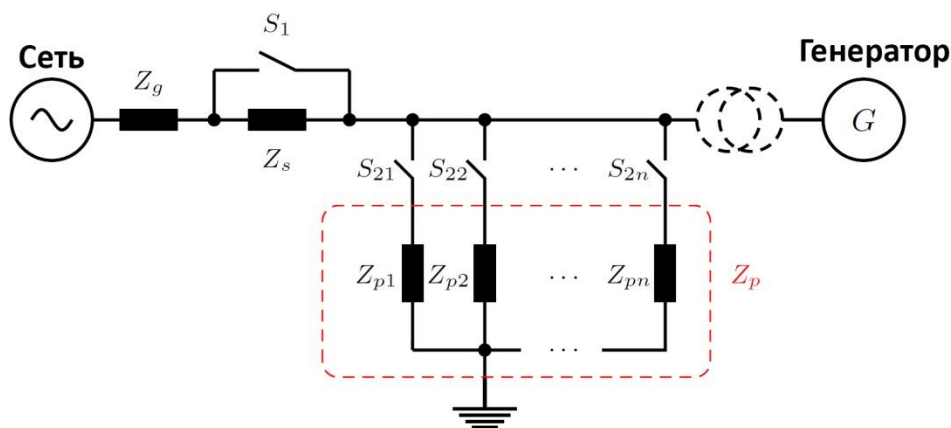


Рисунок 10 – Схема эмулятора на основе делителя напряжения

## 3) Эмулятор на основе трансформатора

Это решение содержит трансформатор, а также систему управления отпайками, которая позволяет контролировать выходное напряжение. Возможно создание как пониженного, так и повышенного напряжения.

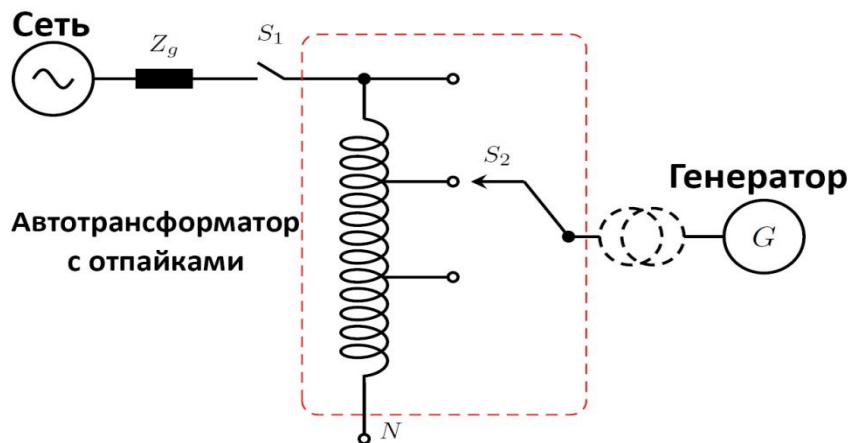


Рисунок 11 – Схема эмулятора на основе трансформатора

#### 4) Эмулятор на основе двухзвенного преобразователя

Данная система состоит из двухзвенного преобразователя. Поток мощности регулируется контролем звена постоянного напряжения  $V_{dc}$  (рисунок 12). Для рассматриваемой системы использовался только один инвертор с шиной постоянного тока.

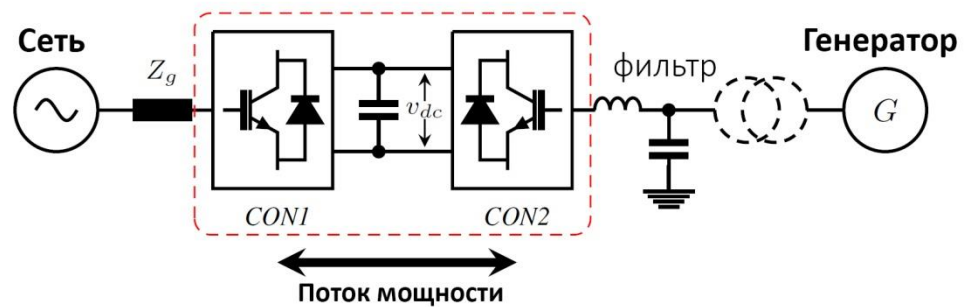


Рисунок 12 – Схема эмулятора на основе двухзвенного преобразователя

Составим сравнительную таблицу для всех 4 типов.

Таблица 5 – Сравнение эмуляторов

Эмулятор	Преимущества	Недостатки
Эмулятор на основе синхронного генератора	Легко использовать. Возможно регулирование как напряжения, так и частоты	Значительный размер, большой вес, движущиеся части, подверженные износу, только симметричные провалы напряжения
Эмулятор на основе делителя напряжения	Легко использовать, общедоступное оборудование для моделирования в лаборатории	Большое количество коммутаторов, генерирование возмущений из-за большого количества коммутаторов.

Продолжение таблицы 5

Эмулятор	Преимущества	Недостатки
Эмулятор на основе трансформатора	Гибкое регулирование напряжения на выходе	Большой вес, генерация возмущений при коммутации
Эмулятор на основе двухзвенного преобразователя	Небольшой размер, высокая точность контроля выходной характеристики	Сложный способ контроля эмулятора для получения нужной характеристики, гармоника

Так как работа проводилась на примере СЭС на о. Корсика, то LVRT характеристика принята согласно стандартам Франции [16]. Данная характеристика изображена на рисунке 1. Притом нас интересует в данной работе только эмуляция пониженного напряжения без необходимости создавать перенапряжение. В связи с этим, а также тем, что решение должно быть мобильным, эмулятор на основе трансформатора не может считаться подходящим решением, так как является слишком массивным. Разберем подробнее оставшиеся три.

## 2.2. Эмулятор на основе синхронного генератора

Синхронный генератор преобразует механическую энергию, получаемую через вал от дизельного генератора, в электрическую энергию. Частота вращения вала, а, следовательно, и дизельного двигателя всегда должна быть постоянной, так как синхронная частота генератора прямо пропорциональна частоте сети:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (1)$$

где  $n$  – скорость вращения вала, об./мин.;

$f$  – частота в сети, Гц;

$p$  – число пар полюсов.

Процесс создания провала напряжения состоит в том, чтобы изменяя поле возбуждения, регулировать величину реактивной мощности, поглощаемой или генерируемой синхронной машиной. Тогда можно найти величину потери напряжения согласно формуле:

$$\Delta V = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{V_n} \quad (2)$$

А если учесть, что активное сопротивление линии крайне мало, и им можно пренебречь, то формула упростится:

$$\Delta U = \frac{Q \cdot X}{U_n}, \quad (3)$$

где  $\Delta U$  – глубина провала напряжения;

$Q$  – величина потребляемой реактивной мощности;

$X$  – индуктивность линии;

$U_n$  – номинальное напряжение линии.

При математическом моделировании нет необходимости воспроизводить дизельный двигатель, достаточно задать на вход синхронной машины постоянную скорость вращения. Для проведения тестов была собрана модель в Matlab Simulink.

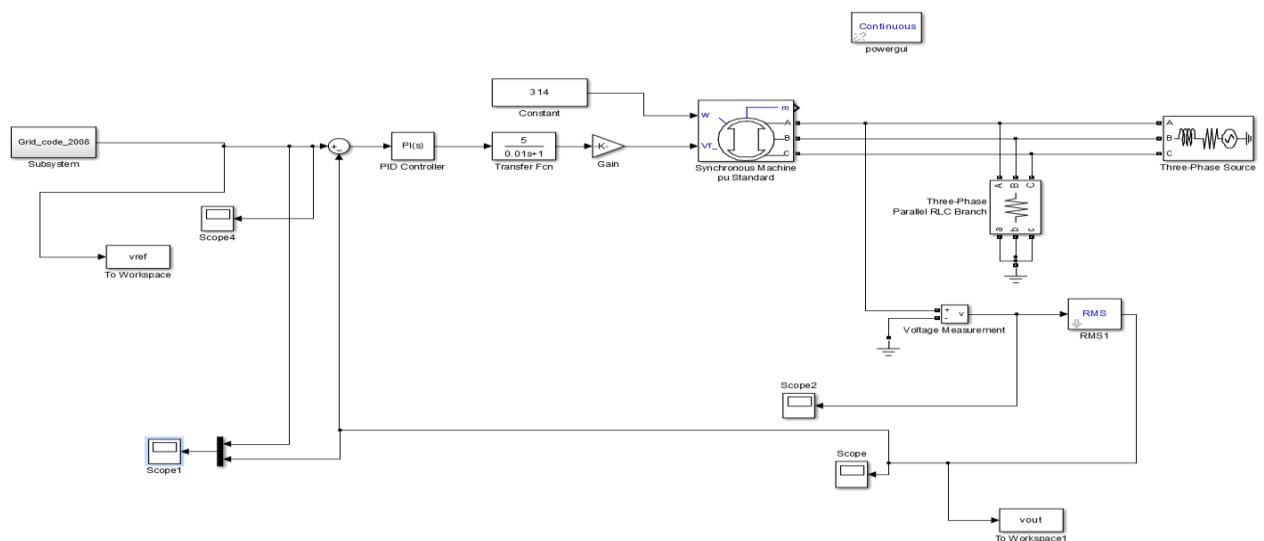


Рисунок 13 – Схема эмулятора на основе синхронной машины в Matlab Simulink

Необходимо было проверить поведение напряжения в зависимости от мощности используемой синхронной машины. Рассматривался блок СЭС о. Корсика с одним инвертором, мощность которого равна 500 кВА. Для него были проведены расчеты с синхронными машинами, имеющими мощность 100%, 70%, 50% и 20% от мощности блока (500кВА). Т.е. в каждом из 4 случаев мощность синхронной машины должна быть 500, 350, 250 и 100 кВА соответственно.

Моделирование:

1) Синхронная машина – были использованы данные из спецификации генераторов компании Leroy Somer и внесены в модель синхронной машины Matlab Simulink.

Для каждого из 4 случаев были соответственно выбраны [17]:

- 100%: LSA 49.3 S4, S = 660 кВА, P = 528 кВт
- 70%: LSA 46.3 L11, S = 365 кВА, P = 292 кВт
- 50%: LSA 49.3 S5, S = 250 кВА, P = 200 кВт
- 20%: LSA 44.3 S5, S = 100 кВА, P = 80 кВт

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]:	
[ 660E3 400 50]	
Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl ] (pu):	
[ 3.01, 0.147, 0.117, 1.80, 0.131, 0.14 ]	
d axis time constants:	Short-circuit
q axis time constants:	Short-circuit
Time constants [ Td' Td'' Tq'' ] (s):	
[0.1 0.01 0.003]	
Stator resistance Rs (pu):	
0.003	
Pole pairs p ( ):	
2	

Рисунок 13. Характеристики синхронного генератора 660кВА

2) Система возбуждения - моделируется через передаточную функцию первого порядка. Постоянная времени такой системы составляет 20 мс.

3) СЭС – была смоделирована как 3фазный источник мощности. К нему была добавлена резистивная ветвь в качестве нагрузки.

4) Контроллер – был выбран ПИ-контроллер библиотеки Matlab Simulink.

5) Замкнутый контур с ПИ контроллером обеспечивает необходимую передаточную функцию для системы возбуждения. На вход системы задан профиль LVRT характеристики из сетевого кодекса Франции. Из этого входа вычитается фактическое значение напряжения в линии, и полученный результат подаётся на вход ПИ контроллера, который формирует сигнал для системы возбуждения синхронного генератора. Тем самым регулируется величина реактивной мощности синхронной машины и создается требуемый уровень напряжения.

Результаты:

Было проведено сравнение действующего значения напряжения одной фазы с характеристикой сетевого кодекса.

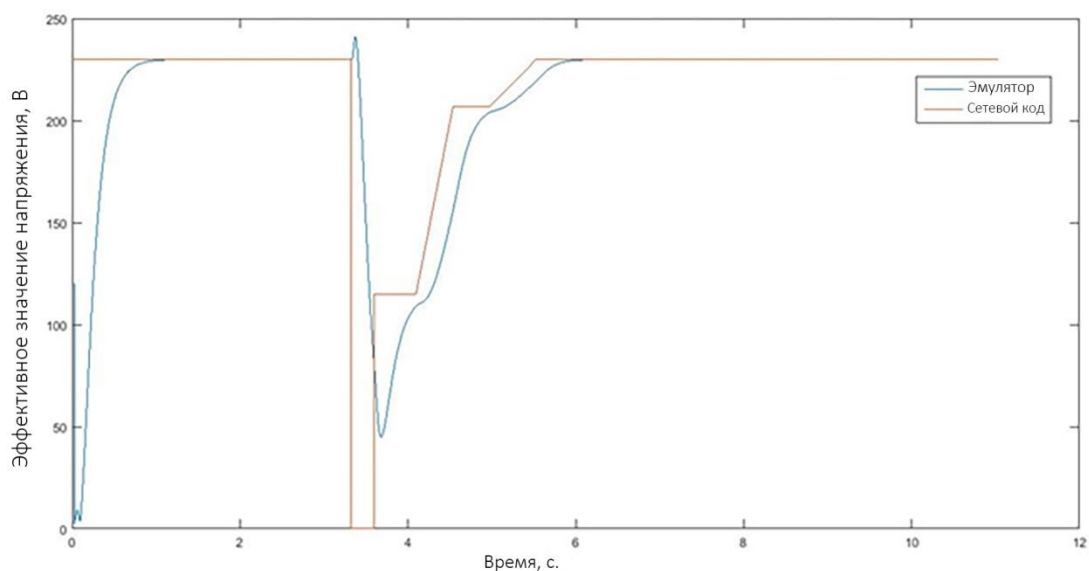


Рисунок 14 – Напряжение на выходе эмулятора и требуемая характеристика при  $S = 660$  кВА

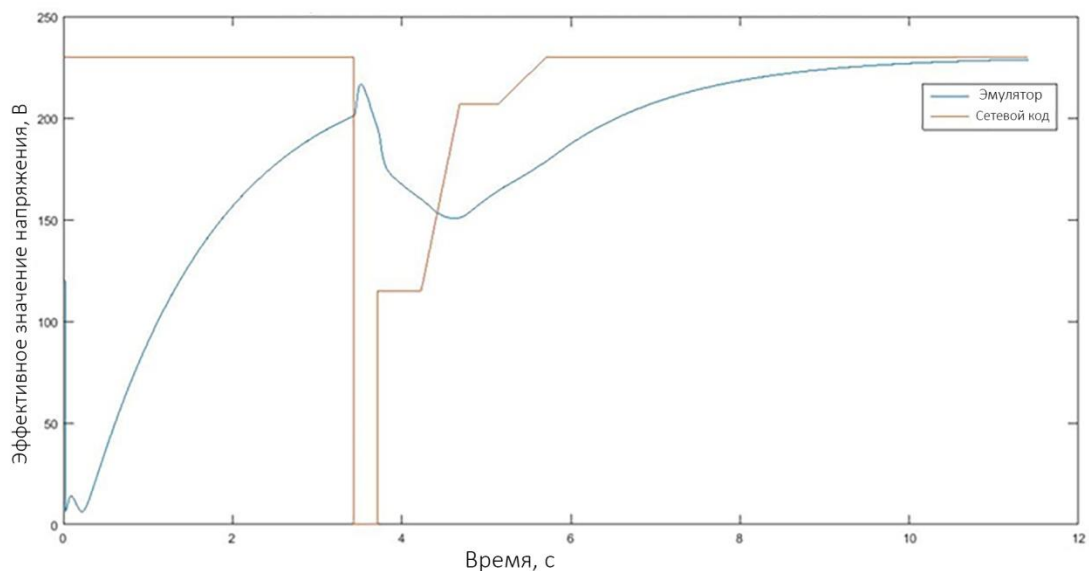


Рисунок 15 – Напряжение на выходе эмулятора и требуемая характеристика при  $S = 100$  кВА

В результате можно утверждать, что создать провал напряжения с помощью данного эмулятора возможно, но форма кривой будет далека от идеальной. Кроме того воздействие на сеть уменьшается с уменьшением мощности синхронной машины. Это можно видеть при сравнении рисунков 14 и 15, где изображены полученные характеристики для машин с мощностями 660кВА и 100кВА. Во втором случае форма полученной кривой значительно хуже.

Также были проведены расчеты для исследования зависимости напряжения на выходе эмулятора от других параметров.

- Чем меньше постоянная времени системы возбуждения, тем система показывала лучшую эффективность. Соответственно, в реальном аппарате регулятор возбуждения должен конструироваться с наименьшей возможной индуктивностью.

- При увеличении коэффициента усиления возбуждения увеличивается первоначальное превышение амплитуды, но лучше сходимость с графиком сетевого кодекса в дальнейшем. При слишком большом усилении система становится неустойчивой, поэтому данный



параметр должен быть очень внимательно выбран при аппаратной реализации.

### **2.3. Эмулятор на основе инвертора (двухзвенного преобразователя)**

Данное решение реализовано на основе трехфазного инвертора, способного генерировать все типы провалов напряжений при соответствующем законе управления. Эмулятор был реализован в программной среде Matlab Simulink (Приложение А). Для контроля инвертора была выбрана вращающаяся система  $dq$  координат по продольной и поперечной оси ротора, которая вращается со скоростью вращения ротора. Она выгоднее трехфазной стационарной системы координат  $XYZ$ , позволяя уменьшить количество уравнений и упростить их.

Принцип действия модели:

1) Для эмулятора моделируется требуемая форма характеристики  $Q(t)$  – опорная реактивная мощность.

2) По датчикам напряжения и тока на выходе инвертора через блок «Расчет  $P$  и  $Q$ » рассчитывается генерируемые активная и реактивная мощности.

3) Блок контроля  $Q$  рассчитывает отклонение реактивной мощности от ее опорного значения и задает ток  $i_{rq}$  для регулирования. Аналогично блок контроля  $P$  рассчитывает отклонение активной мощности от его опорного значения и задает ток  $i_{rd}$  для регулирования.

4) Регулятор тока задает на выходе напряжение, которое поступает на блок ШИМ контроллера. Предварительно сигнал подвергается обратному преобразованию Парка для конвертации вращающихся координат в неподвижные.

5) ШИМ контроллер рассчитывает частоту коммутации ключей для инвертора.

6) Инвертор преобразует постоянное напряжение источника в переменное с заданными соотношениями активной и реактивной мощности.

7) Выходной высокочастотный фильтр используется для сглаживания формы напряжения, и на выходе выдаёт соответствующий ток.

8) После фильтра стоит датчик тока, который снимает значение тока после прохождения сигнала через блок прямого преобразования Парка для трансформации координат из неподвижных осей в подвижные (то есть блок задает поворот координат на угол  $\theta$ ). Контур замыкается.

Основная разница между контроллерами тока со стационарной системой координат и контроллерами на основе вращающейся системы координат в том, что первые часто обладают статической ошибкой. Быстродействие регуляторов ограничено. При постоянном изменении уставки контроллер будет непрерывно следовать за уставкой, но не сможет обеспечить ее достижение. Вращающаяся система координат решает данную проблему. В итоге регуляторы работают в статическом режиме – токи  $d$  и  $q$  в установившемся сигнале постоянны, поэтому мы можем использовать для регулирования ПИ контроллер. К недостаткам можно отнести то, что контролируемые блоки на основе вращающейся системы координат более сложны.

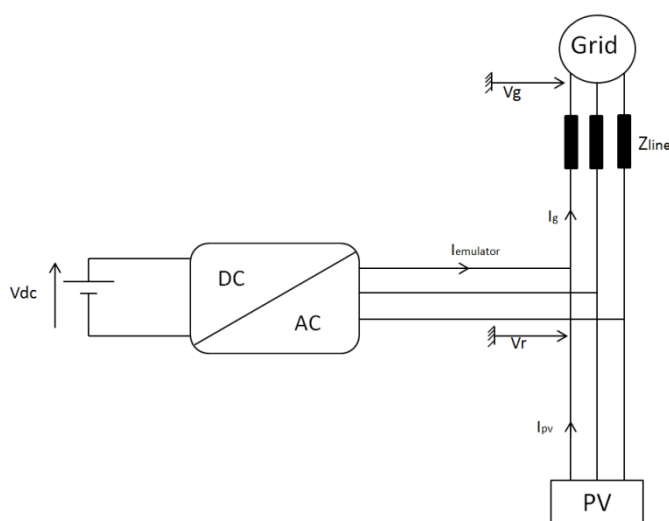


Рисунок 16 – Упрощенная схема реализованного эмулятора

Так как для моделирования требуемого профиля напряжения нам не требуется активная мощность, опорный ток  $i_{d\text{ ref}}$  приравнен к нулю. Если представить применяемый метод в виде блок-схемы, то он будет выглядеть, как показано на рисунке 17.



Рисунок 17 – Блок схема реализованного в Matlab Simulink алгоритма

### Моделирование

#### 1) Для напряжения сети 400В

Изначально эмулятор предполагалось размещать перед трансформатором СЭС на стороне низшего напряжения, поэтому напряжение принято 400В. Опорный сигнал реактивной мощности был создан с помощью блоков Step и Ramp.

На выходе инвертора измеряется среднеквадратичное значение напряжения одной фазы, которое сравнивается с LVRT характеристикой из сетевого кодекса (Рисунок 18).

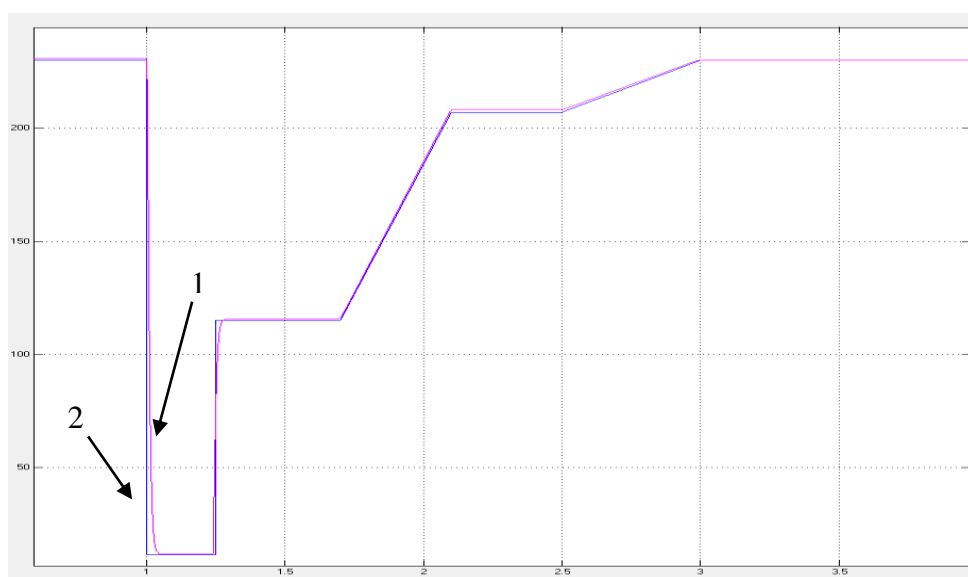


Рисунок 18 – Напряжение на выходе инвертора (1) и сетевой кодекс (2) для линейного напряжения 400В

По полученным результатам можно заметить, что выходная характеристика очень близка к требуемой со стороны сетевого кодекса, что подтверждает эффективность работы эмулятора. Был также рассчитан ток в течение процесса, максимум которого составил 410 А (Рисунок 19).

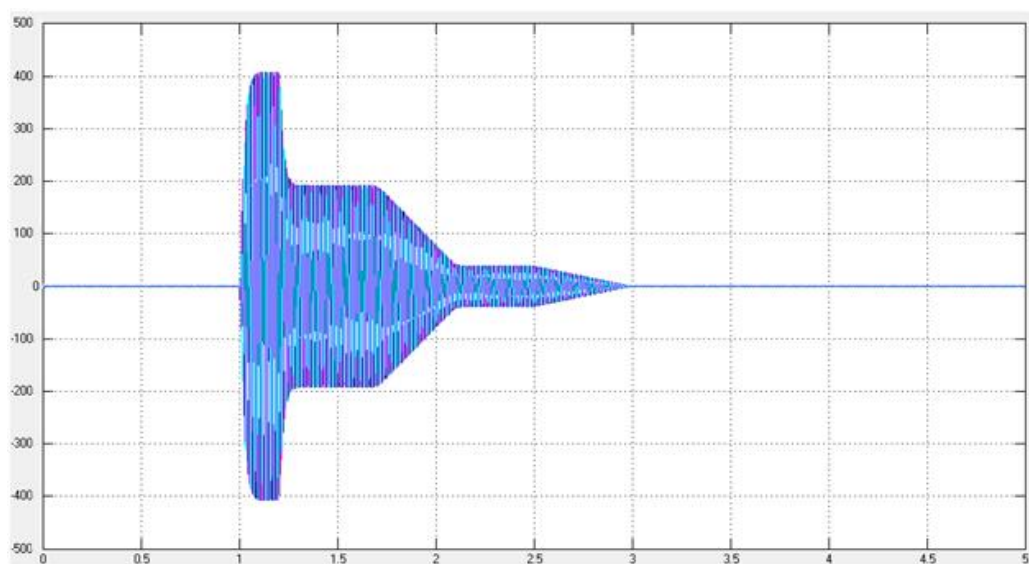


Рисунок 19 – Ток во время теста при напряжении сети 400В

2) Для напряжения сети 20 кВ

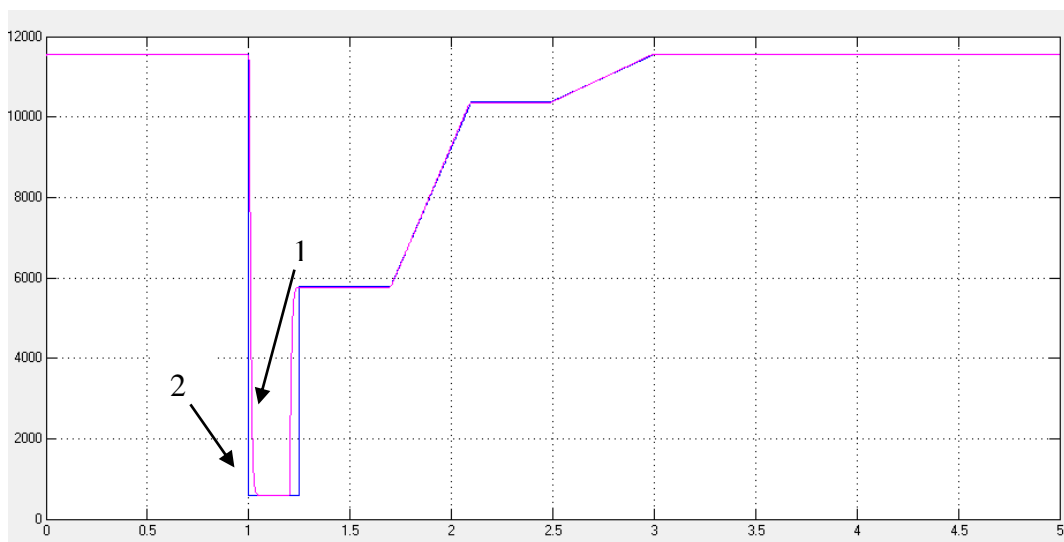


Рисунок 20 – Напряжение на выходе инвертора (1) и LVRT характеристика согласно сетевому кодексу (2) для линейного напряжения 20кВ

Была выполнено моделирование к СЭС после трансформатора, на стороне высшего напряжения, при напряжении 20кВ и мощности всей СЭС (рисунок 20).

Полученная характеристика также имеет форму близкую к требованиям сетевого кодекса, но ток в первые моменты эмуляции имел очень большое значение, что связано с увеличением мощности тестируемой СЭС в 8 раз (вся СЭС вместо одного ее блока). В связи с этим применение эмулятора для отдельного взятого блока СЭС с собственным инвертором выглядит предпочтительнее.

В заключение можно сказать, что данный эмулятор обеспечивает высокую степень соответствия формы выходной характеристики LVRT требованиям стандарта. Но данное решение не очень надежно для транспортировки ввиду наличия силовой электроники, что не подходит для трейлеров. Кроме того при эксперименте оно существенно влияет на напряжение во всей сети, а не только на тестируемом участке.

#### **2.4. Эмулятор на основе делителя напряжения**

Как уже было упомянуто, эмулятор на основе делителя напряжения рекомендуется стандартом IEC 61400-21. Оборудование такого типа используют международные компании Dewi [12] и E2Q [18]. Данный тип является одним из наиболее простых и эффективных. Это решение включает в себя блоки сопротивлений, предназначенные для создания конкретного уровня напряжения. Подключение и отключения каждого блока производит контроллер с помощью ключей (транзисторов).

Была реализована схема соответствующего эмулятора в программной среде PSIM (рисунок 21). Её выбор был обоснован более простой и удобной реализацией контроля ключей, чем в Matlab Simulink.

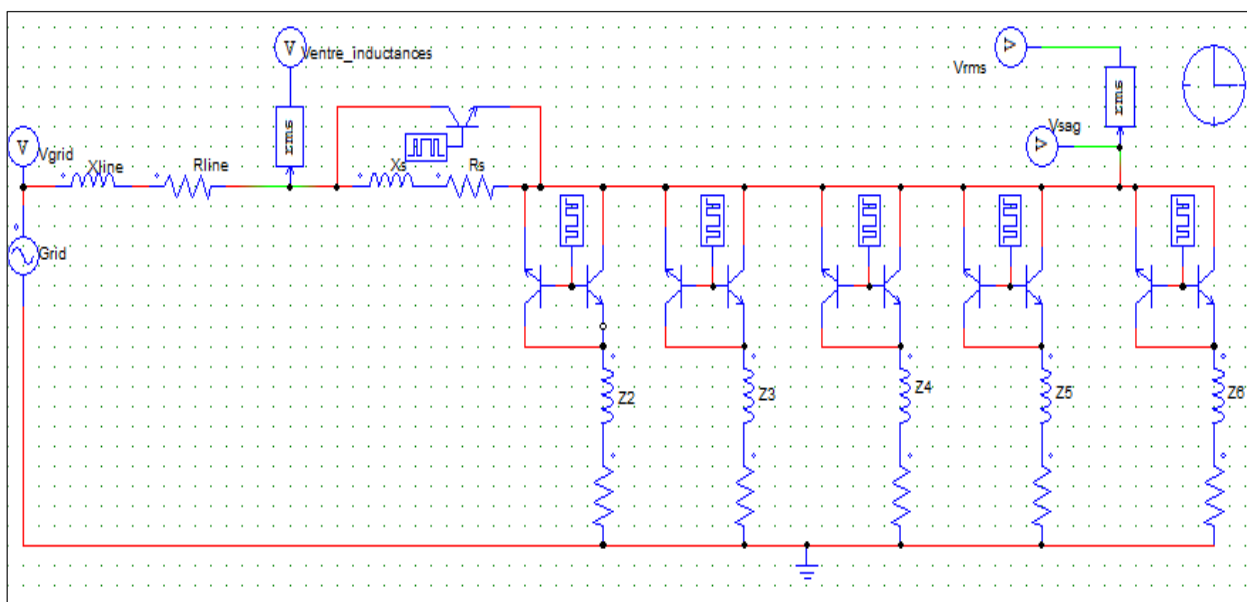


Рисунок 21 – Схема эмулятора на основе делителя напряжения.

Приведем расчёт параметров элементов эмулятора.

Согласно данным, предоставленным компанией EDF, мощность короткого замыкания сети, к которой подключена исследуемая СЭС, составляет  $S_{cc}=78$  МВА, напряжение инвертора  $U_{cc}=400$ В. Активное и индуктивное сопротивление кабелей между СЭС и трансформатором  $R_{cab}=0.7$  Ом и  $X_{cab}=0.8$  Ом. Взято стандартное значение коэффициента мощности при КЗ  $\cos\varphi_{cc}=0.1$ .

Тогда сеть можно описать следующими параметрами

$$R_{cc} = \frac{U_{cc}^2}{S_{cc}} \cos \varphi_{cc} = 2.05 \times 10^{-4} \text{ Ом}, \quad (4)$$

$$X_{cc} = \frac{U_{cc}^2}{S_{cc}} \sin \varphi_{cc} = 2.04 \times 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (5)$$

Полное сопротивление линии вместе с низковольтными кабелями:

$$R_{line} = R_{cab} + R_{cc} \approx 0.7 \text{ Ом} \text{ и } X_{line} = X_{cab} + X_{cc} \approx 0.8 \text{ Ом}.$$

То есть сопротивление линии практически полностью определяется сопротивлением низковольтных кабелей.

Согласно нормам IEC 61400-21 величина последовательного сопротивления  $Z_s$  должна быть выбрана таким образом, чтобы напряжение в

остальной части сети не выходило за допустимые пределы, то есть в данном случае не опускалось ниже  $0,95U_{nom}$ .

Тогда по формуле найдем минимальное значение  $Z_s$ :

$$|Z_s + Z_p| \geq 0.95|Z_s + Z_p + Z_{line}|, \quad (6)$$

где  $Z_p$  – величина подключенного блока сопротивлений.

Отсюда получаем, что минимальная величина  $Z_s$ :

$$Z_s \geq 19Z_{line}$$

Для моделирования и расчетов принято решение взять значение  $Z_s = 60 \cdot Z_{line} = 21 + 24i$  Ом, чтобы гарантировать необходимую точность.

Согласно сетевому кодексу Франции имеется 6 различных участков напряжения. Каждому из них соответствует свой блок сопротивлений. Тем не менее, для участка имеющего наклон, требуется переменное сопротивление. По практическим соображениям упрощения и использования более дешевых комплектующих, на данном участке были использованы постоянные сопротивления, создающие ступенчатую характеристику.

Чтобы рассчитать значения сопротивлений для каждого блока, соответствующего определенному уровню напряжения, использовалась формула для делителя напряжения:

$$V_{sag} = \left| \frac{Z_p}{Z_s + Z_p + Z_{line}} \right| V_{grid} \quad (7)$$

В нормальном режиме замкнут ключ, шунтирующий  $Z_s$ . Все блоки сопротивлений отключены. Обозначим данное состояние как этап 1. Для других этапов результаты расчета  $Z_p$ , найденные из формулы 7, приведены в таблице 6.

Рассчитанные параметры были занесены в модель. Полученные значения среднеквадратичного напряжения на стороне СЭС и напряжения в остальной части сети приведены на одном графике (рисунок 22).

Таблица 6 – Значения вычисленных сопротивлений

Этапы	Глубина провала напряжения(%)	Значение соответствующего блока сопротивлений (Ом)
Этап 2	95	$2.145+2.451j$
Этап 3	50	$42.7+48.8j$
Этап 4	30	$97.6+111.543j$
Этап 5	10	$384.3+439.2j$
Этап 6	5	$811.3+927.2j$

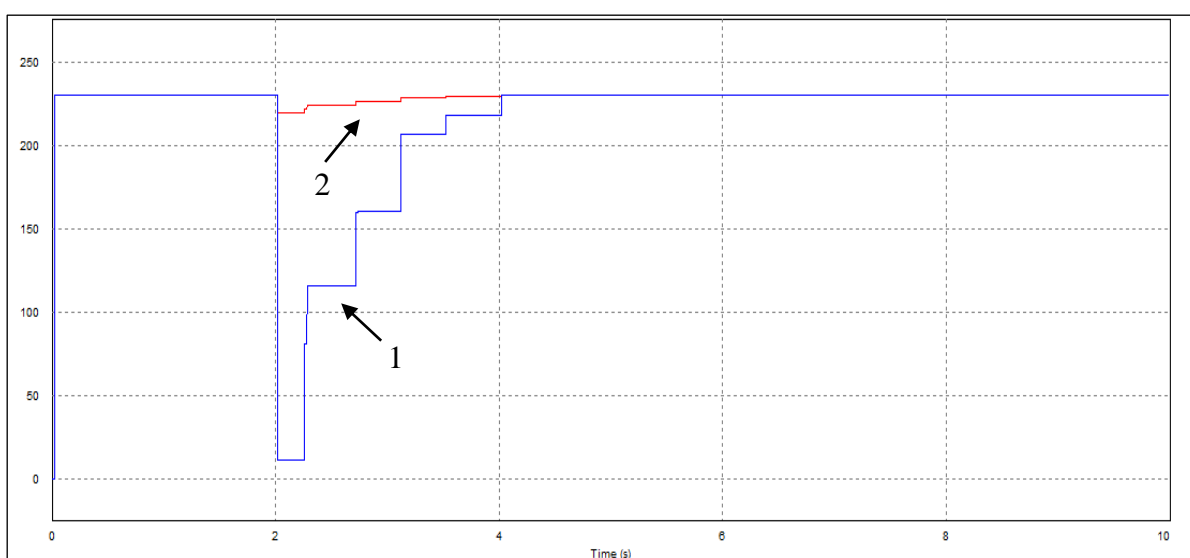


Рисунок 22 – Полученная характеристика напряжения на СЭС (1) и в остальной сети (2)

Из графика можно видеть, что влияние эмулятора на остальную сеть в пределах допустимых значений. Заданная форма напряжения также соответствует ожиданиям.

Вывод: на основании проведенных расчетов и сравнения результатов решено реализовать эмулятор на основе делителя напряжения. Он обладает такими преимуществами как простота, низкое влияние на остальную сеть, низкий вес и обеспечивает довольно точное соответствие желаемой характеристике. Другие решения не подошли из-за требования размещения необходимого оборудования в подвижном трейлере, их более низкой надежности и чрезмерного влияния на остальную сеть.



### 3. Сборка реального эмулятора

#### 3.1. Описание установки

Цель данной главы протестировать работоспособность предложенного эмулятора. В связи с тем, что требуется только проверка принципа работы, схема была упрощена до наличия только двух блоков сопротивлений для создания двух уровней провала напряжения, что видится достаточным (рисунок 23).

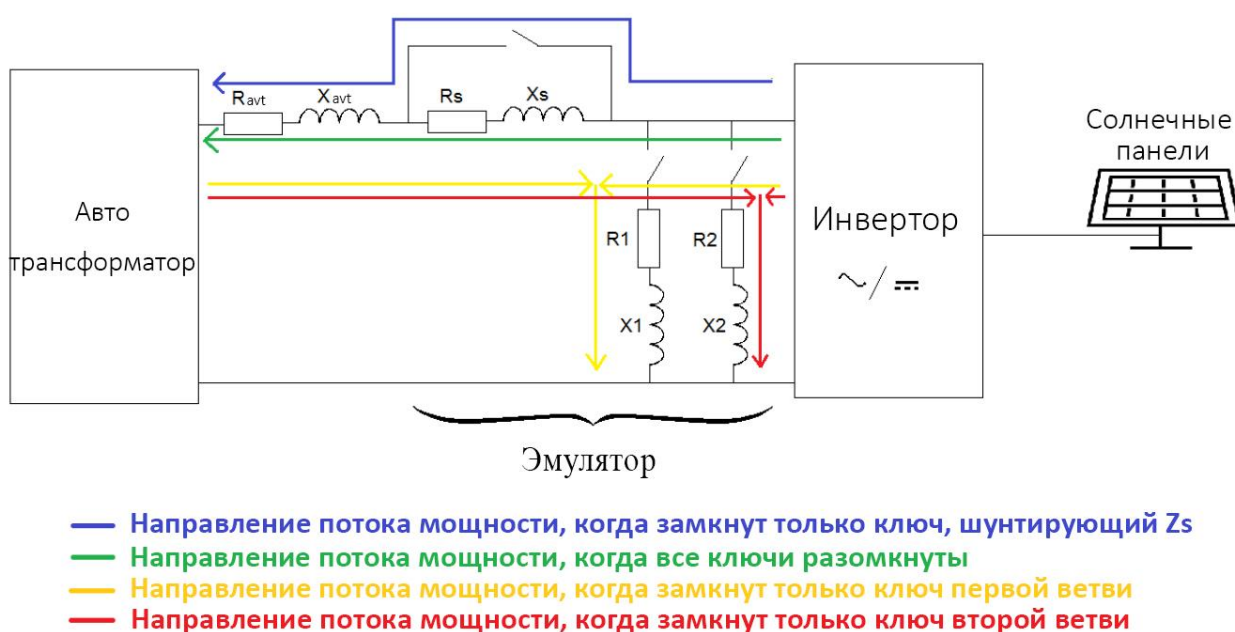


Рисунок 23 - Тестовая система для проверки работоспособности эмулятора

При моделировании в предыдущей главе не учитывалось влияние инвертора. Для реального теста он учтён - был заказан микро-инвертор на 250Вт фирмы ENPHASE [19]. После этого произведен расчет значений сопротивлений для резисторов и индуктивностей двух ветвей. Дальнейшие тесты проведены как с инвертором, так и без него.

Сеть в тестовой системе представлена автотрансформатором, сопротивления кабелей настоящей СЭС заменены внутренним сопротивлением автотрансформатора. Автотрансформатор позволяет

регулировать напряжение от 0 до 240В, а также обеспечивает гальваническую развязку, что важно для безопасности проведения экспериментов. Напряжение для испытаний выбрано и настроено на 50В, что также обусловлено безопасностью. Автотрансформатор и инвертор уже имели внутренние защиты, поэтому дополнительная защита для них не устанавливалась. В качестве ключей были выбраны механические реле.

Рассчитана рассеиваемая мощность на каждом используемом элементе, чтобы исключить случай перегрева.

### 3.2. Расчёт элементов эмулятора

#### 3.2.1. Сопротивление автотрансформатора

В тестовой системе отсутствуют длинные линии или кабели, но необходимо учитывать внутреннее сопротивление автотрансформатора. Очевидно, что его сопротивление отлично от сопротивления линий на рассматриваемой СЭС. Чтобы получить более близкие значения к тем, что требуется, решено сохранить отношение  $X/R$  таким же, как у линий для исследуемой СЭС (0,8/0,7). Для этого первоначально требовалось вычислить внутреннее сопротивление трансформатора.

Для этого была собрана специальная схема для измерения внутреннего сопротивления (рисунок 24).

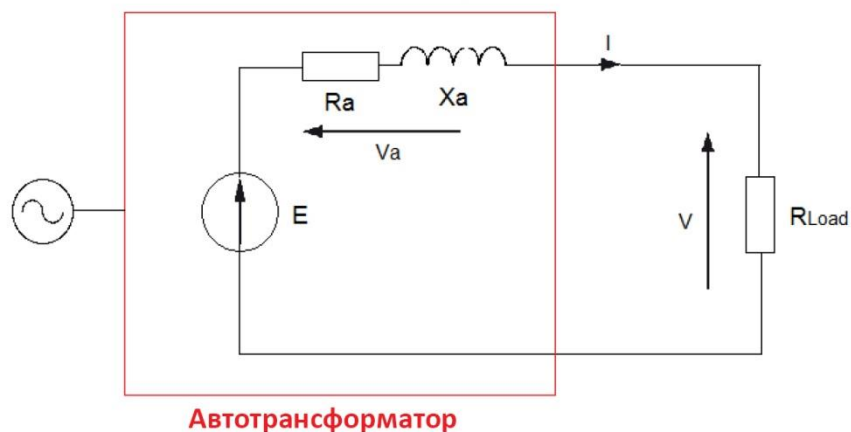


Рисунок 24 – Схема цепи для измерения внутреннего сопротивления

Изначально внутреннее активное сопротивление измерялось с помощью омметра, но данный метод не учитывал сопротивление сети, к которой был подключен инвертор, и давал неверные результаты, в связи с этим сопротивление было найдено далее из построения кривых.

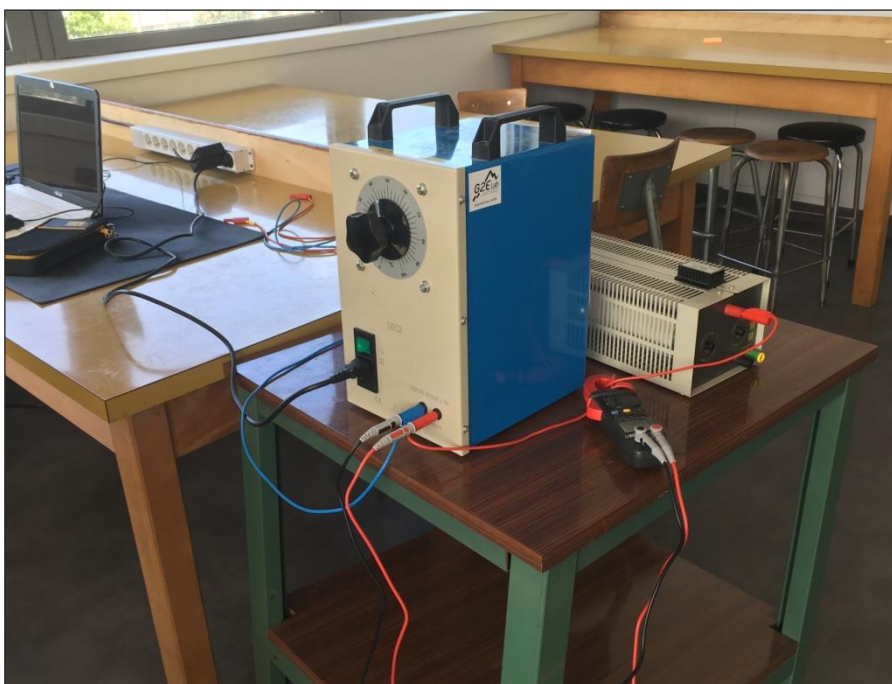


Рисунок 25 – Внешний вид тестовой цепи для определения внутреннего сопротивления трансформатора

Ход опыта:

- 1) Была собрана цепь с использованием переменного сопротивления и мультиметра (рисунок 25)
- 2) Фиксировался коэффициент преобразования автотрансформатора, и измерялась электродвижущая сила (ЭДС) для данного коэффициента с помощью мультиметра.
- 3) Фиксировалось значение переменного сопротивления и измерялось его точное значение с помощью мультиметра.
- 4) Автотрансформатор соединялся с резистором, на котором измерялось напряжение, а также протекающий в нем ток.

5) Автотрансформатор выключался с сохранением коэффициента трансформации и отключался от нагрузки.

6) Менялось сопротивление резистора и повторялись пункты 3-5

Данный алгоритм также повторен для другого коэффициента трансформации для повышения точности обработки измерений. Все результаты сведены в таблицу 7.

Составим треугольник напряжений (рисунок 26). Внутреннее сопротивление трансформатора выражено  $Z_a = R_a + jX_a$ .

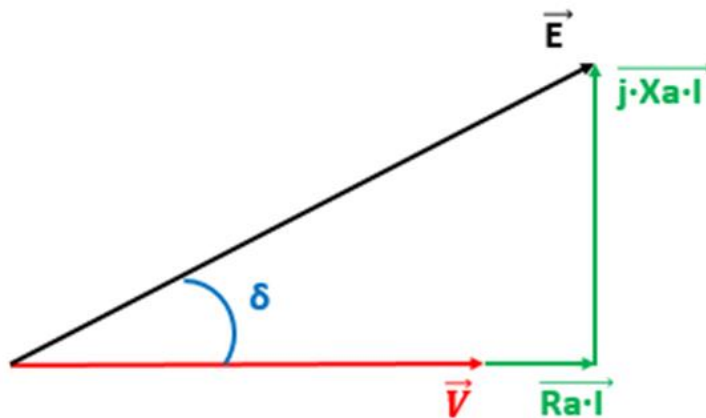


Рисунок 26 – Треугольник напряжений

В цепи во время опытов измерена реактивная мощность, которая была близка к нулю, то есть  $jX_a \cdot I$  очень мал в сравнении с напряжением на нагрузке. В связи с этим возможно сделать аппроксимацию, что угол  $\delta \approx 0$ . Тогда, применяя формулу для делителя напряжения, получим:

$$V_a = E \cdot \frac{Z_a}{Z_a + R_{load}} \Leftrightarrow Z_a = \frac{(E - V_a) \cdot R_{load}}{E - V_a}, \quad (8)$$

где  $E$  – ЭДС автотрансформатора (сети);

$V$  – напряжение на нагрузке;

$V_a$  – внутреннее падение напряжения в автотрансформаторе.

Измеренные значения нагрузки, ЭДС, напряжения на нагрузке и тока в сети, а также рассчитанное по формуле 8 полное внутреннее сопротивление трансформатора занесены в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты измерений и расчетов

Коэффициент трансформации	$R_{load}$ (Ом)	E (В)	V (В)	I (А)	$Z_a$ (Ом)
0,14	8	31,33	24,97	3,242	1,874
	15	31,34	27,51	1,826	1,929
	30	31,35	29,05	0,95	2,375
	37,3	31,27	29,71	0,792	1,959
	47,4	31,24	29,67	0,616	2,508
0,22	7,8	50,1	39,11	5,14	2,041
	15,2	50,4	44,8	2,59	1,723
	29,8	50,3	47,1	1,498	1,860
	37,3	50,4	47,7	1,238	1,954
	47,1	50,4	48,2	1,008	1,995

Чтобы уменьшить погрешность вычислений, учитывались только показания при величине нагрузки 29 Ом и выше.

Среднее значение  $|Z_a|$  составило 2,188 Ом. Учитывая аппроксимацию, которая осуществлялась при выводе формулы, увеличим данное значение на 5%:  $|Z_a|=2,3$  Ом

Модуль тока в цепи можно найти по формуле:

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_{load}+R_a)^2+(X_a)^2}}, \quad (9)$$

Изобразим на одном графике показания амперметра в зависимости от величины нагрузки  $I(R)$  и подберем значения  $R_a$  и  $X_a$ , при которых график согласно формуле (9) максимально совпадает с эмпирическими данными, учитывая, что  $X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2}$ . Результаты изображены на рисунке 27.

Значения  $R_a=2,04$  и  $X_a=1,1$  дали хороший результат - теоретические характеристики при  $E=31,3$ В практически полностью совпадают с эмпирическими значениями, а при  $E=50,3$ В заметно отклоняются только при нагрузке менее 30 Ом.

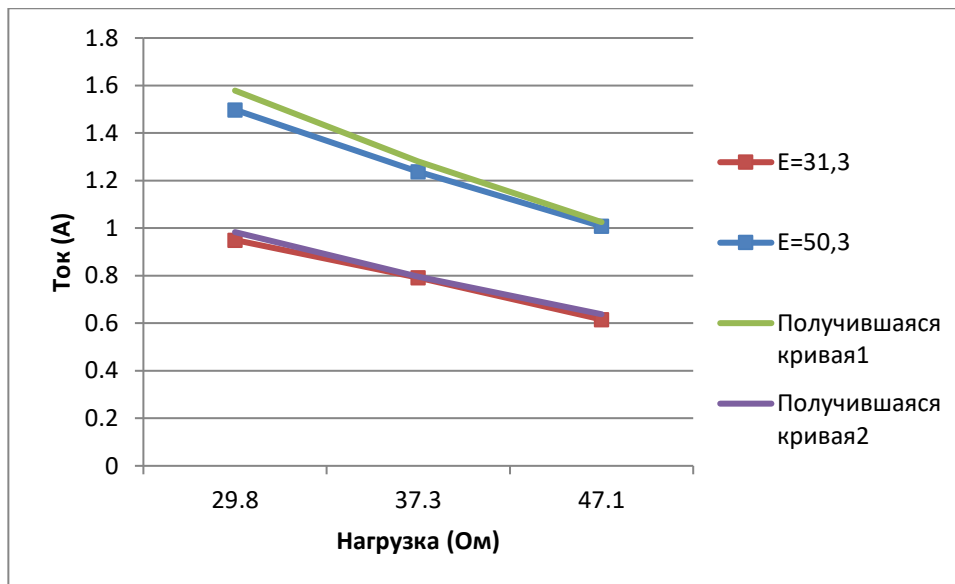


Рисунок 27 – Совмещение теоретических и эмпирических характеристик  $I(R)$

Для сохранения соотношения  $X/R$  таким же, как в исследуемой линии,  
 $r = \frac{X}{R} = \frac{0,8}{0,7} = 1,143$ , решено добавить для тестового эмулятора дополнительную индуктивность.

Новое значение индуктивности составило:

$$X_{a\ new} = R_a \cdot r = 2,04 \cdot 1,143 = 2,39 \text{ Ом.}$$

То есть применена дополнительная индуктивность 1,29 Ом.

### 3.2.2. Расчёт сопротивлений эмулятора

Для  $Z_s$  как и в прошлой главе применен повышающий коэффициент 60:

$$R_s = 60 \cdot 2,04 = 122,4 \text{ Ом} \qquad X_s = 60 \cdot 2,39 = 143,4 \text{ Ом}$$

Используя схему эмулятора с инвертором на рисунке 28, составим 4 уравнения с 4 неизвестными, при этом примем за ноль фазу напряжения  $V_{sag}$ .

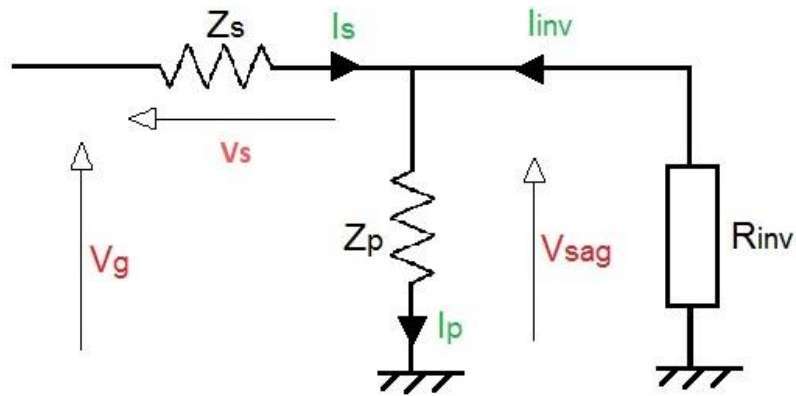


Рисунок 28 – Схема эмулятора с инвертором

Уравнения для напряжений:

$$\underline{V_s} = \underline{V_g} - \underline{V_{sag}}$$

$$|\underline{V_s}| e^{j\varphi_s} = |\underline{V_g}| e^{j\varphi_g} - |\underline{V_{sag}}| e^{j0}$$

Тогда:

$$\begin{cases} V_s * \sin(\varphi_s) = V_g * \sin(\varphi_g) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} V_s * \cos(\varphi_s) = V_g * \sin(\varphi_g) - |\underline{V_{sag}}| \end{cases} \quad (11)$$

Уравнения для токов:

$$\underline{I_s} + \underline{I_{inv}} = \underline{I_p}$$

$$\underline{I_s} = I_s e^{j\varphi_{is}} = \left| \frac{\underline{V_s}}{\underline{Z_s}} \right| e^{j(0.85 + \varphi_s)},$$

$$\text{где } \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = 0.85$$

Тогда:

$$\begin{cases} \frac{V_s}{|Z_s|} * \sin(0.85 + \varphi_s) = I_p * \sin(\varphi_p) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{V_s}{|Z_s|} * \cos(0.85 + \varphi_s) + I_{inv} = I_p * \cos(\varphi_p) \end{cases} \quad (13)$$

Для решения данной системы использовано программное обеспечение Mathcad и функция Find (Приложение В).

Из программы были взяты результаты для желаемых уровней напряжения:

для  $V_{sag1} = 200V : Z_1 = 361,8 + j 413,7 \text{ Ом}$

для  $V_{sag2} = 100V : Z_2 = 50,3 + j 57,5 \text{ Ом}$

### 3.2.3. Расчёт мощности солнечных панелей

Для проведения опытов были предоставлены стенды с 4 солнечными панелями по 30Вт и искусственным освещением (рисунок 29). Панели соединены попарно последовательно, а затем параллельно.

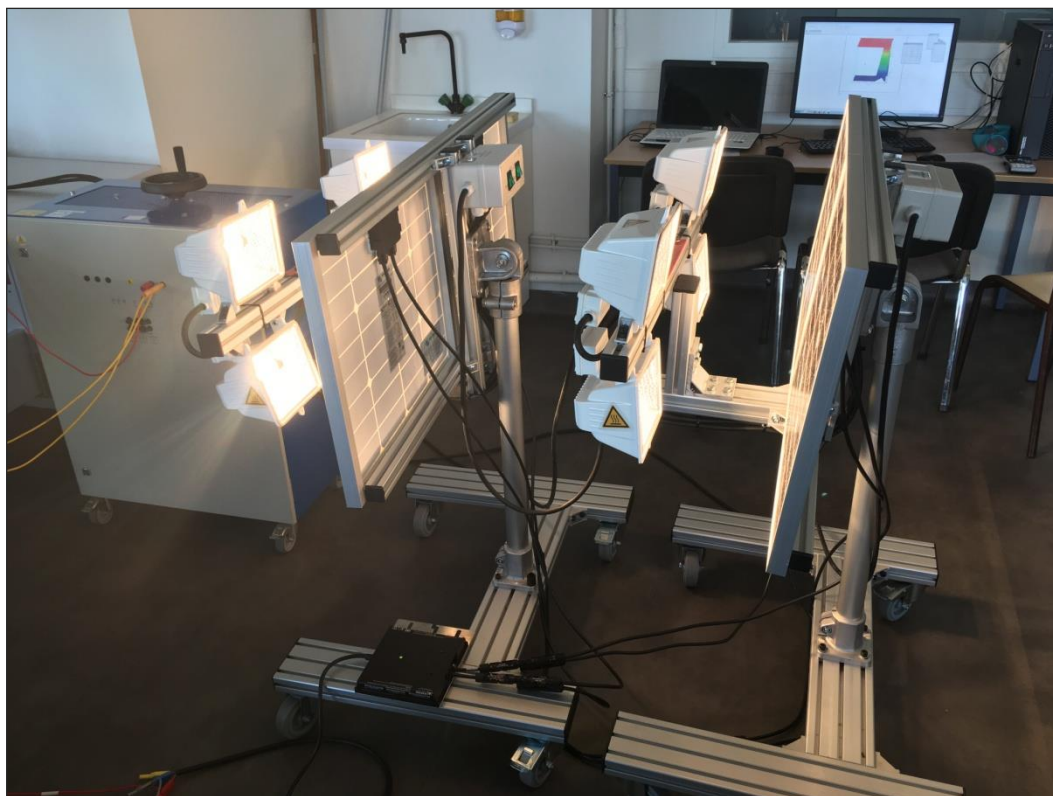


Рисунок 29 – Стенд с солнечными панелями.

Так как искусственное освещение не обеспечивает мощность излучения  $1000\text{Вт/м}^2$ , для которой дана номинальная мощность солнечных панелей, необходимо найти фактически генерируемую ими мощность. Так как инвертор оснащен MPPT (Maximum Power Point Tracking) алгоритмом, отслеживающим точку максимальной мощности ВАХ (вольт-амперной характеристики) солнечных панелей, необходимо экспериментально найти эту точку.



Для этого стенд солнечных батарей подключался к различной нагрузке, с помощью мультиметра измерялись ток и напряжение, по полученным данным рассчитывалась мощность (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты замера ВАХ солнечных панелей

U (В)	I (А)	P (Вт)
4,95	1,35	6,6825
8,8	1,32	11,616
12,33	1,25	15,4125
17	1,25	21,25
20,84	1,22	25,4248
25,2	1,2	30,24
30,44	1,16	35,3104
32	1,11	35,52
32,55	1,08	35,154
33,32	0,88	29,3216
34,04	0,84	28,5936
35,1	0,47	16,497

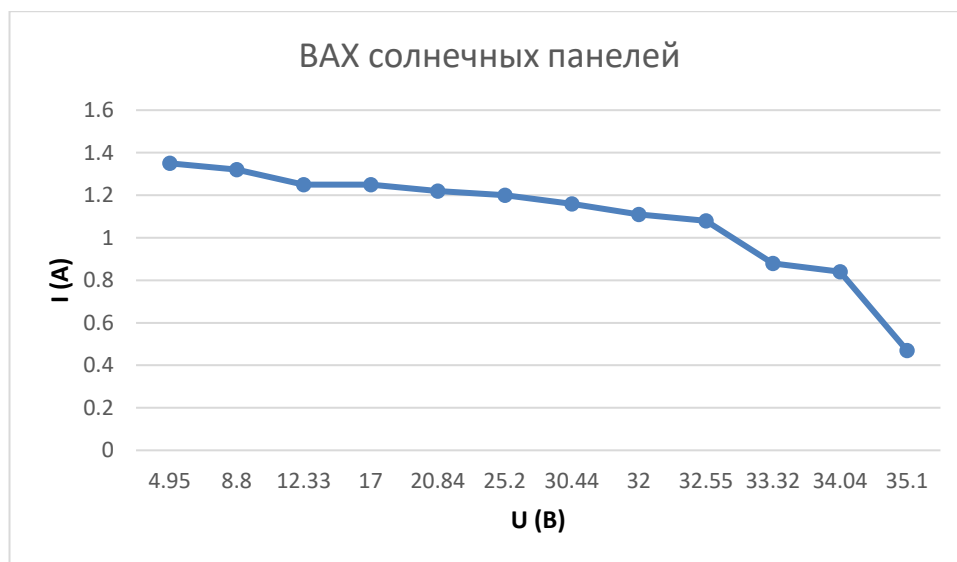


Рисунок 30 – ВАХ солнечных панелей

На основе таблицы 8 мощность солнечных панелей была принята 35Вт.

Также мы учитываем следующие ограничения:

Максимальный ток реле: 10А

Максимальный ток инвертора: 1,04А

Расчёт токов во всех ветвях показал, что выбранные ранее сопротивления удовлетворяют данным требованиям (приложение В).

### 3.3. Управление реле для переключения ветвей

Реле содержит две основные части:

- Контрольная цепь, к которой можно прикладывать напряжение до 32В (напряжение выше 3В считается высоким)
- Силовая цепь, к которой подключается нагрузка и источник переменного тока. Допустимо напряжение до 240В и ток до 25А.

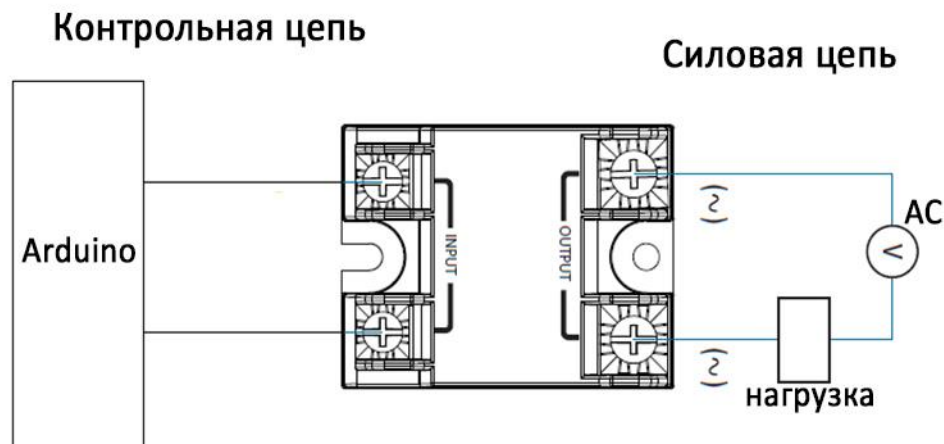


Рисунок 31 - Схема реле

Для контролирующей цепи использован Arduino Mega 2560, который формирует желаемую форму сигнала. Применен порт, позволяющий формировать напряжение 5В максимум.

Ниже приведен используемый для Arduino код. Он не является финальным, но позволяет провести необходимые для теста операции.

```

test
char S1 = 53; //Define the pin of the switch 1
char S2 = 51; //Define the pin of the switch 2
void setup()
{
  pinMode(S1, OUTPUT); //Define it as an output
  pinMode(S2, OUTPUT); //Define it as an output
  digitalWrite(S1, LOW); //The initial state of the pin is low which means the switch is opened
  digitalWrite(S2, LOW); //The initial state of the pin is low which means the switch is opened
  delay(3000); // We wait 3s to start the first control
  digitalWrite(S1, HIGH);
  digitalWrite(S2, LOW);
  delay(1000); // The duration of the first switch
  digitalWrite(S1, LOW);
  digitalWrite(S2, LOW);
  delay(4000); // Duration between both switches
  digitalWrite(S1, LOW);
  digitalWrite(S2, HIGH);
  delay(1000); // The duration of the second switch
  digitalWrite(S1, LOW);
  digitalWrite(S2, LOW);
}
void loop()
{

```

Рисунок 32 – Код для Arduino

В качестве источника переменного тока используется автотрансформатор, подключенной к сети 220В, в качестве нагрузки – сопротивления. Используя осциллограф, возможно визуализировать выход реле. Полученный сигнал изображен ниже

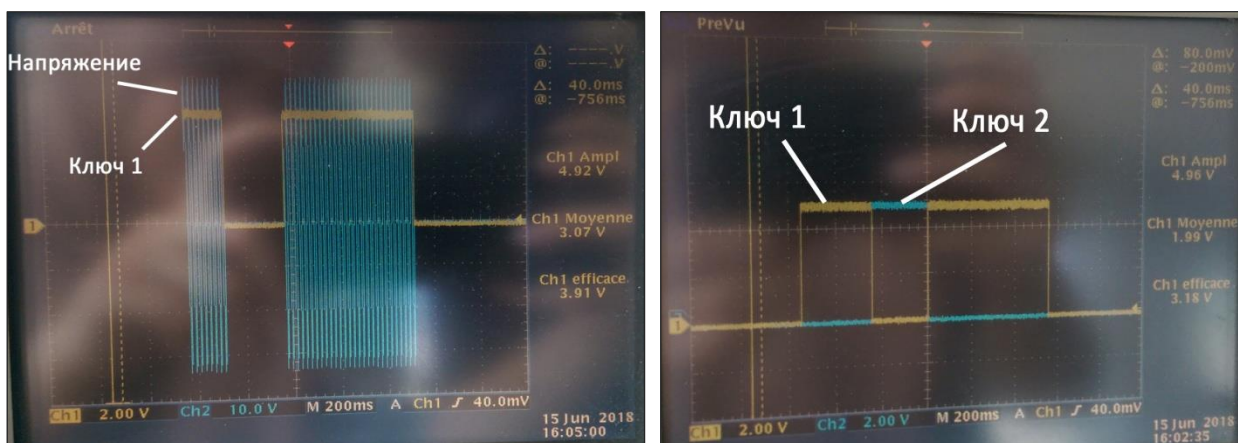


Рисунок 33 – Результаты работы реле

Для проводимого эксперимента достаточно одного реле. При низком уровне напряжения у него замкнута одна пара контактов, при высоком – другая. Вместе они моделируют ключи для переключения блоков сопротивлений эмулятора. На рисунке 33 слева изображен тест реле. Видно, что при замыкании ключа на нагрузке имеется напряжение, при отключении ключа напряжение равняется нулю.

## 4. Тестирование и анализ применения эмулятора

### 4.1. Сравнение результатов физического эксперимента и PSIM моделирования

Была собрана тестовая модель эмулятора на основе схемы и с параметрами оборудования, рассчитанными в предыдущей главе (рисунок 34).

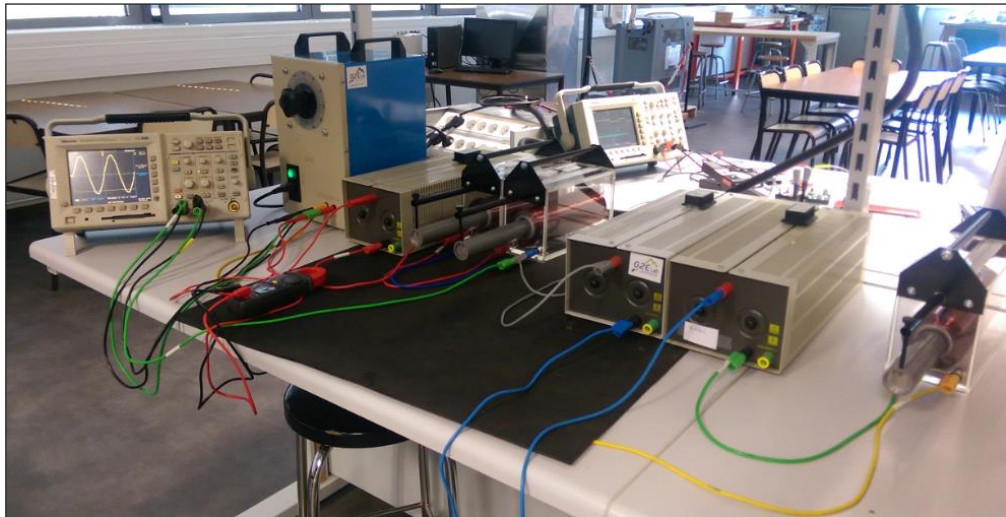


Рисунок 34 – Тестовый стенд эмулятора

Для сравнения экспериментальных результатов с расчетными использовалась следующая схема в программе PSIM.

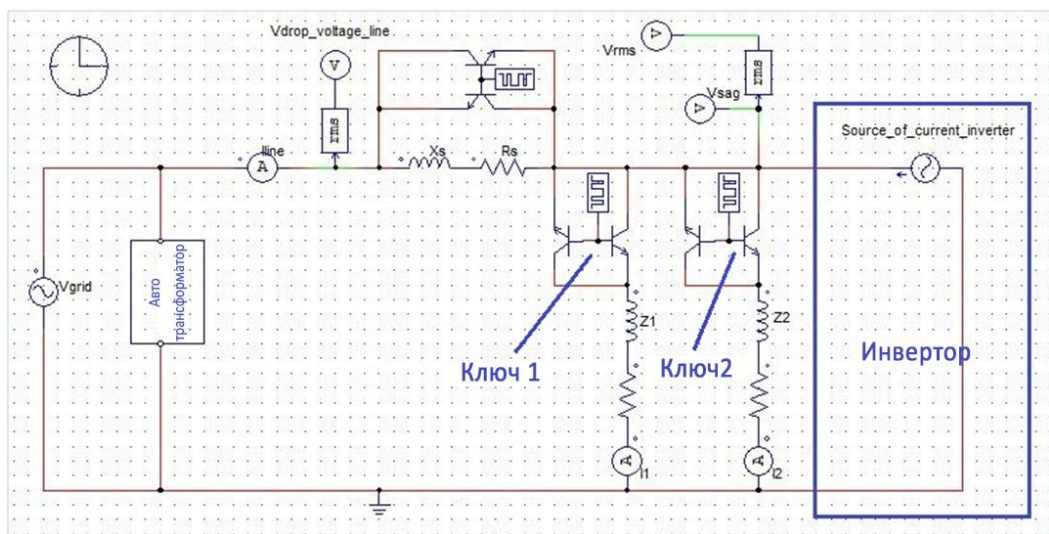


Рисунок 35 – Схема эмулятора в PSIM

Шунтирующий ключ для линии  $Z_s$  позволяет работать в нормальном режиме без провалов напряжения. Все ключи представлены двумя разнополюсными транзисторами, чтобы реализовать бинаправленность ключа.

#### *Тест при напряжении 50В*

Первый тест проводился без инвертора, с выходным напряжением автотрансформатора 50В. Для эксперимента использовались сопротивления, которые рассчитывались без учета инвертора, а также соответствующая модель в PSIM. Подключенный осциллограф отображал напряжение на автотрансформаторе и после эмулятора.

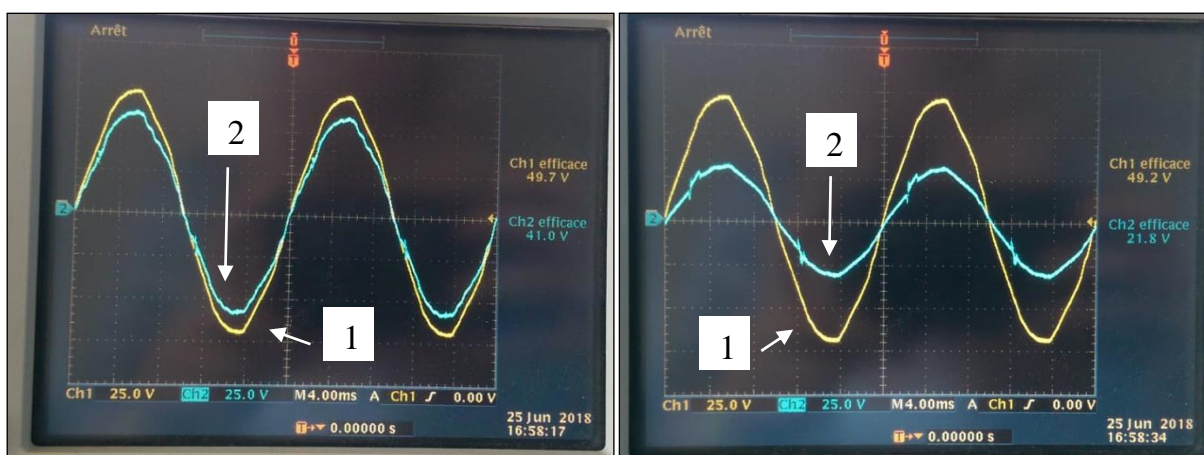


Рисунок 36 – Напряжение до эмулятора (1) и после (2)

Соответствующие результаты для модели в PSIM

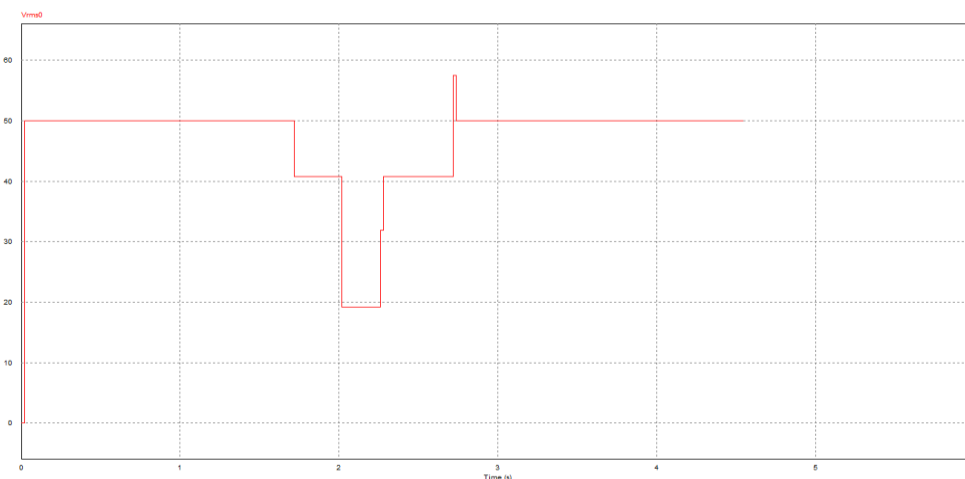


Рисунок 37 – Напряжение после эмулятора в PSIM



Как можно видеть, результаты, смоделированные в программе и полученные в эксперименте практически совпадают. Расхождение в 2,5% для второго провала напряжения можно объяснить погрешностью измерительных приборов, используемых элементов и аппроксимацией расчетов.

Таблица 9 – Сравнение смоделированных и экспериментальных значений остаточного напряжения в результате провалов

	Теоретическое (PSIM)	Экспериментальное
$V_{drop1}$ , В	41	41
$V_{drop2}$ , В	19	21,8

Осциллограмма тока для того же процесса показывает, что наибольший ток протекает именно при создании самого глубокого провала напряжения.

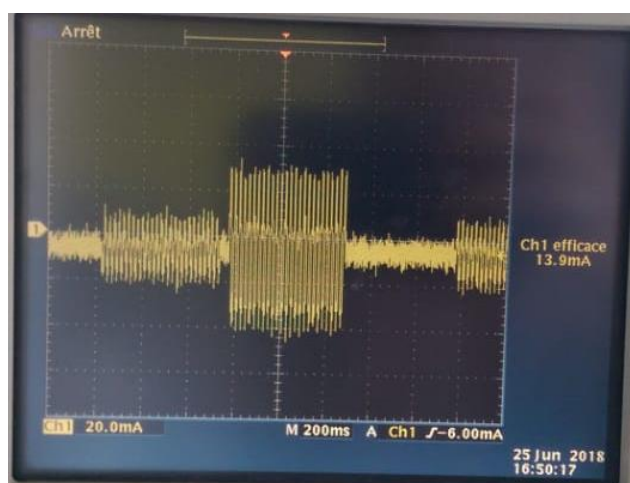


Рисунок 38 – Осциллограмма тока при работе эмулятора

### *Тест при напряжении 230В*

Следующий эксперимент проводился под напряжением 230В. На основании рисунка 39 можно провести сравнение результатов замера напряжения в эксперименте на осциллографе и в модели PSIM.

Таблица 10 – Сравнение значений остаточного напряжения

	Теоретическое (PSIM)	Экспериментальное
$V_{\text{drop1}}$ , В	185	192
$V_{\text{drop2}}$ , В	87	99

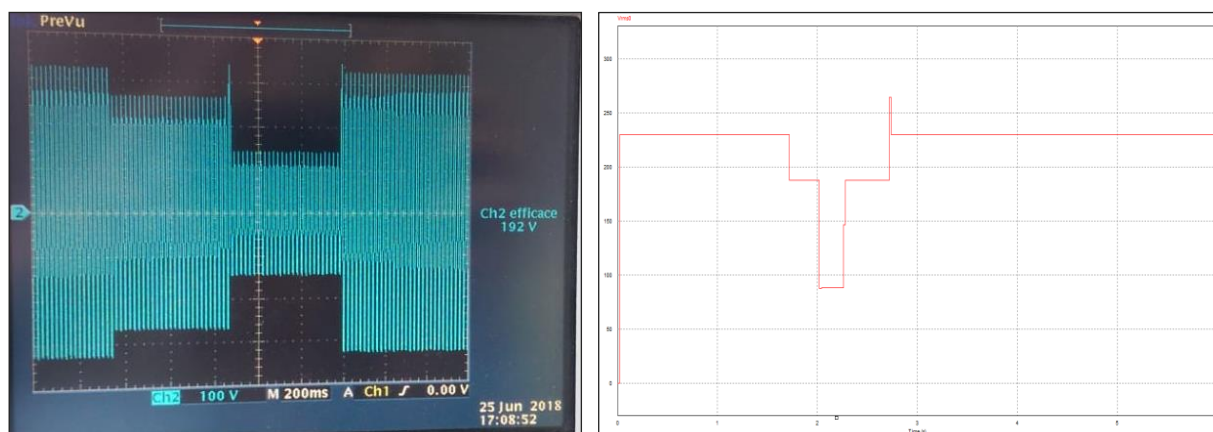


Рисунок 39 – Осциллограмма напряжения при работе эмулятора и соответствующие результаты в PSIM

Расхождение показаний для второго провала напряжения можно объяснить теми же причинами, что и для теста под напряжением 50В. На рисунке 40 изображено влияние работы эмулятора на сеть. Погрешности лежат в пределах 5В, что ниже  $\pm 5\%$  и удовлетворяет требованиям.

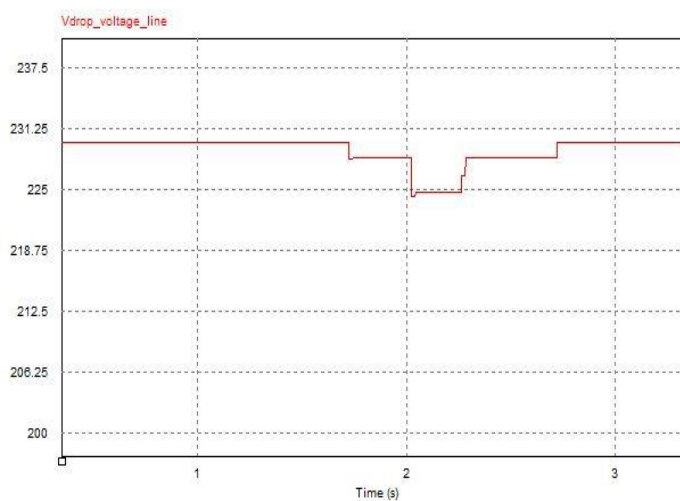


Рисунок 40 – Напряжение в остальной сети при работе эмулятора



### *Тест под напряжением 230В с инвертором*

В следующем эксперименте к тестовой модели добавлен инвертор. В PSIM инвертор смоделирован источником тока. Полагается, что среднеквадратичное значение тока инвертора в течение опыта не менялось.

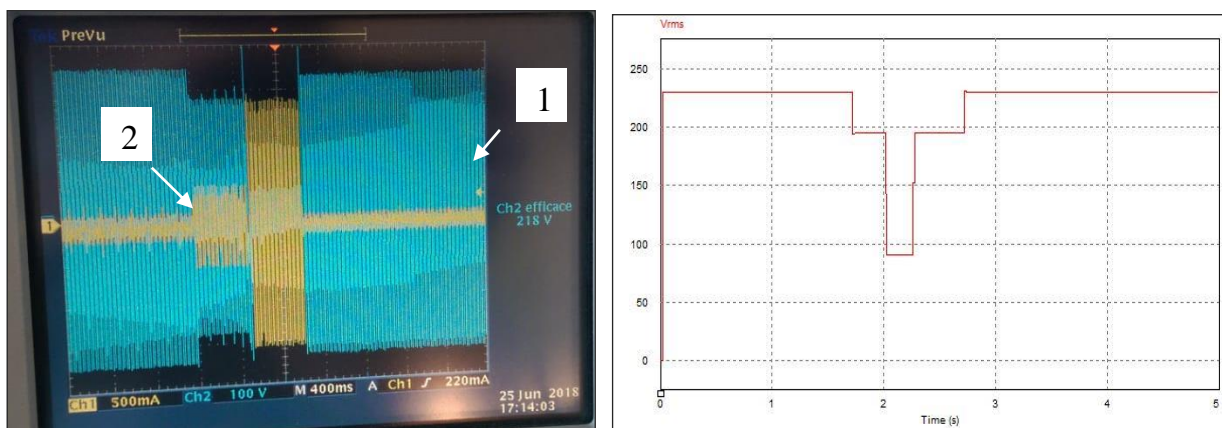


Рисунок 41 – Осциллограмма напряжения (1) и тока (2) при работе эмулятора и соответствующий результат расчета напряжения в PSIM

С инвертором напряжение до срабатывания ключей и во время него было выше, что объясняется дополнительным током от инвертора. Поэтому остаточные напряжения для первого и второго провала напряжения близки к 200В и 100В соответственно. Экспериментальные и теоретические результаты показали близкие значения.

Используемый в тестировании инвертор по документам должен отключаться при провале напряжения ниже 188 В. В ходе проведенного теста он частично подтвердил соответствие своих защит его LVRT характеристике, отключаясь при втором провале напряжения (100В).

## **4.2. Использование записывающего устройства**

Для дальнейших экспериментов применено записывающее устройство, предоставленное компанией EDF. Проведены три теста с

изменением поведения ключей (реле), чтобы исследовать реакцию инвертора на формируемые провалы напряжения.

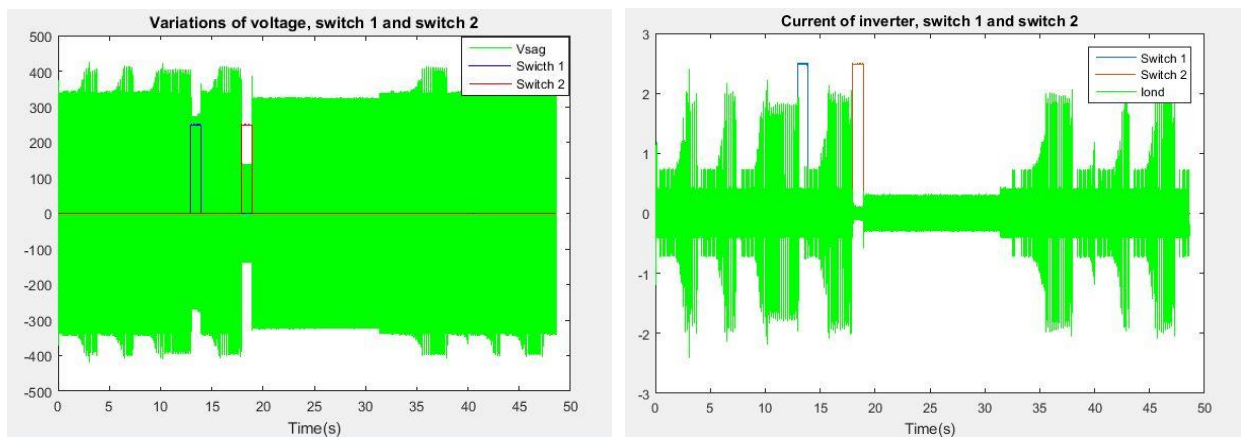


Рисунок 42 – Графики напряжения и тока при  $V_{\text{drop1}} = 200$  В в течение 1 с и  $V_{\text{drop2}} = 100$  В в течение 1 с

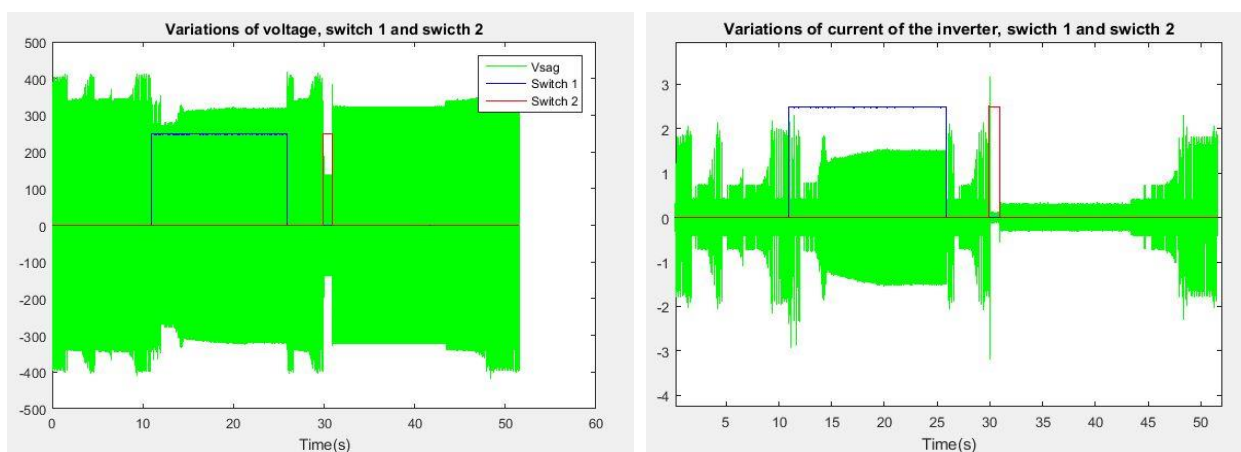


Рисунок 43 – Графики напряжения и тока при  $V_{\text{drop1}} = 200$  В в течение 15 с и  $V_{\text{drop2}} = 100$  В в течение 1 с

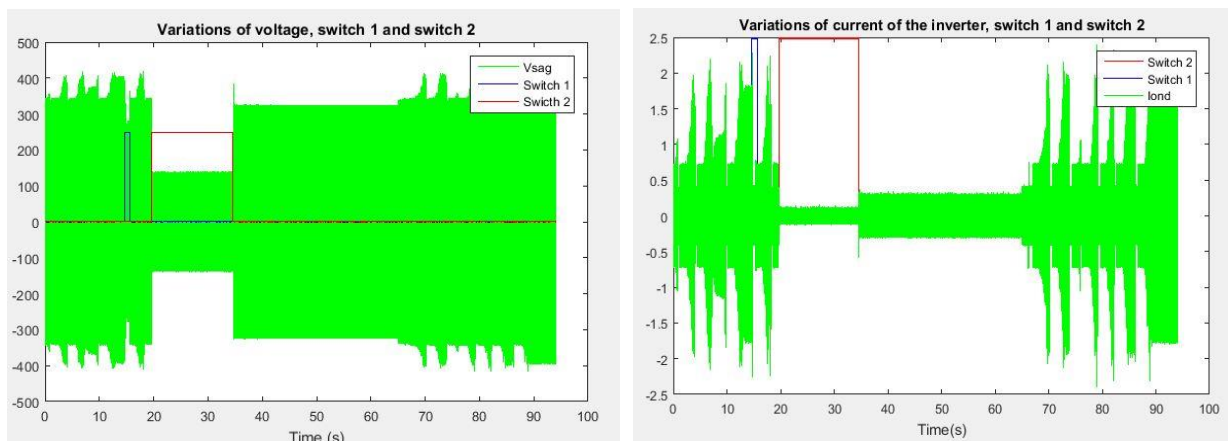


Рисунок 44 – Графики напряжения и тока при  $V_{\text{drop1}} = 200 \text{ В}$  в течение 1с и  $V_{\text{drop2}} = 100 \text{ В}$  в течение 15с

Из приведенных графиков можно сделать несколько выводов. Во-первых, можно заметить, что с инвертором нестабильны ток и частично напряжение. При этом данное явление наблюдается даже в течение стационарной работы до и после окончания провалов напряжения. Связано это в первую очередь с самим инвертором, непрерывно осуществляющим отслеживание точки максимальной мощности (MPPT), в связи с чем меняется поступающий в сеть ток.

Во-вторых, основная цель эмулятора – проверить срабатывание защиты инвертора при провалах напряжения. Мы можем подтвердить, что происходит отключение инвертора на основании следующих фактов:

- Ток близок к нулю. Вопреки ожиданиям, на протяжении всех трех тестов значение тока при провале напряжения 100В было выше нуля. Это может быть связано с погрешностями измерительного оборудования, дополнительными токами из-за дефектов автотрансформатора или с инвертором, который пытается восстановить соединение. Поэтому будем считать, что инвертор отключен, если значение тока существенно меньше, чем в стационарном режиме.

- Отсутствие MPPT в характеристике тока. Как уже было отмечено, в работе инвертор постоянно осуществляет MPPT, поэтому если форма тока неизменна, то инвертор скорее всего отключен.

Тест 1: После первого провала напряжения, соответствующего замыканию ключа 1, инвертор все еще находится в работе согласно осциллограмме тока. При втором провале напряжения, остаточное напряжение которого ниже уставки инвертора, инвертор отключается, значение тока сильно снижается. После размыкания ключа 2 ток все еще остается стабильным и низким, то есть инвертор все еще отключен, но спустя примерно 12 секунд он восстанавливает соединение и снова начинается процесс МРРТ – ток возрастает и постоянно меняет значение.

Тест 2: Инвертор остается в работе при первом провале напряжения, несмотря на то, что он длится 15 секунд и остаточное напряжение близко к уставке 188В (200В). При втором провале напряжения ситуация аналогична первому тесту.

Тест 3: Первый провал напряжения аналогичен тесту 1. При втором провале напряжения, который длится 15 секунд, значение тока минимально на всём его протяжении. После отключения ключа 2 время восстановления соединения у инвертора дольше, чем в тесте 1, то есть оно также зависит от времени провала напряжения.

#### 4.3. Анализ изменения напряжения в ходе эмуляции

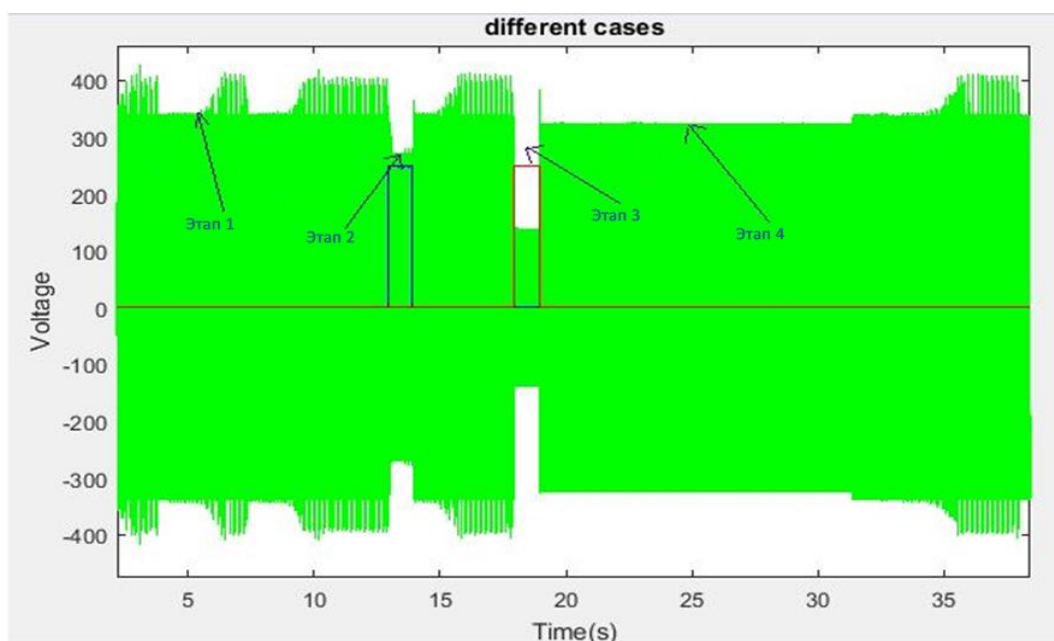


Рисунок 45 – График напряжения в ходе эмуляции

Проведем анализ изменения напряжения с подключенным инвертором и без него в ходе опытов (рисунок 45).

Во время этапа 1 инвертор подключен к системе. Если мы уменьшим рассматриваемый промежуток времени (рисунок 46), то увидим, что синусоида искажена, что связано с гармониками, генерируемыми инвертором.

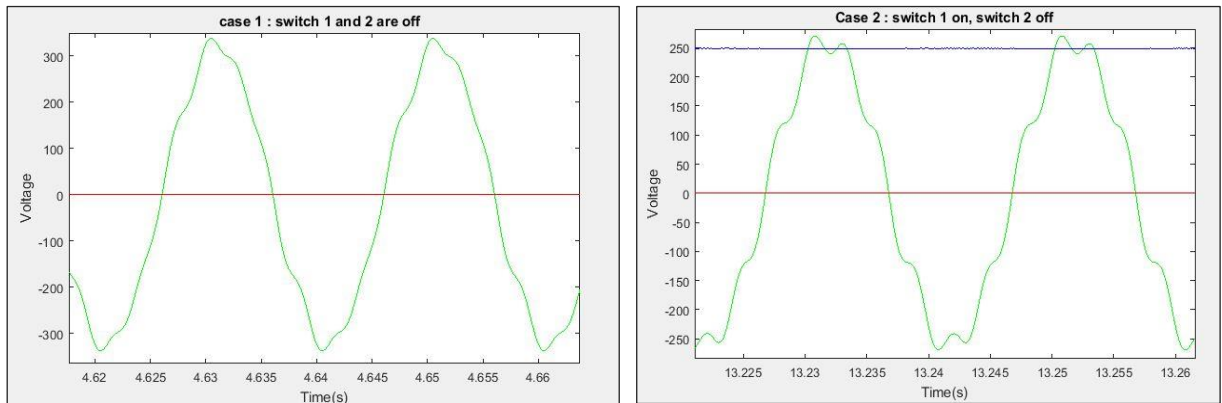


Рисунок 46 – Напряжение при отключенных ключах (слева) и при включенном первом ключе (справа)

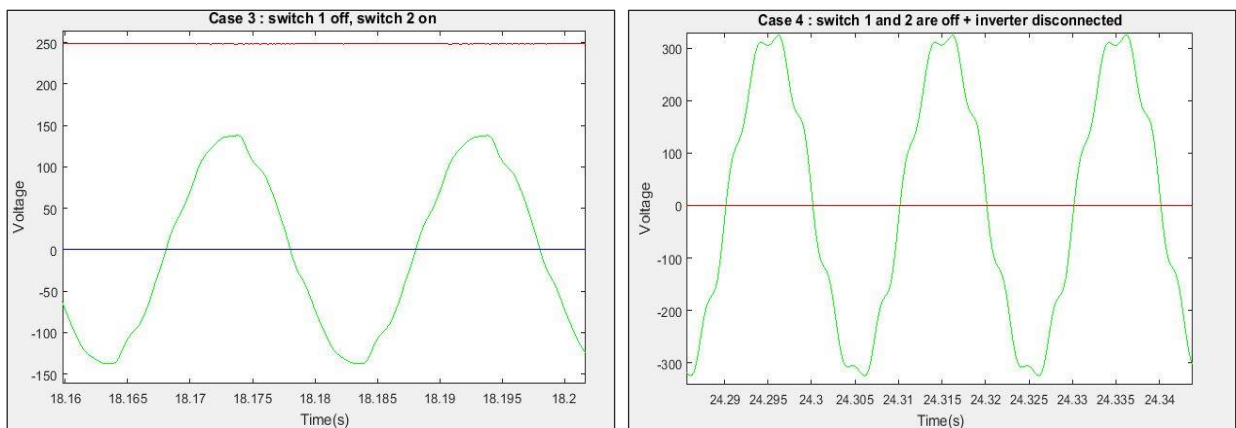


Рисунок 47 – Напряжение при включенном втором ключе (слева) и при отключенных ключах и инверторе (справа)

На втором этапе при включенном первом ключе ситуация примерно аналогична, так как инвертор все еще подключен (напряжение выше уставки

инвертора), но подключение блока сопротивлений создало дополнительные искажения.

На третьем этапе при включении второго ключа инвертор отключается, вследствие чего сигнал становится близок к идеальной синусоиде.

На последнем этапе можно предположить, что инвертор начинает попытки переключиться, что создает дополнительные искажения сигнала.

#### 4.4. Расчет пределов применения эмулятора относительно максимальных значений тока

При расчете эмулятора для СЭС Корсики будем использовать схему, изображенную на рисунке 28. Рассмотрим самый худший вариант, когда инвертор должен быть отключен, но этого не происходит. В результате мы имеем большие изменения тока.

Построим диаграмму напряжений и токов.

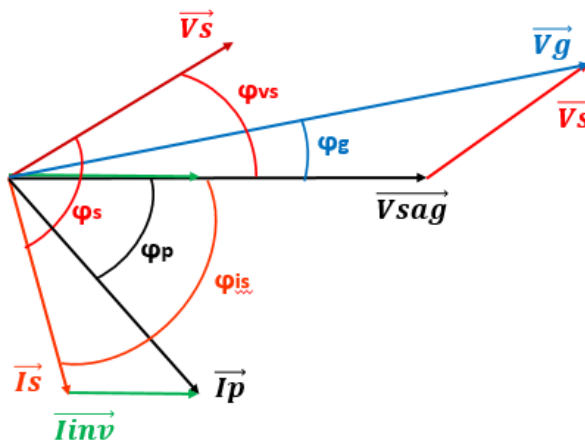


Рисунок 48 – Диаграмма напряжений и токов

Перепишем уравнения (10)-(13) для данной диаграммы.



$$\begin{cases} V_s * \sin(\varphi_{vs}) = V_g * \sin(\varphi_g) & (10) \\ V_s * \cos(\varphi_{vs}) = V_g * \sin(\varphi_g) - |V_{sag}| & (11) \\ \frac{V_s}{|Z_s|} * \sin(\varphi_{vs} + \varphi_s) = I_p * \sin(\varphi_p) & (12) \\ \frac{V_s}{|Z_s|} * \cos(\varphi_{vs} + \varphi_s) + I_{inv} = I_p * \cos(\varphi_p) & (13) \end{cases}$$

При работе с данной системы уравнений было замечено, что решения существуют не при любых условиях. Если ток инвертора слишком большой, то решений нет. Выразим его из приведенной выше системы:

$$I_{inv}(\phi_{vs}, \phi_g) = \frac{V_g \sin(\phi_g) \sin(\phi_{vs} + \phi_s)}{Z_s \cos(\phi_{vs}) \sin(\phi_p)} \cos(\phi_p) - \frac{V_g \sin(\phi_g)}{Z_s \cos(\phi_{vs})} \cos(\phi_{vs} + \phi_p) \quad (14)$$

Вначале проверим, как на максимальный ток влияют такие параметры как напряжение сети и величины сопротивлений эмулятора. Для этого зафиксируем значения  $\phi_{vs}$  и  $\phi_g$  и построим трехмерный график в программной среде Mathcad (рисунок 49).

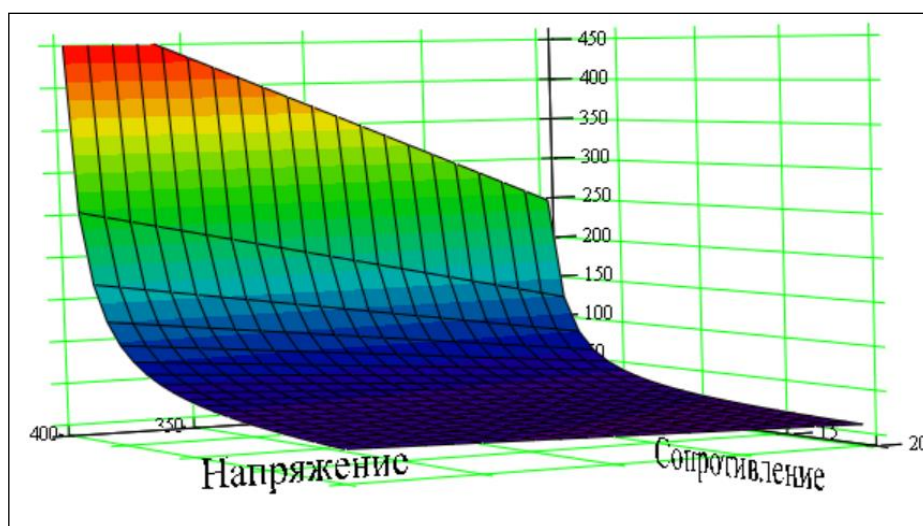


Рисунок 49 - Поверхность лимита тока от напряжения и сопротивления

В итоге на графике наглядно отображено, что при повышении напряжения или снижении сопротивления максимальный возможный ток

инвертора растёт. Но мы не можем уменьшить значения сопротивлений, так как они ограничены условиями, указанными в разделе 2.4. Следовательно, оставшейся возможностью является увеличение напряжения. Но напряжения инверторов и трансформаторов уже заданы заранее. Поэтому выбор ограничивается возможностью размещения непосредственно после инвертора на стороне низкого напряжения. При этом эмулятор рассчитывается на мощность только одного модуля СЭС или размещением после трансформатора с более высоким напряжением, но и большей мощностью всей СЭС.

Также исследуем зависимость максимального тока от двух углов. Углы  $\phi_s$  и  $\phi_p$  зафиксируем на значении 0,85. Зависимость приведем для напряжения 400В (после инвертора) и 20кВ (после трансформатора)

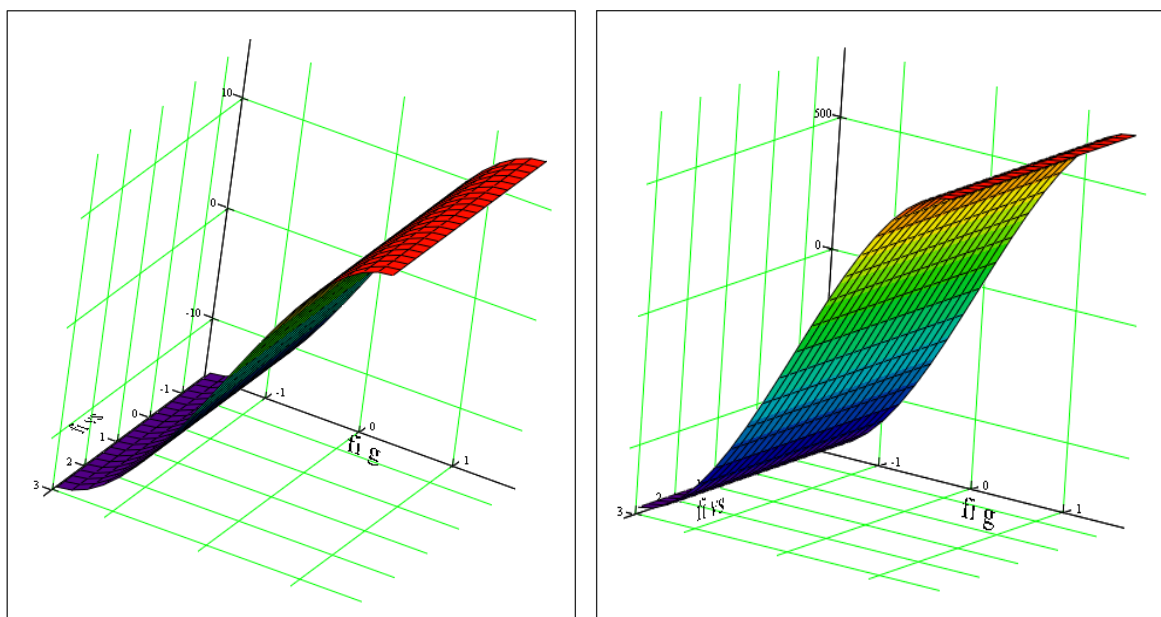


Рисунок 50 - Поверхность лимита тока для 400В (слева) и 20кВ (справа) от  $\phi_{vs}$  и  $\phi_g$

У тока нет явно выраженной зависимости от  $\phi_{vs}$ , но он существенно зависит от  $\phi_g$  и максимален при значении  $90^\circ$ . Кроме этого максимальный возможный ток примерно в 50 раз выше при использовании напряжения 20кВ, тогда как мощность выше только в 8 раз. Максимальный ток инвертора крайне важная величина, так как она по факту определяет максимальную



мощность СЭС, к которой можно подключить предлагаемый эмулятор. В связи с этим эффективней выбрать размещение после трансформатора на напряжении 20кВ, что позволит создать все необходимые уровни провала напряжения.

Дальнейшие вычисления для величин сопротивлений эмулятора аналогичны используемым ранее, поэтому не приводятся.

Важно отметить, что при увеличении мощности СЭС, увеличивается и стоимость эмулятора. Связанно это не в последнюю очередь с необходимостью рассеивания мощности, для чего необходимо специальное оборудование, что и увеличивает конечную стоимость.

#### 4.5. Совместимость эмулятора с различными СЭС

Проведем тестирование совместимости эмулятора с другими СЭС, так как мобильность устройства требуется именно по причине необходимости использовать его сразу на нескольких электростанциях. Тестирование проведем в программе PSIM для рассчитанного под СЭС о. Корсика эмулятора при различных мощностях СЭС и сопротивлениях линии.

##### *Тесты для мощности в 1МВт*

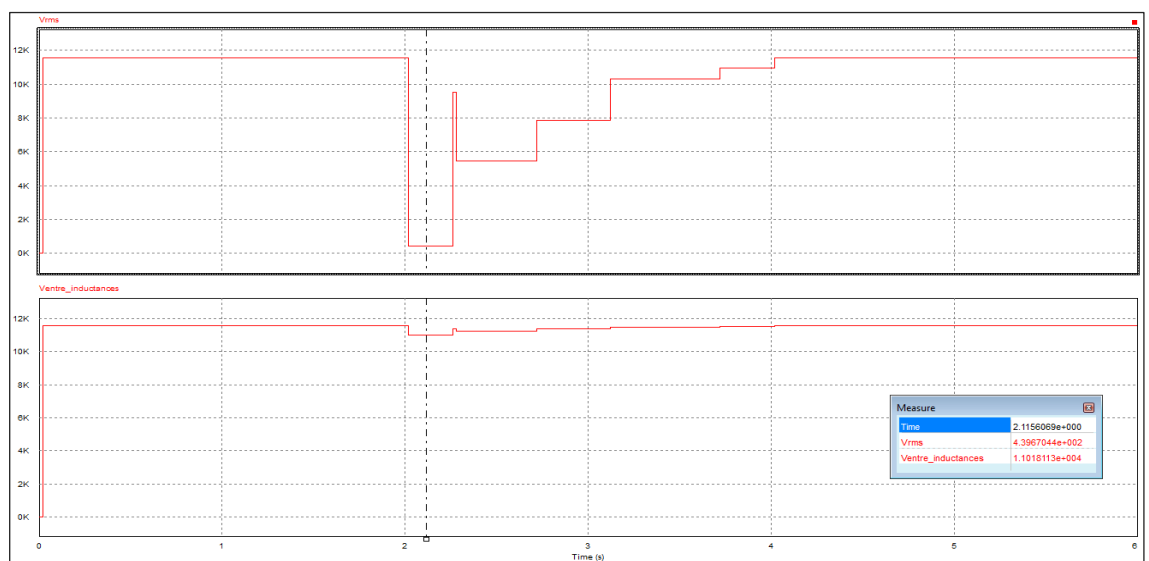


Рисунок 51 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при характеристиках линии  $R=0,7$  Ом,  $X=0,8$  Ом

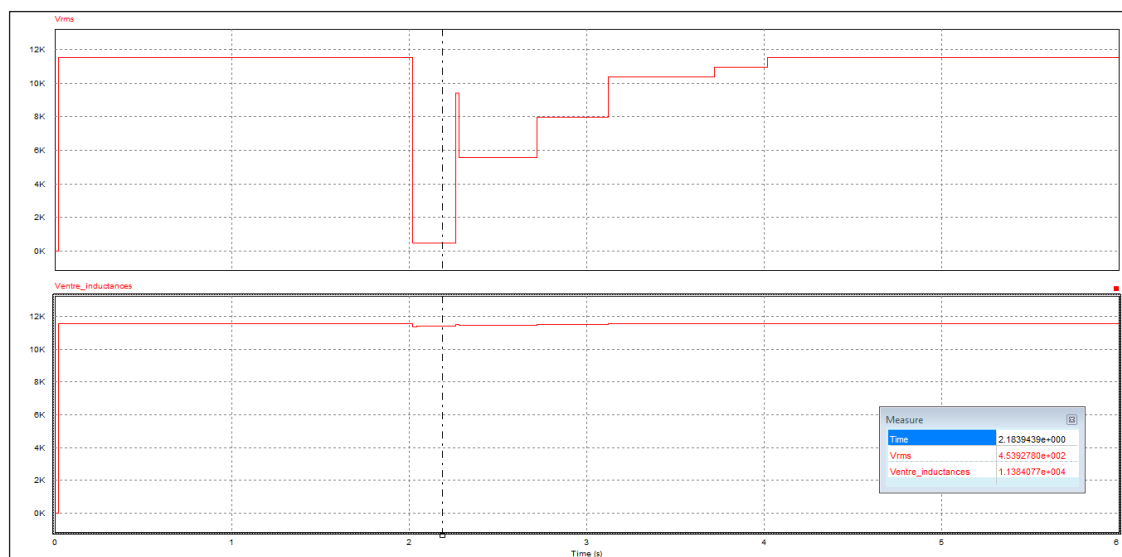


Рисунок 52 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при характеристиках линии  $R=0,4 \text{ Ом}$ ,  $X=0,07 \text{ Ом}$

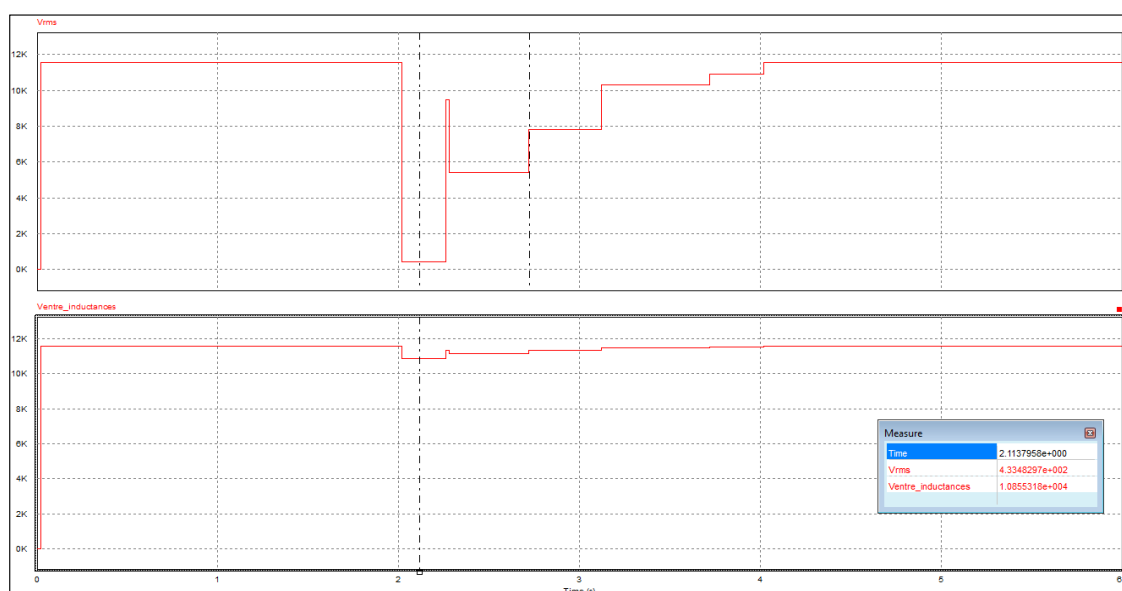


Рисунок 53 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при характеристиках линии  $R=1 \text{ Ом}$ ,  $X=1 \text{ Ом}$

Из приведенных выше характеристик можно заключить, что эмулируемый провал напряжения не зависит от сопротивления линии. Тем не менее, тот же эмулятор оказывает разное влияние на сеть с различным импедансом. При его увеличении в сети возникает больше возмущений. Соответственно, для уменьшения возмущений необходимо повысить номиналы сопротивлений эмулятора, но это в свою очередь приведет к

увеличению рассеиваемой мощности. В связи с этим рекомендуется провести точный анализ СЭС, на которых возможно использование данного эмулятора, чтобы найти компромисс между влиянием на сеть и стоимостью.

### *Тесты для сопротивления линии $R=0,7\text{ Ом}$ , $X=0,8\text{ Ом}$*

Зафиксируем значение сопротивления линии, но рассмотрим разные мощности СЭС.

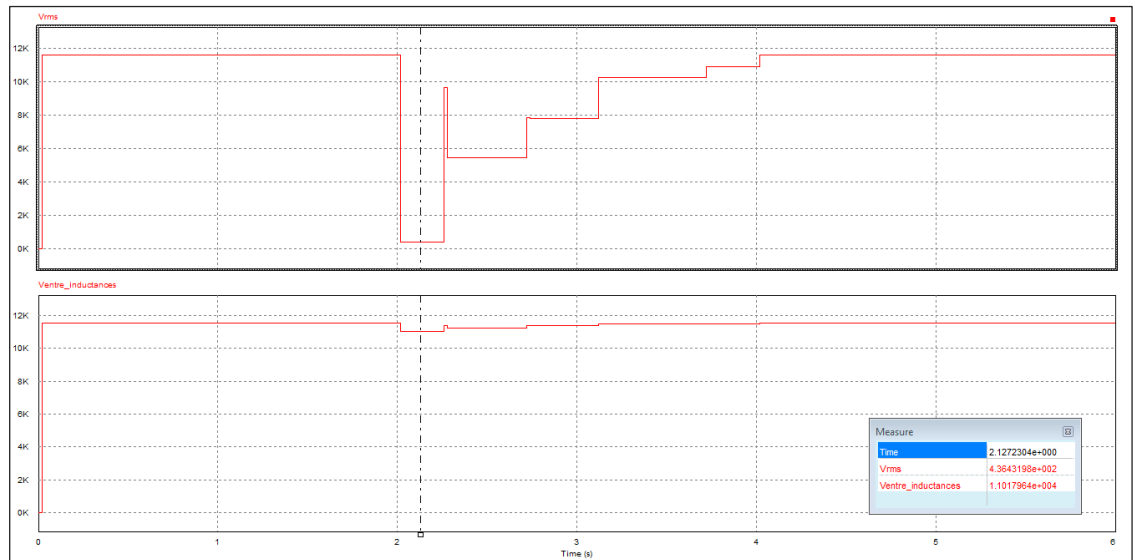


Рисунок 54 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при мощности СЭС 800кВт

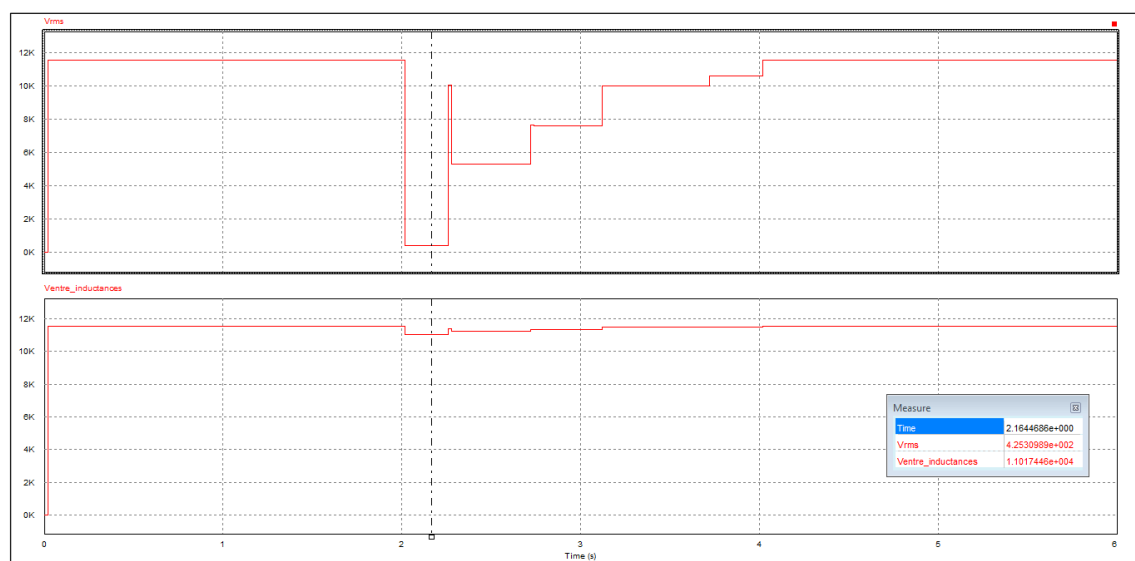


Рисунок 55 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при мощности СЭС 100кВт

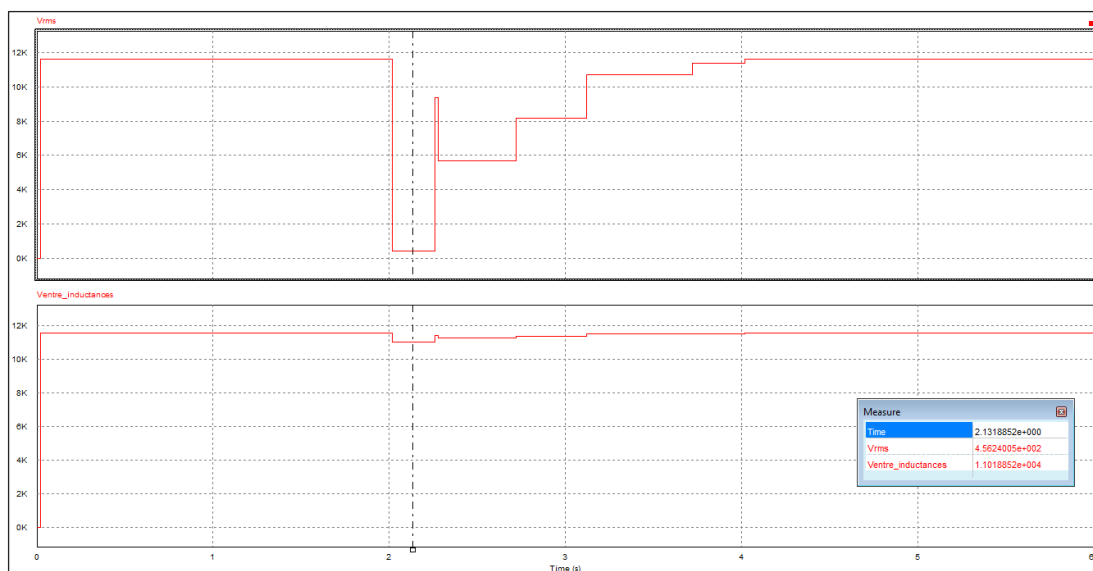


Рисунок 56 – Провал напряжения после эмулятора и реакция сети при мощности СЭС 2000кВт

Можно заключить, что форма характеристики провала напряжения не зависит от мощности СЭС. Но при этом стоит помнить о существовании пределов по мощности, выше которых эмулятор при данном напряжении не способен создать нужную характеристику, поэтому превышать их не следует.

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклады в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ»
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премияльный коэффициент 10%; Коэффициент доплат и надбавок 10%; Накладные расходы 10%; Районный коэффициент 30%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 27,1 %

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения проекта	Анализ потребителя, конкурентных технических решений, SWOT-анализ.
2. Организация и планирование работ	- Определение структур работ; - Определение трудоемкости работ; - Разработка диаграммы Ганта.
3. Формирование бюджета затрат на научно-исследовательский проект, Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет сметы затрат на исследование: - Материальные затраты; - Заработная плата (основная и дополнительная); - Отчисления во внебюджетные фонды; - Затраты на электроэнергию; - Накладные расходы.

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График Ганта и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Латышева Елена Владимировна	к.ф.н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич		

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Данная научно-исследовательская работа (НИР) направлена на разработку эмулятора, способного генерировать в сети в непосредственной близости от фотоэлектрических электростанций заданную характеристику провала напряжения, чтобы проверить соответствие поведения защит электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) требуемому алгоритму.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д. [20]

В связи с этим в данном разделе проводится технико-экономическое обоснование НИР. Цель технико-экономического обоснования: определить и проанализировать трудовые и денежные затраты, которые направлены на реализацию НИР.

Для достижения цели данного раздела поставлены следующие задачи:

- Определение потребителя и конкурентов
- Анализ и сравнение конкурентных технических решений
- SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон проекта
- Определение этапов работы и ее трудоемкости
- Составление план-графика
- Определение сметы затрат,
- Оценка экономической эффективности НИР.

### 5.1. Описание проекта и потенциальные потребители

Работа проводилась на примере фотоэлектрической солнечной электростанции (СЭС) мощностью 4000 кВА, принадлежащей компании расположенной на острове Корсика. СЭС состоит из 8 блоков по 500 кВА, каждый со своим инвертором. На выходе каждого инвертора напряжение 400В. Вся СЭС подключена к сети через повышающий трансформатор 0,4/20 кВ.

В последние годы на Корсике растёт мощность возобновляемых источников энергии, в первую очередь СЭС, доля которых в общем энергобалансе становится существенной. В связи с этим, отсутствие учёта специфики работы данного вида генерации может привести к серьёзным аварийным ситуациям, что ведет к необходимости использования сетевых кодексов для СЭС. Соответствие работы сетевым кодексам может предотвратить развитие аварийного режима, и даже блэк-аута для всей сети.

Сетевой кодекс – определенный свод указаний, который предписывает определенный минимум правил для всех участников рынка по подключению к энергетической сети, а также поддержанию её надежности, стабильности и безопасности.

Применение мобильных эмуляторов для тестирования соответствия поведения защит СЭС требуемому алгоритму актуально для всех энергетических компаний и владельцев электростанций на основе возобновляемых источников энергии. Тем не менее, заказчиком данного проекта являлась французская энергетическая компания Électricité de France (EDF), поэтому именно она и рассматривается как **основной и целевой потребитель**.

## 5.2 Анализ конкурентных технических решений

Всего выделяют 4 основных типа эмуляторов [21]:

### 1) Эмулятор на основе делителя напряжения

Данная система использует различные импедансы, через которые сеть, как правило, замыкается на землю. В результате можно создать нужное напряжение, регулируя величину импеданса. Также необходимо комплексное сопротивление, установленное последовательно с сетью, чтобы ограничить влияние провалов напряжения, создаваемых эмулятором, но остальную сеть.

### 2) Эмулятор на основе синхронного генератора

Дизельный двигатель вращает синхронный генератор. Через контроль его поля возбуждения мы можем контролировать реактивную мощность, а, следовательно, и напряжение.

К сожалению, синхронные машины имеют симметричное поведение, в связи с этим благодаря данному эмулятору возможно создавать только симметричные провалы напряжения. С другой стороны, изменяя скорость вращения дизельного двигателя, можно изменять частоту напряжения, которое создает генератор, то есть проводить также опыты для пониженной и повышенной частоты. Другой существенный недостаток – движущиеся части, подверженные ускоренному износу, а также довольно существенные габариты. Данный тип использует немецкая фирма DEWI GmbH.

### 3) Эмулятор на основе трансформатора

Это решение содержит трансформатор, а также систему управления отпайками, которая позволяет контролировать выходное напряжение. Возможно создание как пониженного, так и повышенного напряжения. Но эмулятор очень громоздок и генерирует гармоники. Данный тип использует испанская компания Barvolento.

### 4) Эмулятор на основе двухзвенного преобразователя



Данная система состоит из двухзвенного преобразователя. Поток мощности регулируется контролем звена постоянного напряжения. Обладает малыми габаритами и высокой точностью, но из-за большого количества полупроводниковых деталей характеризуется низкой надежностью, особенно при транспортировке, а также требует сложной системы контроля. Данный тип используется в Кильском университете, Германия.

Учтем, что нас интересует в данной работе только эмуляция пониженного напряжения без необходимости создавать перенапряжение. Дополнительно работа эмулятора по тестированию СЭС не должна оказывать существенного влияния на остальную сеть (изменение напряжения более чем на 5%). Кроме этого, решение должно быть мобильным, так как эмулятор необходимо применять для различных СЭС, а также обладать высокой надежностью даже в условиях транспортировки.

Разработанный нами эмулятор на основе делителя напряжения обладает такими преимуществами как простота, низкое влияние на остальную сеть, легкий вес и довольно точное соответствие желаемой характеристике

Сравним все 4 рассматриваемых типа эмулятора по основным техническим характеристикам (таблица 11). Произвести точную экономическую оценку и экономическое сравнение предлагаемого решения с конкурентами не представляется возможным ввиду B2B характера продукта – цены на услуги и продукт отсутствуют в открытом доступе. Тем не менее, можно утверждать, что по себестоимости комплектующих и производства предлагаемая разработка является самой выгодной.

Для таблицы 11 зададим следующие обозначения:

Ф – собственное решение,

К1 - эмулятор на основе синхронного генератора,

К2 - эмулятор на основе трансформатора,

КЗ - эмулятор на основе двухзвенного преобразователя.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Вес показателей в сумме составляет 1.

Таблица 11 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	Б <sub>к3</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>	К <sub>к3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>									
1. Вес и габариты	0,15	4	3	2	4	0.6	0.45	0.3	0.6
2. Надежность	0,2	4	3	4	3	0.8	0.6	0.8	0.6
3. Мобильность	0,2	5	3	2	4	1	0.6	0.4	0.8
4. Точность контроля и рег-ки	0,1	3	4	3	5	0.3	0.4	0.3	0.5
5. Легкость контроля	0,05	5	3	4	2	0.25	0.15	0.2	0.1
6. Генерация гармоник	0,1	3	5	5	2	0.3	0.5	0.5	0.2
7. Регулирование и напряжения и частоты	0,1	3	5	3	5	0.3	0.5	0.3	0.5
8. Ориентировочное количество и стоимость комплектующих	0,1	5	4	4	2	0.5	0.4	0.4	0.2
<b>Итого</b>	<b>1</b>					<b>4.05</b>	<b>3,6</b>	<b>3,2</b>	<b>3,5</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

B<sub>i</sub> – балл i-го показателя.

Для разработанного эмулятора конкурентоспособность равна:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,15 \cdot 4 + \dots + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 = 4,05$$

В результате проведения конкурентного анализа выявлено, что предлагаемый в проекте продукт является самым предпочтительным среди конкурентов на основе выбранных критериев оценки. Кроме того,

показатель конкурентоспособности не только выше конкурентов, но и является достаточно близким к максимуму.

Стоит отметить, что результат может отличаться в зависимости от поставленных задач. К примеру, для стационарного эмулятора в лабораторных условиях лучше подойдет вариант на основе двухзвенного преобразователя, который позволяет достичь большой точности.

### **5.3. SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

С помощью SWOT-анализа возможно определить внутренние сильные и слабые стороны проекта, что позволяет оптимальным образом оценить его преимущества и недостатки. Кроме того, по своей структуре SWOT-анализ позволяет сформулировать внешние факторы, влияющие на развитие проекта.

Возможности представляют собой предпочтительные ситуации в настоящем и в будущем, возникающие в окружающей среде проекта. В противовес возможностям определяются угрозы, представляющие нежелательную ситуацию в окружающей среде проекта, способствующую его разрушению или препятствующие развитию.

Пересечения внутренних и внешних факторов позволяют определить основные исходы их сочетания, а также продемонстрировать корреляцию тех или иных внутренних факторов с различными условиями внешней для проекта среды.

В таблице 12 представлены основные факторы, которые целесообразно учитывать в SWOT-анализе данного исследования.

Таблица 12. SWOT - анализ

	<b>Сильные стороны</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Четкое понимание того, что хочет основной потребитель (постоянная обратная связь)</li> <li>• Малые вес и габариты предлагаемого решения</li> <li>• Повышенная надежность</li> <li>• Низкая себестоимость комплектующих и сборки</li> <li>• Наличие прототипа</li> </ul>	<b>Слабые стороны</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Необходимость подготовки специализированного персонала</li> <li>• Сравнительно невысокая точность</li> <li>• Генерация дополнительных гармоник и падений напряжения в сеть</li> <li>• Отсутствие налаженного массового производства подобной аппаратуры</li> </ul>
<b>Возможности</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Увеличение объема и скорости ввода новых фотоэлектрических станций, способствующее увеличению спроса на правильный контроль этих электростанций</li> <li>• Повышение стоимости полупроводниковых приборов или медных обмоток, которые в большом количестве содержатся в аналогах</li> <li>• Повышение субсидирования на ВИЭ или обновление эл. сети по причине тревог о глобальном потеплении</li> <li>• Использование лабораторий французских и российских университетов</li> </ul>	<b>Сильные стороны и возможности</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Еще большее повышение экономической эффективности за счет использования более дешевых механических контактов и базовых элементов и материалов для эмулятора</li> <li>• Быстрое реагирование на изменении спроса и требуемой цены конечного продукта за счет непосредственной связи с конечным потребителем</li> <li>• Улучшение надежности конечного продукта за счет более дорогих элементов, стоимость которых покрывается дополнительным субсидированием</li> </ul>	<b>Слабые стороны и возможности</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Покрытие части средств на подготовку персонала за счет субсидирования</li> <li>• Улучшение точности за счет новых результатов в лабораторных условиях</li> <li>• Наладка производства эмуляторов партиями за счет высокого спроса на продукцию</li> </ul>
<b>Угрозы</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Резкое снижение стоимости газа, способствующее продолжению использования газовых электростанций вместо ВИЭ</li> <li>• Полное прекращение поддержки и субсидирования ВИЭ правительством во Франции (как это недавно произошло в Испании)</li> <li>• Резкое усложнение требований сетевых кодексов, которые будут требовать сверхточной регулировки профиля напряжения для верификации</li> <li>• Понижение стабильности сети из-за вывода из работы одного или нескольких генерирующих блоков</li> </ul>	<b>Сильные стороны и угрозы</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Использование мобильности и малых размеров эмулятора для быстрой транспортировки и размещения в наиболее благоприятное для тестов время</li> <li>• Применение эмулятора для уже существующих ВИЭ и для ВИЭ в удаленных местах, где газовые электростанции экономически не выгодны из-за трудности доставки топлива.</li> <li>• Компенсация отсутствия субсидий применением технологий с низкой себестоимостью</li> </ul>	<b>Слабые стороны и угрозы</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вывод технологии на уровень, когда она полностью экономически оправдана даже без каких-либо субсидий</li> <li>• Проведение научных исследований по повышению точности эмулятора еще до введения требований новых сетевых кодексов</li> <li>• Применение более дорогих и мощных импедансных элементов, позволяющих снизить воздействия на сеть, когда она находится в неустойчивом режиме</li> </ul>

#### 5.4. Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо правильное планирование занятости каждого участника и срок проведения отдельного этапа работы.

Изначально необходимо составление полного перечня проводимых работ, и определение исполнителей и оптимальной продолжительности. Сетевой или линейный график реализации проекта является результатом планирования работ. Использование линейного графика – наиболее удобный, простой и наглядный способ. С целью его построения сформируем список работ и их соответствие своим исполнителям в таблице 13. Основными исполнителями в проекте являются студент-инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 13 - Список работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Доля загрузки исполнителей
Формулировка задачи	НР	1
Составление технического задания на проект	НР	0,85
	И	0,15
Поиск и анализ литературы и имеющихся решений	НР	0,2
	И	0,8
Разработка календарного плана	НР	0,65
	И	0,35
Моделирование эмулятора в программных комплексах	И	1
Расчет тестового эмулятора	И	1
Сборка тестового эмулятора	НР	0,1
	И	0,9
Тестирование и анализ результатов	НР	0,2
	И	0,8
Оформление пояснительной записки	И	1

## Продолжительность этапов работ

Приступим к расчету продолжительности каждого этапа работы. Расчет осуществлялся опытно-статистическим методом, реализуемым стохастическим способом. Для определения ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ОЖ}$  воспользуемся формулой

$$t_{ОЖ} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}$$

где  $t_{\min}$  – минимальная трудоемкость работ, человеко-дней;

$t_{\max}$  – максимальная трудоемкость работ, человеко-дней.

Чтобы построить линейный график, нужно определить длительность этапов в рабочих днях и перевести полученную величину в календарные дни. Продолжительность выполнения каждого этапа рассчитана по формуле в рабочих днях,  $T_{РД}$

$$T_{РД} = t_{ОЖ} \cdot K_{ВН} \cdot K_{Д},$$

где  $t_{ОЖ}$  – трудоемкость работы, человеко-дней;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{ВН} = 1$ );

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_{Д} = 1,2$ ).

Продолжительность этапа в календарных днях,  $T_{КД}$  определяется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К},$$

где  $T_{К}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности,  $T_{К}$  рассчитывается по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}},$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );  $T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 52$ );

$T_{пд}$  – праздничные дни ( $T_{пд} = 12$ ).

$$T_K = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

В таблице 14 представлена длительность этапов работ для каждого исполнителя на каждом этапе. На основании таблицы 14 составлена диаграмма Ганта (рисунок 57), позволяющая графически отобразить начало каждого этапа и его длительность каждому участнику.

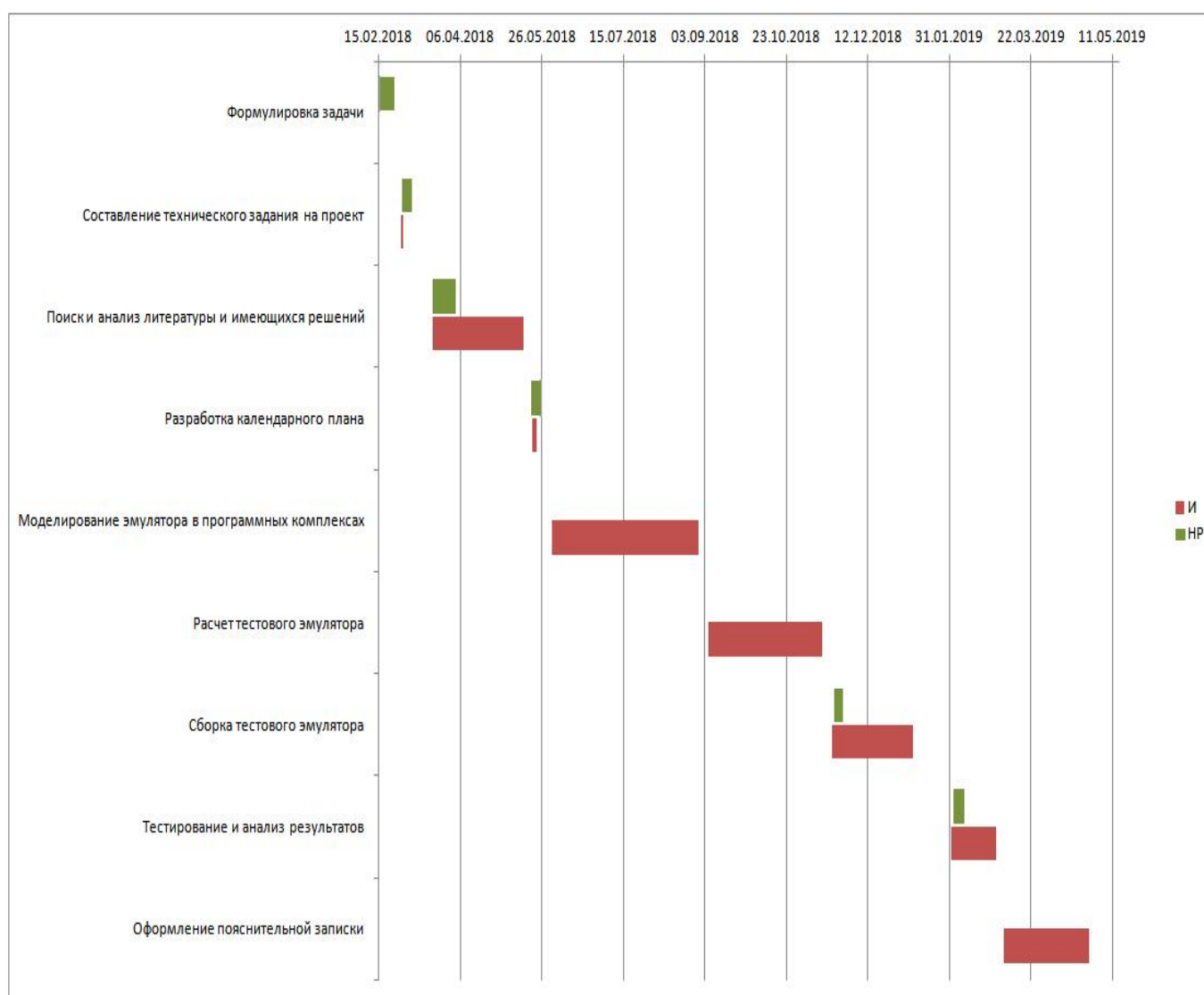


Рисунок 57. Диаграмма Ганта для проекта

Таблица 14 - Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, дни			
		t <sub>min</sub>	t <sub>max</sub>	t <sub>ож</sub>	Т <sub>РД</sub>		Т <sub>КД</sub>	
					НР	И	НР	И
Формулировка задачи	НР	4	10	6.4	7.7	0.0	9.3	0.0
Составление технического задания на проект	НР, И	4	7	5.2	5.3	0.9	6.4	1.1
Поиск и анализ литературы и имеющихся решений	НР, И	40	60	48	11.5	46.1	14.0	55.9
Разработка календарного плана	НР, И	5	8	6.2	4.8	2.6	5.9	3.2
Моделирование эмулятора в программных комплексах	НР, И	50	80	62	0.0	74.4	0.0	90.2
Расчет тестового эмулятора	НР, И	40	60	48	0.0	57.6	0.0	69.9
Сборка тестового эмулятора	И	30	50	38	4.6	41.0	5.5	49.8
Тестирование и анализ результатов	И	20	30	24	5.8	23.0	7.0	27.9
Оформление пояснительной записки	НР, И	30	45	36	0.0	43.2	0.0	52.4
<b>Итого</b>							<b>48.1</b>	<b>350.4</b>

### 5.5. Расчет сметы затрат на исследование

Затраты на создание проекта включают в себя стоимость расходов, требуемых для осуществления комплекса работ, которые составляют содержание настоящей разработки. В процессе реализации разработки расчет сметной стоимости выполнялся по нижеприведенным статьям расходов: материалы, основная заработная плата, дополнительная



заработная плата, отчисления в социальные фонды, затраты на электрическую энергию, прочие расходы.

- **Расчет затрат на материалы**

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материалов детерминируется по средней рыночной стоимости на 2019 год минимально необходимого оборудования и приведена в таблице 15.

Таблица 15. Материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	30000	1	30000
Клавиатура	1000	1	1000
Мышка	500	1	500
Принтер	3400	1	3400
Монитор	4500	1	4500
Офисная мебель			
Стол	6000	1	6000
Стул	6000	1	6000
Программное обеспечение			
Microsoft Office 365	5200	1	5200
Matlab Simulink	65000	1	50000

Расходы на материалы составили  $C_{\text{мат}} = 121150$  руб.

### • Расчет основной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле [20]:

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где  $F_{\text{д}} = 365$  дней, т.к. мы уже учли выходные и праздничные дни при расчете затрат времени коэффициентом календарности в подглаве 5.4;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года, 11,2;

$Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника.

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад;

$k_{\text{пр}}$  и  $k_{\text{д}}$  – премиальный коэффициент и коэффициент надбавок, 1,1;

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, 1,3 для Томска.

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 16.

32,589

Таблица 16. Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Базовый оклад, руб./мес.	Месячный оклад, руб./мес.	Среднедневная зарплата, руб./день	Затраты времени, дни	Фонд з/п, руб.
НР	23000	35880	1101	49	53949
И	8000	12480	383	355	135965
Итого:					189914

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили  $З_{Посн} = 189914$  руб. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 14.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [20]

$$З_{П_{доп}} = 0,15 \cdot З_{П_{осн}},$$

$$З_{П_{доп}} = 0,15 \cdot 189914 = 28487,1 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы:

$$\Phi_{зп} = З_{П_{осн}} + З_{П_{доп}}$$

$$\Phi_{зп} = 189914 + 28487,1 = 218401,1 \text{ руб.}$$

- Отчисления на социальные нужды

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{соц} = K_{соц} \cdot \Phi_{зп}$$

где  $K_{соц}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы и включает в себя:

- а. отчисления в пенсионный фонд;
- б. на социальное страхование;
- в. на медицинское страхование.

Данный коэффициент для образовательных учреждения составляет 27,1% от затрат на заработную плату.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{соц} = 0,271 \cdot 218401,1 = 59186,7 \text{ руб.}$$

#### • Расчет затрат на электроэнергию

Затраты на электроэнергию включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию

при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot \mathcal{C}_{\mathcal{E}} \cdot t_{\text{об}}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{об}}$  –затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\mathcal{C}_{\mathcal{E}}$  – тарифная цена за 1 кВт·час, 2,39 руб/кВт·ч [22];

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для  $T_{\text{рд}}$  таблицы 14 для инженера из расчета, продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot 8$$

$$t_{\text{об}} = 288,87 \cdot 8 = 2311 \text{ часов}$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{уст.об}} \cdot K_{\text{с}}$$

где  $P_{\text{уст. об}}$  – установленная мощность оборудования, кВт;  $K_{\text{с}}$  – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_{\text{с}} = 1$ . Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 17.

Таблица 17. Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$ , кВт	Затраты $\mathcal{E}_{\text{об}}$ , руб.
ПК	2311	0,3	1657
Итого			1657

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта, рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ос}} = P_{\text{ос}} \cdot \text{Цэ} \cdot t_{\text{ос}}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ос}}$  – затраты на электроэнергию для освещения, руб.;

$t_{\text{ос}}$  – время работы осветительных приборов, час;

$P_{\text{ос}}$  – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт.

Мощность, потребляемая освещением, определяется по формуле:

$$P_{\text{ос}} = P_{\text{уст.ос}} \cdot K_{\text{с}} \cdot N_{\text{ос}}$$

где  $P_{\text{уст.ос}}$  – установленная мощность осветительных приборов,

$P_{\text{уст.ос}} = 0,072$  кВт;

$K_{\text{с}}$  – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников, для внутреннего освещения  $K_{\text{с}} = 0,9$ ;

$N_{\text{ос}}$  – количество осветительных приборов,  $N_{\text{ос}} = 4$  шт.

Таким образом, потребляемая мощность осветительных приборов составила:

$$P_{\text{ос}} = 0,072 \cdot 0,9 \cdot 4 = 0,26 \text{ кВт}$$

Время работы освещения эквивалентно времени работы оборудования:

$$t_{\text{ос}} = t_{\text{об}} = 288,87 \cdot 8 = 2311 \text{ часов}$$

Общие затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{об}} + \mathcal{E}_{\text{ос}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ос}} = 0,26 \cdot 2,39 \cdot 2311 = 1436,1 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E} = 1657 + 1436,1 = 3093,1 \text{ руб.}$$

#### • Расчет накладных расходов

В статье «Накладных расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях.

Накладные расходы составляют 10 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{\text{накл}} = (3П_{\text{осн}} + 3П_{\text{доп}}) \cdot k_{\text{накл}} = 218401,1 \cdot 0,1 = 21840,1 \text{ руб.}$$

### • Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить стоимость НИР (таблица 18).

Таблица 18. Смета затрат на разработку НТИ

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб
1. Материалы	$C_{\text{мат}}$	121150
2. Фонд оплаты труда	$\Phi_{\text{зп}}$	218401,1
3. Отчисления в ФОТ	$C_{\text{соц}}$	59186,7
4. Расходы на электроэнергию	Э	3093,1
5. Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{\text{стор}}$	-
6. Накладные расходы	$C_{\text{накл}}$	21840,1
Итого		423671

Таким образом, расходы на НИР составили  $C = 423671$  руб.

### 5.6. Оценка экономической эффективности НИР

Точно рассчитать экономическую эффективность предлагаемого решения - крайне сложная задача, потому что, во-первых, потребитель (Électricité de France) не имеет на данный момент аналога эмулятора, то есть разработка не будет явно замещать уже имеющийся продукт. Во-вторых, эмулятор не дает явно выраженный прирост эффективности или снижение затрат. Он позволяет предотвратить развитие системных аварий,

появление которых носит стохастический характер (например, короткое замыкание на линии электропередач из-за падения дерева и т.д.). Оценка последствий блэк-аута крайне различна для каждого случая и, например, для Севастополя была оценена в 200 млн. рублей [23], а для Венесуэллы в 2 млрд.\$ [24]. Поэтому приблизительно оценим экономическую эффективность по стоимости «горячего резерва» мощности на классических тепловых электростанциях, который при определенных условиях может быть заменен фотоэлектрическими станциями, если они будут соответствовать характеристике сетевых кодексов, которую проверяет предлагаемый эмулятор.

Четыре крупнейших фотоэлектрических станции под контролем EDF обладают суммарной пиковой мощностью 298МВт [25], то есть можно ожидать ориентировочно около 100МВт реальной выходной мощности днем в зимнее время. Стоимость ежегодной эксплуатации 100МВт резерва составляет порядка 25,8 млн.\$ [26].

Установка солнечных станций номинальным сроком службы 25 лет с пиковой мощностью 298МВт стоит 503,62 млн.\$. Обслуживание – дополнительно 0,8 млн.\$. ежегодно [27].

Затраты на эмулятор:

- Производство эмулятора - 350 тыс. \$
- расходы на транспортировку эмулятора до места тестов – 12 тыс.\$/год
- Зарботная плата двум работникам, обслуживающим эмулятор и проводящим тесты – 72 тыс.\$/год

Итого эмулятор позволяет ориентировочно сэкономить ежегодно:

$$S_{\text{эконом}} = 25,8 - \frac{503,62 + 0,35}{25} - 0,8 - 0,012 - 0,072 = 4,757 \text{ млн. \$}.$$

С рассчитанными для НИР расходами в размере всего лишь 423671руб (или 6524 \$ по текущему курсу), реализованный проект

окупается в первый же день, поэтому расчет экономических показателей не требуется, ввиду ожидаемо крайне высоких итоговых значений.

### **Выводы:**

В ходе разработки настоящей главы ВКР были решено несколько задач. Проведен анализ конкурентных технических решений. Получено, что предлагаемый эмулятор является наиболее подходящим вариантом для заявленных в проекте требований. Проведен SWOT-анализ, позволивший выявить слабые и сильные стороны проекта, разработать наиболее логичные шаги по использованию возникающих возможностей и превентивные меры при возникновении наиболее вероятных угроз. Разработан календарный план реализации исследования. На основе плана составлена диаграмма Ганта, позволяющая определить очередность и сроки выполнения. Также определена стоимость выполнения проекта с учетом материалов и проведена оценка экономической эффективности, которая показала, что при незначительных вложениях в НИР разработка способна оказать крайне существенный положительный экономический эффект.



## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM73	Петрусёву Александру Сергеевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР: Разработка и исследование испытательного стенда для проверки инверторов солнечных электростанций на соответствие требованиям к работе при провалах напряжения

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: Помещение и рабочее место, оборудованное персональным компьютером.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</li> <li>- СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность</b> 2.1. Анализ вредных факторов и обоснование мероприятий по их устранению 2.2. Анализ опасных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Повышенная или пониженная влажность, температура и скорость движения воздуха</li> <li>- Недостаточная освещенность</li> <li>- Электромагнитное излучение</li> <li>- Опасность поражения электрическим током</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Воздействие объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- Воздействие объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- Воздействие объекта на литосферу (отходы).</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– Типичная ЧС – <b>пожар</b>;</li> <li>– Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
------------------------------------------------------	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О.А.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич		

## **6. Социальная ответственность**

### **Введение**

Представление о понятии «Социальная ответственность» будущий специалист может получить из международного стандарта ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации». [28] В этом документе приводятся вопросы выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению. В соответствии со стандартом целями составления настоящего раздела является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи при работе и снижение вредных воздействий на окружающую среду. [29]

Данная научно-исследовательская работа (НИР) направлена на разработку эмулятора, способного генерировать в электрической сети в непосредственной близости от фотоэлектрических электростанций заданную характеристику провала напряжения, чтобы проверить соответствие поведения защит требуемому алгоритму. В ходе данной работы в программных комплексах Matlab Simulink и PSIM студентом моделировался указанный выше эмулятор провала напряжения.

### **6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.**

#### **6.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Нормы трудового права – это правила трудовых отношений, установленные или санкционированные государством посредством законодательных актов.

Основой трудового права является Трудовой кодекс Российской Федерации, регламентирующий права каждого работника:

- на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- на обязательное социальное страхование от несчастных случаев

на производстве в соответствии с федеральным законом;

- на отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- на обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- на личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- на внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы во время прохождения указанного медицинского осмотра[30].

#### **6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Стоит отметить, что правильная организация рабочего места является фактором, снижающим некоторые психофизические и нервно-эмоциональные нагрузки.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [31] при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с мониторами (в направлении тыла поверхности одного монитора и экрана другого монитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Быстрое и точное считывание информации обеспечивается при расположении плоскости экрана ниже уровня глаз пользователя, предпочтительно перпендикулярно к нормальной линии взгляда (нормальная линия взгляда 15 градусов вниз от горизонтали) (рисунок 57).

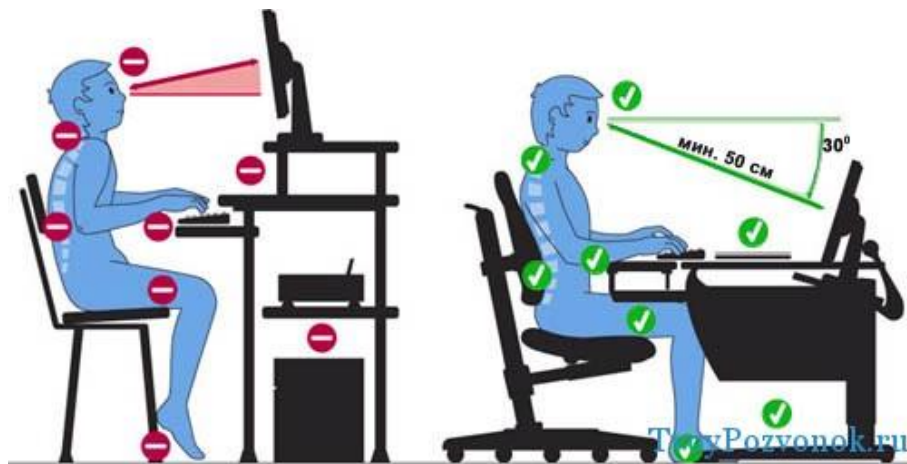


Рисунок 58. Правильное положение тела при работе за компьютером

**Режим труда** и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности.

Виды трудовой деятельности на ПК разделяются на 3 группы: группа А – работа по считыванию информации с экрана с предварительным запросом; группа Б – работа по вводу информации; группа В – творческая работа в режиме диалога с ПК.

Если в течение рабочей смены пользователь выполняет разные виды работ, то его деятельность относят к той группе работ, на выполнение которой тратится не менее 50% времени рабочей смены.

Категории тяжести и напряженности работы на ПК определяются уровнем нагрузки за рабочую смену: для группы А – по суммарному числу считываемых знаков; для группы Б – по суммарному числу считываемых или вводимых знаков; для группы В – по суммарному времени непосредственной

работы на ПК. В таблице 19 приведены категории тяжести и напряженности работ в зависимости от уровня нагрузки за рабочую смену.

Количество и длительность регламентированных перерывов, их распределение в течение рабочей смены устанавливается в зависимости от категории работ на ПК и продолжительности рабочей смены

Таблица 19. Виды категорий трудовой деятельности с ПК

Категория работы по тяжести и напряженности	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работы на ПК		
	Группа А	Группа Б	Группа В
	Количество знаков	Количество знаков	Время работы, ч
I	До 20000	До 15000	До 2,0
II	До 40000	До 30000	До 4,0
III	До 60000	До 40000	До 6,0

**При 8-часовой рабочей смене и работе на ПК регламентированные перерывы следует устанавливать:**

- для первой категории работ через 2 часа от начала смены и через 2 часа после обеденного перерыва продолжительностью 15 минут каждый;
- для второй категории работ — через 2 часа от начала рабочей смены и через 1,5-2,0 часа после обеденного перерыва продолжительностью 15 минут каждый или продолжительностью 10 минут через каждый час работы;
- для третьей категории работ — через 1,5 - 2,0 часа от начала рабочей смены и через 1,5-2,0 часа после обеденного перерыва продолжительностью 20 минут каждый или продолжительностью 15 минут через каждый час работы.

Продолжительность непрерывной работы на ПК без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часа.

При работе на ПК в ночную смену продолжительность регламентированных перерывов увеличивается на 60 минут независимо от категории и вида трудовой деятельности.

Эффективными являются нерегламентированные перерывы (микропаузы) длительностью 1-3 минуты.

Регламентированные перерывы и микропаузы целесообразно использовать для выполнения комплекса упражнений и гимнастики для глаз, пальцев рук, а также массажа. Комплексы упражнений целесообразно менять через 2-3 недели.

Пользователям ПК, выполняющим работу с высоким уровнем напряженности, показана психологическая разгрузка во время регламентированных перерывов и в конце рабочего дня в специально оборудованных помещениях (комнатах психологической разгрузки).

## **6.2. Производственная безопасность**

### **6.2.1. Анализ вредных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

Существует ряд факторов, которые могут влиять на условия труда сотрудников предприятия: шум, тепловыделения, вредные вещества, статическое электричество, ионизирующие и неионизирующие излучения, недостаточная освещенность, параметры технологического оборудования и рабочего места.

Прослеживается зависимость результатов труда от условий, которые, в свою очередь, обуславливают и отношение работника к труду. Следовательно, низкий уровень условий влечёт за собой резкое снижение работоспособности и производительности труда. Более того, плохие условия труда влияют на рост процента профессиональных заболеваний и травм. Под условиями труда подразумевается совокупность факторов рабочей среды,

оказывающих влияние на здоровье и производительность труда человека в процессе труда.

Хорошее самочувствие работника напрямую зависит от всех этих факторов по отдельности и в комплексе. Большую роль в процессе труда играет и организация рабочего места.

Таблица 20. Основные элементы исследовательской деятельности, формирующие вредные факторы

Вредные факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Наименование вида работ	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата в помещении	Работа с программным комплексом	СанПиН 2.2.4.548-96 СанПиН 2.2.2/2.4.2732-10
2. Отсутствие или недостаток естественного света	Работа с программным комплексом	СП 52.13330.2016 Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	Работа с программным комплексом	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2/2.4.2732-10
4. Превышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений	Работа с программным комплексом	СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09

#### **Повышенная или пониженная влажность, температура и скорость движения воздуха**

Температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое излучение нагретых поверхностей в совокупности влияют на организм человека. Также микроклимат напрямую связан с колебаниями внешних метеорологических условий, временем дня, года, особенностями производственного процесса и систем отопления и вентиляции [32].

На рабочем месте пользователей должны поддерживаться оптимальные параметры в соответствии с [33]. Согласно [33] работа на персональных электронно-вычислительных машинах (ПЭВМ) в компьютерном классе по тяжести относится к классу легкие физические работы 1а и 1б с интенсивностью энергозатрат 120 – 150 ккал/час.

В производственных помещениях, в которых работа с использованием ПЭВМ является основной и связана с нервно-эмоциональным напряжением, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата. Основываясь на [34], оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать данным, приведенным ниже.

Параметры микроклимата для различных помещений, в частности, в которых установлены ПЭВМ зависят от периода года:

- Холодный и переходный период. Параметры микроклимата для этого периода, следующие: 1) температура воздуха внутри помещения должна находиться в пределах от 22 до 24 градусов Цельсия. 2) Относительная влажность воздуха составляет от 40 до 60 процентов. 3) Скорость движения воздушных потоков до 0,1 м/с;
- Теплый период. Параметры микроклимата для этого периода, следующие: 1) температура воздуха внутри помещения должна находиться в пределах от 23 до 25 градусов Цельсия. 2) Относительная влажность воздуха составляет от 40 до 60 процентов. 3) Скорость движения воздушных потоков от 0,1 м/с до 0,2 м/с.

### **Повышенный уровень электромагнитных полей**

Временно допустимые значения излучения ЭМП на рабочем месте пользователя ПК и уровень электростатического потенциала экрана дисплея не должны превышать значений, установленных [33].



Таблица 21. Временно допустимые значения ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

ПЭВМ - источники широкополосного электромагнитного излучения. Оно включает в себя следующие виды: мягкое рентгеновское, ультрафиолетовое 200-400 нм, видимое 400-750 нм, ближнее ИК 750-2000 нм, радиочастотное диапазоном 3 кГц.

При работе с ПК необходимо соблюдать следующие правила, чтобы избежать опасного воздействия данного типа полей [35]:

- ПК, имеющие дисплей с низкой степенью излучения, должны использоваться для работы;
- ПК необходимо правильно подключить к электропитанию и заземлить при установке на рабочем месте;
- Расстояние между сотрудником и дисплеем монитора должно составлять 600 – 700 мм, но не менее 500 мм.

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Освещение на рабочем месте нормируется согласно [36] по характеристике зрительных работ.

На рабочем месте пользователя ПК должны быть соблюдены нормы освещенности и качественные показатели освещения в соответствии с требованиями. Для обеспечения нормативной освещённости необходимо использовать совмещённое освещение, при котором естественное дополняется искусственным. Естественное освещение является боковым (осуществляется через световые проёмы в наружных стенах), а искусственное – общим. В условиях недостаточной освещенности в утреннее

и вечернее время используется искусственное освещение. Для искусственного освещения применяют люминесцентные лампы, которые имеют высокую световую отдачу и продолжительный срок службы.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна составлять 300-500 лк [31]. Яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>.

Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Яркость бликов на экране монитора не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup> и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>. Коэффициент естественной освещенности (КЕО) в помещениях с использованием ПК должен быть не ниже 1,2%.

### **Расчет системы освещения**

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

В помещениях используется совместное освещение – искусственное и естественное (через окна). Система освещения общая.

Наиболее распространёнными типами светильников для люминесцентных ламп являются:

Открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО, ООД, для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости.

Для определения необходимого количества ламп и выбора их типа ниже произведен расчет общего искусственного освещения люминесцентного освещения[37].

Дано помещение с размерами: длина  $A=6$  м, ширина  $B=5$  м, высота  $H=3,2$  м. Высота рабочей поверхности  $h_{rp}=1,2$  м.

Коэффициент отражения стен  $R_{ст}=50\%$  и потолка  $R_{п}=70\%$  для данной комнаты имеют следующие значения. Коэффициент запаса  $k=1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z=1,1$ .

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Приняв свес светильника  $h_c=0,2$  м и  $\lambda=1,4$  получаем:

( $h$  - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью)

$$h = H - h_p - h_c$$
$$h = 3.2 - 1.2 - 0.2 = 1.8 \text{ м}$$

( $L$  - расстояние между светильниками)

$$L = h \cdot V = 1.8 \cdot 1.4 = 2.52$$

$$\frac{L}{3} = 0.84$$

Таким образом, размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду необходимо установить 2 светильника типа ОДОР мощностью 30 Вт (с длиной 0,925 м). План размещения светильников показан на рисунке 58.

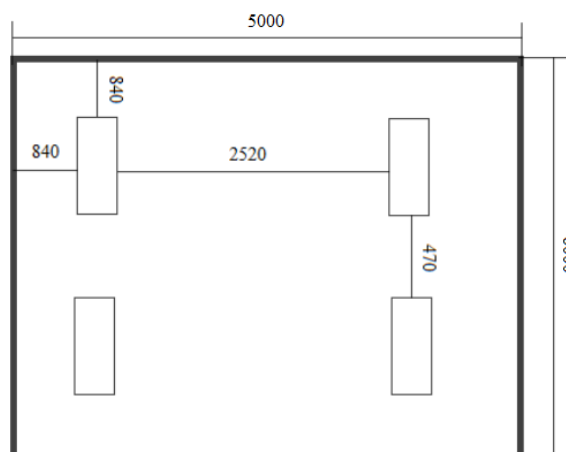


Рисунок 59. План размещения светильников

Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп  $N=8$ .

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(a+b)}$$
$$i = \frac{30}{1.8(5+6)} = 1.13$$

Находим коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0,53$$

Определим потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$F = \frac{E_t \cdot k \cdot S \cdot z}{N \cdot n}$$
$$F = \frac{200 \cdot 20 \cdot 3 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 0,45} = 1833 \text{ Лм}$$

Выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛД 30 Вт с потоком 1800 Лм.

Делаем проверку по формуле:

$$-10\% \leq (F_{\text{л.станд}} - F_{\text{л.расч}}) / F_{\text{л.станд}} \leq +20\%$$

Получаем:

$$-10\% \leq -1,83\% \leq +20\%$$

Электрическая мощность осветительной установки равна:

$$P = 8 \cdot 30 = 240 \text{ Вт}$$

### **6.2.2. Анализ опасных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (техника безопасности)**

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от: рода и величины напряжения и тока; частоты электрического тока; пути прохождения тока через тело человека; продолжительности воздействия на организм человека; условий внешней среды.

Согласно классификации помещений по степени опасности поражения людей электрическим током, рабочее помещение, в котором установлена ПЭВМ, относится к первому классу «помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую безопасность» [38].

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются: обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования; применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током; защитное заземление и зануление; защитная автоматика.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Профилактические мероприятия для обеспечения безопасности эксплуатации электрического оборудования:

- проверка изоляции токоведущих частей, чистка контактов, проверка и очистка движущихся частей оборудования;
- обеспечение конвекции воздуха для отвода тепла от оборудования для ликвидации перегрева;
- прокладка токоведущих частей, а так же установка оборудования вне зоны случайного взаимодействия с человеком;
- отключение оборудования от сети, установка устройств бесперебойного питания или мощных стабилизаторов на вводном кабеле для обеспечения электробезопасности во время грозы.

С целью предупреждения электротравматизма работник проходит инструктаж по технике безопасности, в котором озвучиваются основные положения по защите от поражения электрическим током:

- запрещается пользоваться электрическими розетками без защитных изолирующих кожухов или с неисправными кожухами;
- запрещается включать в электросеть ПК с оголенными проводами и токоведущими частями электрических устройств;
- запрещается вытягивать вилку из розетки за шнур;
- запрещается работать на ПК со снятыми облицовочными частями;

- запрещается закладывать провода и шнуры за водопроводные трубы и батареи отопления;
- запрещается оставлять ПК, включенным в сеть при длительном перерыве в работе и при пропадании напряжения в сети.

### **6.3. Экологическая безопасность**

В области работ, связанных с использованием ПК, возникает необходимость обеспечения безопасности окружающей среды, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации компьютерной техники. Можно выделить некоторые негативные воздействия со стороны данной технологии:

- повышение электромагнитного и радиоактивного фона (в результате соответствующих излучений);
- повышение звукового фона (слышимый шум, инфра- и ультразвуки);
- образование твердых отходов (компьютерный лом, бумага и т.п.) и жидких отходов (сточные воды);
- неоправданное потребление электроэнергии (связано с использованием ПК не на полную мощность в течение всего его рабочего времени) и прочее [35]

На основе выполненного анализа можно дать следующие рекомендации по предотвращению или снижению неблагоприятных воздействий на среду:

- применять оборудование, соответствующее санитарным нормам и стандартам экологической безопасности;
- применять расходные материалы с высоким коэффициентом использования и возможностью их полной или частичной переработки;
- отходы в виде компьютерного лома утилизировать;
- использовать экономные режимы работы оборудования.

#### **6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – ситуация, которую можно охарактеризовать как внезапно возникающую и неожиданную. В результате такой ситуации нарушается установленный процесс или явление и возникает серьёзное негативное воздействие на человеческую жизнедеятельность, социальную, экономическую и природную сферы.

ЧС принято делить на техногенные, природные, экологические, социально-политические по сфере возникновения.

Что касается масштаба распространения и тяжести последствий, ЧС делятся на локальные, объектовые, местные, региональные, национальные и глобальные.

По скорости распространения опасности ЧС подразделяются на внезапные, стремительные и умеренные.

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления

Наиболее вероятным видится пожар. Пожар в помещении, где проводится работа по моделированию нового эмулятора, таит в себе особую опасность по причине того, что возникает риск уничтожения ЭВМ, документов, инструментов и оборудования, которые представляют большую материальную ценность. Более того, существует опасность распространения пожара на соседние помещения.

Помещение, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, относится к категории Д, исходя из классификации производств по пожарной и взрывной безопасности. Таким образом, помещение можно охарактеризовать как помещение, содержащее твердые сгораемые вещества и материалы, то есть вещества и материалы,

способные гореть при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом.

Стоит отметить, что несоблюдение правил пожарной безопасности чаще всего становится причиной возникновения пожара. Помимо этого, причиной может стать неисправность токоведущих частей оборудования либо короткое замыкание проводки или оборудования.

Для ликвидации причин пожаров принято проводить следующие мероприятия:

1. Технические: установка и эксплуатация модернизированных автоматических средств сигнализации, современных автоматических систем пожаротушения, первичных средств тушения пожаров, создание и внедрение новых методов по ограничению распространения огня.
2. Организационные: актуализация знаний о пожарной безопасности среди рабочих, обучение служащих правилам поведения при пожаре, внедрение инструкций по правильной эксплуатации рабочего оборудования, разработка планов эвакуации людей.

При обнаружении пожара работник обязан действовать согласно положениям ППБ 01-03:

- незамедлительно сообщить о ЧС в пожарную охрану;
- принять меры по эвакуации людей, каких-либо материальных ценностей согласно плану эвакуации

На каждом этаже здания должно быть не меньше двух эвакуационных выходов. Ширина двери эвакуационного выхода должна быть не менее 0,8 м., но в целом этот размер зависит от общего количества людей, которые будут эвакуированы через этот выход. Высота прохода на эвакуационных путях должна быть не менее 2 м.

После эвакуации людей в срочном порядке принимаются меры по ликвидации возгорания.



- отключить электроэнергию, приступить к тушению пожара первичными средствами пожаротушения (огнетушители, песок, вода).

Для устранения небольших очагов горения до прибытия пожарной команды используются огнетушители.

Огнетушители делятся на разные типы в зависимости от применяемого огнетушащего вещества:

- 1) порошковые (ОП)
- 2) газовые: углекислотные (ОУ) и хладоновые (ОХ)
- 3) водные (ОВ)
- 4) пенные: воздушно-пенные (ОВП) и химически-пенные (ОХП)
- 5) комбинированные (ОК), с зарядами разных огнетушащих веществ (например, пенообразующий и порошковый состав), помещенных в двух емкостях.

### **Выводы:**

Рассмотрена основа трудового права - Трудовой кодекс Российской Федерации. Приведены основные мероприятия по подготовке рабочего места и соблюдении режима труда.

Проанализирован объект исследования на предмет выявления основных техносферных опасностей и вредностей, предложены методы минимизации этих воздействий и защиты от них. Рассмотрено влияние микроклимата, электромагнитного излучения и освещенности. Спроектировано рациональное освещение, обеспечивающие комфортные условия работы.

Приведены рекомендации по снижению неблагоприятных воздействий на среду. Рассмотрены чрезвычайные ситуации и приведены действия при чрезвычайной ситуации на примере пожара.

Резюмируя, реализация указанных в разделе проектных решений позволит уменьшить несчастные случаи в производстве, снизить вредные

воздействия на окружающую среду, и возможно даже спасти жизнь работника.

## **Заключение**

В ходе работы исследованы различные сетевые кодексы, содержащие нормативы для подключения генерации к сети. Каждый кодекс содержит большое количество требований и необходимых тестов, которые, тем не менее, схожи от кодекса к кодексу. Одним из важных требований кодексов, которые применялись на ВЭС, а последние годы вводятся и для СЭС – LVRT способность.

Существуют несколько фундаментально различных подходов к созданию эмуляторов, способных проводить тесты по проверке LVRT способности. Рассмотрены 4 основных типа эмуляторов, три из них смоделированы в программном обеспечении и проверены на эффективность.

С учетом требований к мобильности решения и его низкому воздействию на остальную сеть выбран эмулятор на основе делителя напряжения. Для него была разработана тестовая схема и рассчитаны параметры всех компонентов.

Проведено тестирование эмулятора, результаты которого показали значения, близкие к смоделированным. Рассмотрены происходящие во время эмуляции процессы и возмущения, как по напряжению, так и по току.

Оценены пределы применимости эмулятора при различных входных параметрах.

В заключение можно утверждать, что предлагаемый эмулятор работоспособен и эффективен, но возможность его использования стоит оценивать в рамках применимости к конкретным СЭС.

## Источники

1. Виссарионов В.И. Учебное пособие для вузов - Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова– Москва, 2008 – 317с.
2. Renewable Capacity Statistics 2018. International Renewable Energy Agency. URL: <http://www.irena.org/publications/2018/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2018> (дата обращения 08.08.2018).
3. Corsica. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Corsica> (дата обращения 09.08.2018).
4. Gilles Notton. Importance of islands in renewable energy production and storage: The situation of the French islands / Renewable and Sustainable Energy Reviews 47 (2015), pp. 260–269
5. Яндульский, А., А. Марченко, и А. Нестерко. Оценка динамических характеристик многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов / Научные труды Винницкого национального технического университета №4 (2014), стр. 1-9 URL: <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/472>.
6. Сетевой кодекс. Академик. Словарь URL: [https://technical\\_translator\\_dictionary.academic.ru/223618/сетевой\\_кодекс](https://technical_translator_dictionary.academic.ru/223618/сетевой_кодекс) (дата обращения 09.08.2018).
7. Manitoba Hydro-Electric Board 67th Annual Report For the year ended March 31, 2018. URL: [https://www.hydro.mb.ca/corporate/ar/pdf/annual\\_report\\_2017\\_18.pdf](https://www.hydro.mb.ca/corporate/ar/pdf/annual_report_2017_18.pdf) (дата обращения 11.08.2018).
8. Technical Requirements For Connecting Distributed Resources To The Manitoba Hydro Distribution System. DRG2003. revision 2.1, January 2011. URL: [https://www.hydro.mb.ca/accounts\\_and\\_services/generating\\_your\\_own\\_electricity/pdf/connecting\\_distributed\\_resources.pdf](https://www.hydro.mb.ca/accounts_and_services/generating_your_own_electricity/pdf/connecting_distributed_resources.pdf) (дата обращения 10.08.2018).

9. Power quality specification for interconnection to Manitoba Hydro's Electrical System. PQS 2000. revision 02. April 2011 URL: [https://www.hydro.mb.ca/your\\_business/benchmarking/power\\_quality/PQS2000\\_01.pdf](https://www.hydro.mb.ca/your_business/benchmarking/power_quality/PQS2000_01.pdf) (дата обращения 10.08.2018).

10. BC Hydro (June 2013), Quick Facts for the Year Ended March 31, 2013 URL: <https://www.bchydro.com/content/dam/BCHydro/customer-portal/documents/corporate/accountability-reports/financial-reports/annual-reports/quick-facts-for-year-ended-march-31-2013.pdf> (дата обращения 11.08.2018).

11. BC Hydro 35 kV and Below Interconnection Requirements for Power Generators, May 2010. URL: <https://www.bchydro.com/content/dam/BCHydro/customer-portal/documents/distribution/standards/ds-dgi-requirements.pdf> (дата обращения 10.08.2018).

12. J. Dirksen. Low Voltage Ride-Through / DEWI magazin № 43, August 2013, pp. 56-60.

13. J. Dirksen. Low Voltage Ride-Through (LVRT) Testing of Distributed Generation Sources / Energetica India · ABR14, pp. 4-5.

14. IEC 61400-21: International standard. Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines. Edition 2.0 2008-08. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5434>

15. Yang, Y., Blaabjerg, F., & Zou, Z. (2012). Benchmarking of Voltage Sag Generators. In the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society pp. 943-948

16. Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement au réseau public de transport d'électricité d'une installation de production d'énergie électrique / Journal officiel de la République Française, 25.04.2018, pp. 29-31

17. Alternateurs Basse Tension / Leroy Somer URL: [http://www.leroy-somer.com/documentation\\_pdf/5279\\_fr.pdf](http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/5279_fr.pdf) (дата обращения 11.08.2018).

18. Tests for determining the electrical characteristics of wind turbines. Energy to quality (E2Q).

19. Micro-onduleur 250W ENPHASE M250 / ASE Energy. URL: <https://www.ase-energy.com/micro-onduleur-250w-enphase-m250,fr,4,M250-60.cfm> (дата обращения 15.08.2018).

20. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с;

21. Yang, Y., Blaabjerg, F., & Zou, Z. (2012). Benchmarking of Voltage Sag Generators. In the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society pp. 943-948

22. Тарифы на электроэнергию в Томске и томской области 2019. Режим доступа: [https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie/tarify-na-elektroenergiju/tomskaya\\_oblast/39310/](https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie/tarify-na-elektroenergiju/tomskaya_oblast/39310/). (дата обращения: 14.05.2019)

23. Национальная служба новостей. В Севастополе ущерб от блэкаута составил более 200 млн рублей. Режим доступа: <https://nsn.fm/amp/hots/hots-v-sevastopole-ushcherb-ot-blekauta-sostavil-bolee-200-mln-rublej> (дата обращения 17.05.2019)

24. Прайм. Агентство экономической информации. Потери Венесуэлы от блэкаутов в марте превысили \$2 млрд, считают аналитики. Режим доступа: <https://1prime.ru/energy/20190402/829860640.html> (дата обращения 17.05.2019)

25. Solar power. Режим доступа: <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/industrial-provider/renewable-energies/solar-power> (дата обращения 18.05.2019)

26. ПроАтом. О выборе мощности блоков для Белорусской АЭС. Режим доступа:

<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=4021> (дата обращения 19.05.2019)

27. Budgeting for solar pv plant operations & maintenance: practices and pricing. URL: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2016/160649r.pdf> (дата обращения 19.05.2019)

28. Международный стандарт ICCSR26000:2011. Социальная ответственность организации;

29. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ/Сост. Е.Н. Пашков, И.Л. Мезенцева – Томск: Изд-во Томского политехнического универ-та, 2019. – 24 с;

30. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 03.07.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017);

31. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Минздрав России, 2003;

32. Безопасность жизнедеятельности Учебник, издание десятое, переработанное и дополненное под редакцией профессора Э. А. Арустамова, Москва 2006;

33. СанПиН 2.2.2/2.4.2732-10. Гигиенические требования к персональным электронно–вычислительным машинам и организации работы. - М.: Минюст России, 2010;

34. СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы. - М.: Госкомсанэпиднадзор РФ, 1996;

35. Гамм А.З. Оценка текущего состояния электроэнергетической системы как задача нелинейного программирования // Электричество. - 19721 - № 9.- С.12-18;

36. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. - М.: Минздрав России, 2003;

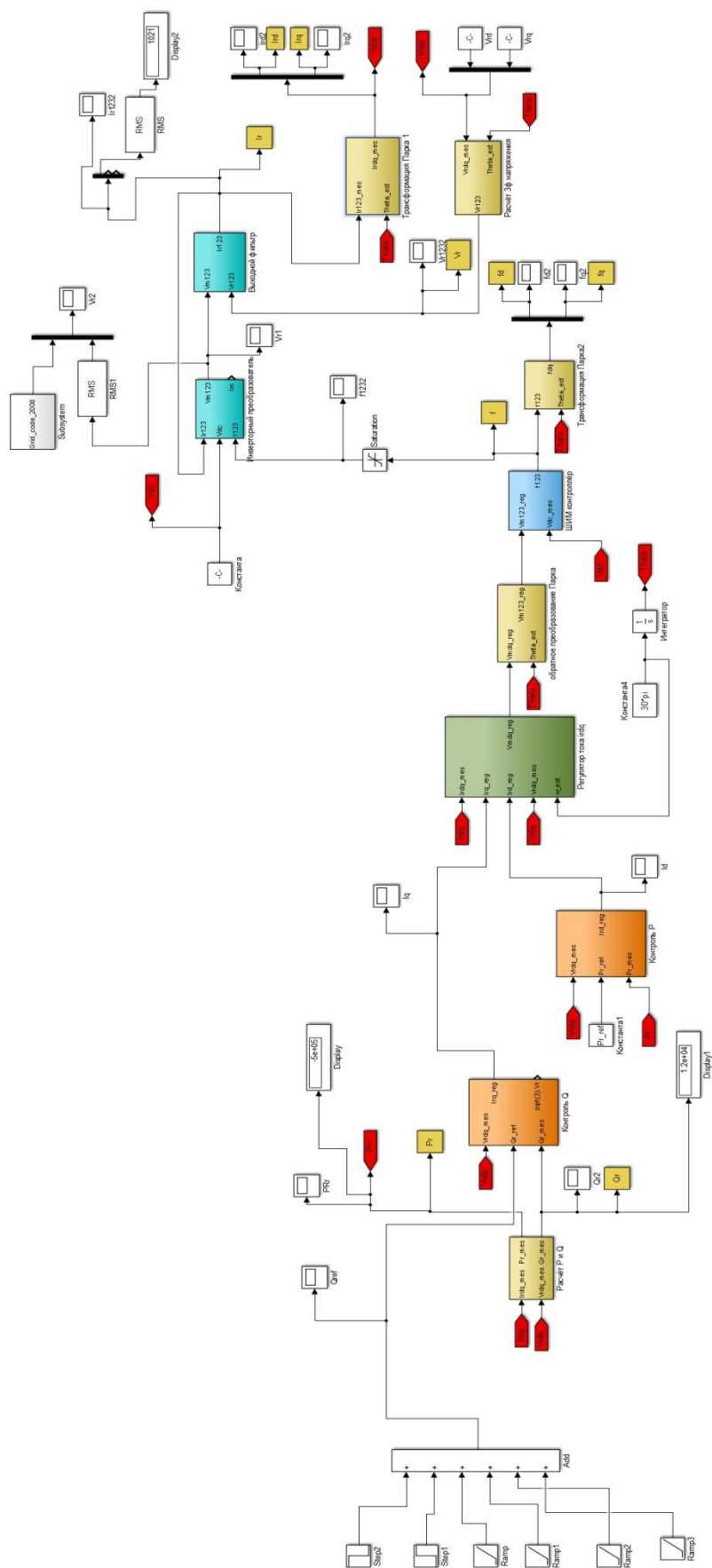
37. Расчет искусственного освещения: методические указания к выполнению индивидуальных заданий БЖД-4Б для студентов дневного и заочного обучения всех направлений и специальностей ТПУ / Томский политехнический университет; сост. О. Б. Назаренко. Томск: Изд-во ТПУ, 2002. 15 с.: ил. Библиогр.: с. 14;

38. Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 330 с;

39. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности;



## Приложение А. Схема эмулятора на основе инвертора



## Приложение Б. Расчёт величин сопротивлений эмулятора

### Сопротивление автотрансформатора

$$R_{ss} := 3.9 \quad X_{ss} := 4.46$$

### Напряжение Последовательное сопротивление Zs

$$R_s := 60 \cdot R_{ss} \quad X_s := 60 \cdot 4.46$$

$$R_s = 234 \quad X_s = 267.6$$

$$Z_s := \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$$

$$Z_s = 355.48$$

### Угол $\phi_p$

$$\phi_p := \arctan\left(\frac{X_{ss}}{R_{ss}}\right) \quad \phi_p = 0.852$$

### Напряжение сети и шаг напряжения Vsag

$$V_g := 230$$

$$V_{sag} := 20, 40 \dots 220$$

### Мощность СЭС

$$P_{pv} := 33$$

### Нахождение 4 неизвестных методом итераций

$$V_s := 0 \quad \phi_s := 0 \quad \phi_g := 0 \quad I_p := 0$$

Given

$$V_s \cdot \sin(\phi_s) = V_g \cdot \sin(\phi_g)$$

$$V_s \cdot \cos(\phi_s) = V_g \cdot \cos(\phi_g) - |V_{sag}|$$

$$\frac{V_s}{|Z_s|} \cdot \cos(\phi_s + \phi_p) + \frac{P_{pv}}{V_{sag}} = I_p \cdot \cos(\phi_p)$$

$$\left( \frac{V_s}{|Z_s|} \cdot \sin(\phi_s + \phi_p) \right) = I_p \cdot \sin(\phi_p)$$

$$F(V_{sag}) := \text{Find}(V_s, \phi_s, \phi_g, I_p)$$

$$I_{inv}(V_{sag}) := \frac{P_{pv}}{V_{sag}}$$

Значения величин тока и соответствующих им сопротивлений для каждого уровня провала напряжения Vsag

	$I_p$	$Z_p$	$I_s$
$V_{sag} =$	$F(V_{sag})_3 \cdot e^{\phi_p \cdot i} =$	$\frac{V_{sag}}{F(V_{sag})_3 \cdot e^{\phi_p \cdot i}} =$	$F(V_{sag})_3 \cdot e^{\phi_p \cdot i} - I_{inv}(V_{sag})$
20	1.586+1.813i	5.466-6.251i	-0.164+1.813i
40	1.359+1.554i	12.755-14.587i	0.484+1.554i
60	1.164+1.331i	22.335-25.542i	0.581+1.331i
80	1.004+1.149i	34.515-39.471i	0.567+1.149i
100	0.862+0.986i	50.267-57.485i	0.512+0.986i
120	0.729+0.834i	71.301-81.539i	0.438+0.834i
140	0.602+0.689i	100.723-115.186i	0.352+0.689i
160	0.479+0.548i	144.724-165.504i	0.26+0.548i
180	0.358+0.41i	217.635-248.885i	0.164+0.41i
200	0.24+0.274i	361.784-413.732i	0.065+0.274i
220	0.122+0.14i	781.034-893.182i	-0.037+0.14i

## Приложение В

### Раздел 1

#### **Grid codes and their relevance**

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM73	Петрусёв Александр Сергеевич		

Консультант ИШЭ ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Прохоров А.В.	к.т.н.		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Марцева Т.А.			

## Grid codes and their relevance

### Description of the object of study

The work was carried out on the example of a photovoltaic plant with a capacity of 4000 KVA, owned by Électricité de France (EDF), located on the Corsica island. Photovoltaic plant consists of 8 blocks of 500 kVA, each contains its own inverter. The output voltage of each inverter is 400V. The whole photovoltaic plant is connected to the network via a step-up transformer of 0.4 / 20 kV.

Corsica is the fourth largest island in the Mediterranean, and it is one of the regions of France. The island's population is 330 thousand people [3]. Frequency and voltage drops occur on islands more often than on the mainland, since they can operate in an island mode be isolated from the main network). Before the creation of partial electrical connection with Sardinia, over 200 incidents, when the frequency dropped below 46 Hz, occurred in Corsica every year. [4]. In recent years, the capacity of renewable energy sources, first of all PV, has increased in Corsica, and their share in the total energy balance becomes significant (Figure 2).

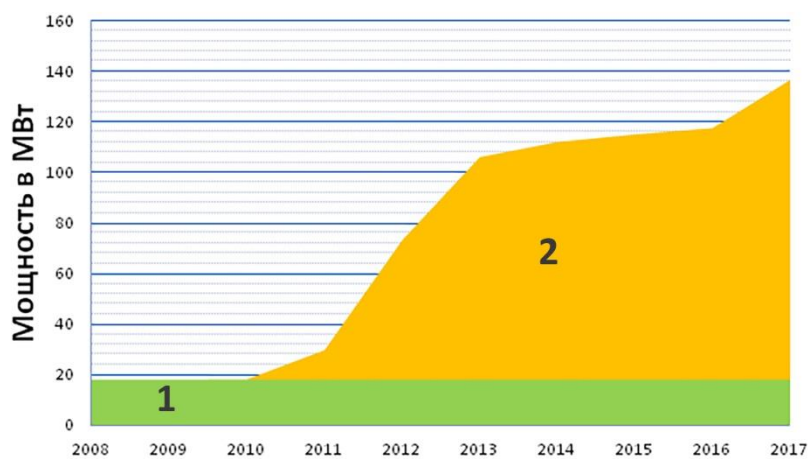


Figure 2 – Rated capacity of Wind(1) and PV(2) in Corsica island

Thereby, the wrong way of control for this type of generation can lead to serious emergencies. Moreover, the inverter connection of the PV plants with the network does not have an inertial response, which reduces the kinetic energy of the

power system. As a result, the stability of the entire system is reduced. Previously, PV plants (before the creation of special requirements in grid codes) were disconnected by automation immediately, when a significant decreasing in the frequency or system voltage appeared, since they could not remain in synchronization with the network [5].

On April 27, 2018 a three-phase short circuit occurred on the 50kV line in Corsica Island, as a result, the voltage dropped to 50%. As a result of the voltage dropping, half of the PV plants in this area were disconnected from the network. Such behavior does not meet the LVRT (low-voltage ride trough) characteristic of the standards (all plants should remain connected during this transition process), which led to a drop in network frequency to level 48.55 Hz (Figure 3). This example clearly shows the relevance of checking the compliance of security automatics with the requirements of grid codes.

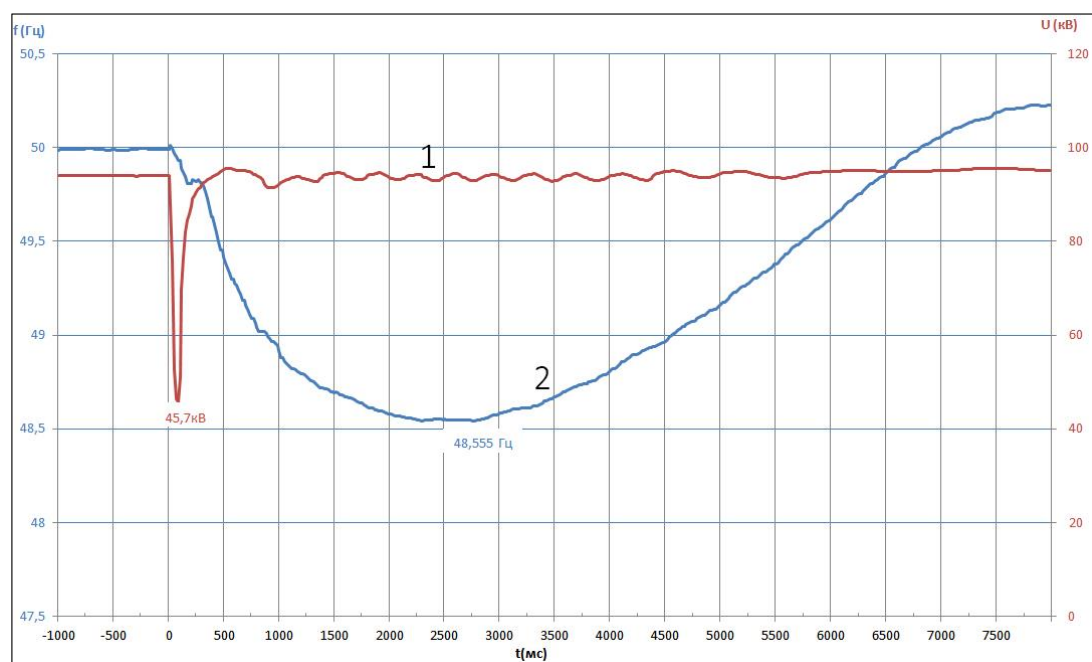


Figure 3 – Voltage (1) and frequency (2) 27.04.2018, 16:44

### Grid code requirements

The grid code is a specific set of instructions that describes a certain minimum of rules for all market participants on connecting to the power grid, as well as maintaining its reliability, stability and security. The document is usually

developed by the transmission system operator, and then confirmed by the power industry authority, representing the government of the country [6]. Let's consider several examples of grid codes according to a few Canadian companies.

Manitoba Hydro is a power and gas company with 15 power plants, most of them are hydro power plants [7]. The company identifies 5 types of distributed recourse (DR) interconnections [8]:

Type 0 - Non-Parallel Operation (break-before-make). This type of interconnection uses an open transition transfer switch to connect a standby generator to existing load.

Type 1 - Momentary transition ( $<100\text{ms}$ ). This type of interconnection uses a closed transition transfer switch to momentarily connect a standby generator to the utility. This is commonly used to start and test standby generators under load without taking a momentary outage.

Type 2 - Load displacement (non-export). This DR interconnection operates in parallel with the utility for the purpose of displacing local load. The DR capacity is less than the total load and power is not allowed to flow in reverse to the utility. Sometimes, load is displaced only during periods of peak demand, known as „peak shaving“.

Type 3 - Load displacement and export. It is similar to Type 2 except that the power is allowed to flow back to the utility. The power may be purchased by Manitoba Hydro through its Open Access Interconnection Tariff (OAIT). A bi-directional revenue approved meter is required for all type 2 interconnections.

Type 4 - Export only. This is a DR facility designed solely for the export of power onto the grid. It may be purchased by Manitoba Hydro or sold into the USA market.

The company allows you to connect to the network with a capacity of DR up to 10 MW and a voltage of up to 50 kV. At the same time, the company reserves the right to limit the maximum possible power below 10 MW, if it is necessary under the terms of stability and safety.

The following restrictions apply to the Manitoba Hydro distribution network:

- 1) steady state voltage requirement is  $\pm 6\%$ .
- 2) System normally operates at  $60 \pm 0.2$  Hz. Large disturbance that results in the loss of all tie lines may result in frequency variations of  $-2.0$  to  $+3.5$  Hz. These events are rare, however, they may last up to 10 seconds
- 3) Under normal operating conditions voltage unbalance may reach 5.0% in rural areas and 4.0% in urban areas

The customer must supply Manitoba Hydro with the following preliminary information regarding the installation:

- type of DR and fuel source
- apparent power rating (KVA)
- real power rating (KW)
- interconnection voltage
- operating capability of equipment

If the installation falls within the scope of this specification, Manitoba Hydro requires more detailed information prior to installation including:

- a single line diagram and schematics
- generator short circuit level and impedance
- detailed description of the protection scheme
- proposed commissioning tests

If the information meets the requirements of this specification, Manitoba Hydro will deem the design acceptable and construction can proceed.

Manitoba Hydro establishes the following technical requirements for connecting to a distribution network:

- 1) The electricity generated by the DR must meet certain quality standards. These include restrictions on the following characteristics:

- Harmonics and flicker according to the document PQS2000- 01 [9]

- The capability of voltage regulation and power factor (for synchronous generators and for inverters in the case of PV plant)
- Voltage unbalance
- Resonance and self excitation – all possible types should be taken into account

For DR with large synchronous generators, a speed control system may also be required.

2) DR should be equipped with appropriate protection in case of emergency with large deviations of voltages, currents and frequencies from the nominal values.

The designed relay protection system of the DR is required to react both to regime changes within the DR itself and in the network to which the DR is connected.

For connection types 3 and 4, there must be at least protection that reacts to:

- Under-voltage (instantaneous trip for  $V \leq 50\%$ )
- Over-voltage (instantaneous trip for  $V \geq 120\%$ )
- Under- frequency (instantaneous trip for  $f \leq 58$  Hz)
- Over - frequency (instantaneous trip for  $f \geq 63,5$  Hz)
- Overcurrent

For all types of interconnection there must be protection:

- Protection able to detect a fault between phases
- Protection able to detect a fault between phase(s) and ground
- Anti-islanding protection

3) The DR system shall maintain synchronization with the Manitoba Hydro distribution system while operating in parallel.

The connection shall be prevented when the generating facility and/or the Manitoba Hydro distribution system is operating outside of limits, given in table 1.



Table 1 – Tolerance limits

Total generation	Frequency difference	Voltage difference	Phase angle difference
0 – 500 kVA	0,3 Hz	10%	20°
500-1500 kVA	0,2 Hz	5%	15°
>1500 kVA	0,1 Hz	3%	10°

Induction generators that act as motors during start-up, do not require synchronization facilities.

4) In certain locations or for certain sizes of DR systems, the DR owner may be required to provide Manitoba Hydro with real time information regarding connection status, real and reactive power output, and voltage. The communication protocol and the equipment required will be specified by Manitoba Hydro.

If it is determined that the DR system may have an impact on Manitoba Hydro's Transmission Network, the DR owner will be required to provide a Remote Terminal Unit or Data Link to a Manitoba Hydro RTU capable of exchanging SCADA information with the Manitoba Hydro System Control Centre (Hourly integrated billing MWh, Hourly integrated MVARh, Total station instantaneous MW and MVAR, Instantaneous ambient temperature etc.)

5) The influence of EMI must not affect the operation of the DR facility protection. The protection scheme must comply with IEEE C37.90.2.

6) Batteries and auxiliaries must have sufficient capacity to ensure the operation of all protection functions during loss of supply. The protection functions must remain operational for at least 10 minutes.

Any DC connection to the network is prohibited.

7) If you use your own transformer, it must also be coordinated with the company, be grounded, and it also must have all the necessary types of relay protection.

Before connecting, apart from the need to provide all the documentation, the company may conduct a series of tests:

- Temperature stability
- Response to abnormal frequency
- Response to abnormal voltage
- Synchronization
- Unintentional islanding
- Open phase
- Harmonics
- Reconnect following abnormal condition
- Disconnect
- Test of disconnectors

It is also necessary to provide appropriate maintenance according to the Rule 2-300 of the Canadian Electrical Code and to coordinate any modification directly with the company.

BC Hydro is another Canadian company serving 1.9 million consumers [10].

Most of the requirements for connecting DRs to their distribution network (up to 35kV) are similar to Manitoba Hydro. The main differences between the requirements of the previous company include the following [11]:

- 1) The choice of the point of connection to the BC Hydro network is considered separately. In the distribution network, they distinguish two categories:
  - Connection to the line from which other consumers already feed. It can occur both on the primary voltage line (from 4.16 to 35kV) and secondary (up to 600V).
  - Connection to the distribution bus through a primary voltage line that does not have other consumers.

Line maintenance from the connection point to the DR is performed by the owner of the DR. Minimal line protection is also required - fuse or recloser.

Depending on the specific conditions, the company decides whether to make a connection at the requested point.

2) The standard maximum power of the connected induction generators should be limited to 500kVA. They should also be able to change the power factor within 90%. Since it is not possible to regulate reactive power for an induction generator, additional installation of shunt capacitors is necessary.

3) It is possible to connect synchronous generators with a capacity of more than 10 MVA, but an operator is required for such an DR who will be able to respond to a BC Hydro request within 5 minutes and adjust the voltage and power as required.

Systems with such power are also required to remain in operation for at least 30 seconds with a voltage on the terminals from 0.7 pu up to 1.2 pu and at least 30 minutes with a voltage from 0.9 pu up to 1.1 pu. The excitation system for them should cover 95% of the voltage difference between the nominal level and the maximum possible in 0.1 s or less.

4) Compliance tests are conducted by the owner of the DR, but BC Hydro can provide a person who has the right to verify each of them. An obligatory part is a test parallel work of DR with the network during 72 hours with a minimum power factor.

5) With an increase in the power of synchronous generators, the importance of requirements to remain in operation for the stabilization and dumping of frequency and voltage oscillations increases. BC Hydro individually sends requirements for high-power DR about minimum relay settings for low and high frequency. Standard setting requirements for abnormal values of frequency and voltage are represented in tables 2 and 3.

Table 2 - Off-Nominal Frequency Minimum Performance

Underfrequency Limit, Hz	Overfrequency Limit, Hz	Minimum Time
60.0-59.5	60.0-60.5	Continuous
59.4-58.5	60.6-61.5	3 minutes
58.4-57.9	61.6-61.7	30 seconds
57.8-57.4		7.5 seconds
57.3-56.9		45 cycles
56.8-56.5		7.2 cycles
Less than 56.4	Greater than 61.7	Instantaneous

Table 3 - Response to Abnormal Voltages

% of Nominal Voltage	Clearing Time, s
$V < 50\%$	0,16
$50\% < V < 90\%$	2
$90\% < V < 106\%$	Normal Operation
$106\% < V < 120\%$	1
$V \geq 120\%$	0,16

### LVRT ability

From the examples discussed above, it becomes clear that connecting additional generation to the network is a complex and time-consuming process to fulfill all the requirements and standards necessary to comply with the standards of stability and security of this network.

The grid codes describe the requirements for changes in voltage, frequency, requirements for active and reactive power etc. An important part of these codes is the requirement to remain a certain period of time connected to the network during a voltage dip (Eng. Low Voltage Ride Through - LVRT) [12]. Examples of such standards are given in the requirements of BC Hydro (table 3). For further use, we introduce terminology according to GOST 30804.4.30-2013.

The voltage dip is characterized by the following main values: the depth of the voltage dip, residual voltage, and the duration of the dip.

The depth of the voltage dip is equal to the difference between the reference voltage (the reference voltage is usually the nominal voltage of the grid or voltage according to the contractual conditions) and the residual voltage. The result usually is given as a percentage of the reference voltage.

Residual voltage is the smallest of the values measured during a voltage dip.

The duration of the voltage dip is calculated as the difference between the end and the beginning of the voltage dip.

Similar requirements for working with voltage dips are specified in GOST R IEC 61727-2016, which regulates the connection of photovoltaic plants to distribution electrical networks in the territory of the Russian Federation. According to this standard, photovoltaic power plants remain connected to the electricity distribution network, if the voltage values do not go beyond the ranges given in table 4. This requirement applies to single-phase and three-phase networks.

Table 4. Settings for photovoltaic power plants at abnormal voltage levels

The ratio of voltage to nominal value	Maxium duration, seconds
$V < 50\%$	0,1
$50\% \leq V < 85\%$	2
$85\% \leq V \leq 110\%$	Normal Operation
$110\% < V < 135\%$	2
$V \geq 135\%$	0,05

Deviation is determined by the rms voltage values measured at the point of connection to the electrical distribution network. It is necessary to take into account the voltage drop between the point of connection to the electrical distribution network and the output of the inverter.

After a photovoltaic plant has disconnected from the distribution network, its control subsystem should remain connected to the network in order to monitor its parameters and ensure a possible reconnection.

Voltage dips can occur, for example, due to short circuits (SC) or unbalanced reactive power. Previously, power plants based on renewable energy sources (RES) were allowed to be disconnected from the network, and then connected again after a while, when the emergency was already eliminated. But to do this, when their total installed capacity is significant, is no longer possible, since an additional disconnection of a generation further worsens the network regime. In addition to the requirement to remain connected to the network, many grid codes require power plants to additionally support the network during an emergency, feeding it with reactive current to raise the voltage [12].

Before a generating plant can be connected to the grid, the transmission system operator normally requires a certificate. One of the certification requirements is the measurement of electrical characteristics which includes a test of the LVRT capability. This test is carried out by an independent measuring institute. During the test, voltage dips are simulated and the behavior of the plant is measured and evaluated. Such measurements are not required for every single plant, because normally only the prototypes of a product series are tested. That is why special mobile trailers-emulators are used to check the adequate behavior of relay automation at an already operating station [12].

The LVRT ability can be tested according to various standards:

- IEC 61400-21 (France)
- FGW TR3 (Germany)
- The Grid Code (UK),
- PO 12.3 and PO 12.2 draft (Spain)
- CEA Connectivity Standards 2013 (India)

For the latter, for example, it is prescribed that wind farms (WPP) at voltage of 66kV and above should remain in operation, if the voltage characteristic is not lower than that shown in Figure 4 [13].

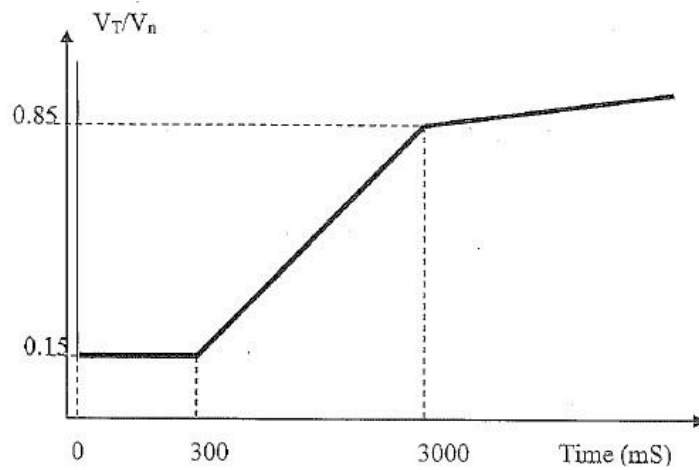


Figure 4 – Maximum allowable voltage dips and time intervals specified in CEA 2013

Where  $V_T$  is the actual voltage at the connection point,  
 $V_n$  - nominal voltage in the grid at the point of connection.

Moreover, during a voltage dip in the grid, the WPP must generate active power in proportion to the remaining voltage and also maximize the supply of reactive current for 300 ms or less if the voltage recovers faster [13].

For the French code IEC 61400-21, the minimum boundaries for the acceptable range of reactive power are also specified, which is directly related to the ability to support the network during voltage dips (Figure 5) [14].

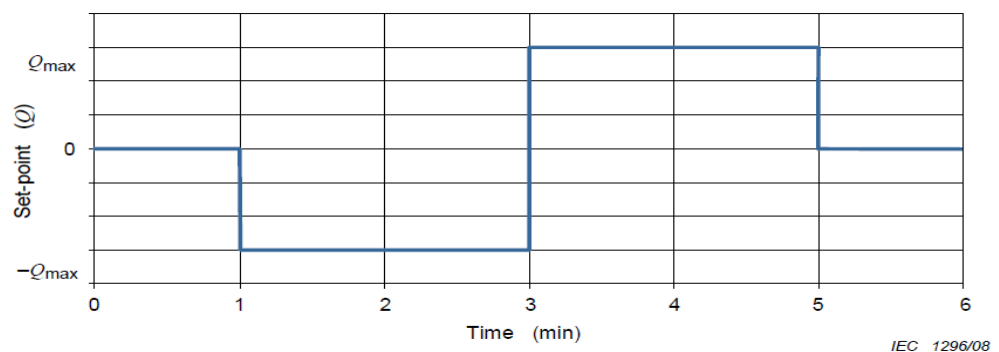


Figure 5 – Acceptable limits for reactive power control

Similar requirements for PV plants in various countries began to be introduced for grid codes a few years later than for WPP. This is due to several reasons.

Firstly, solar energy has previously developed more slowly than wind, and only in 2016 for the first time the total amount of new installed capacity of PV for the year exceeded wind. In 2017 their total gap decreased even more in favor of solar energy [2]. Therefore, with an increase in the share of solar energy, the relevance of additional requirements for PV began to grow.

Secondly, in PV plants, in contrast to WPP, there are no reserves of kinetic energy (RKE). The RKEs are a high-speed power reserve that allows us to ensure the stability of the system before the primary frequency and active power controllers begin to respond. WPPs have an inertial response, i.e. the ability to increase the power of the machine in the first seconds of the transition mode. For PV plants in recent years this problem was solved by introducing a virtual inertia controller. In the case of a sudden increase in load or loss of generating capacity, the power to provide inertial response using PV plants comes from the operational reserve to the station load [5].

One of the main parameters for determining the value of the inertial response is the coefficient of virtual inertia  $k_{VI}$ , which acts as a proportional link in the structure of the controller.

According to the reasons given above, the creation of requirements for the operation of PV plant in emergency conditions, first of all, the LVRT ability, is a reasonable event. And that is why mobile trailers-emulators are needed since most of the already operated PV plants did not provide for these requirements earlier.

### **Inverter simulation**

Inverters for PB plant have a three-phase connection and are capable of both producing and absorbing reactive power in the mode of generating active power into the network. This is possible thanks to control circuits based on pulse width modulation (PWM), which provide time synchronization of the three



branches of the inverter and the desired phase shift relative to the voltage of the grid.

An example of a three-phase inverter with PWM was modeled by Matlab Simulink and is shown in Figure 6.

The load is the RLC circuit, and the generator is a constant voltage source. The magnitude of the frequency for PWM is chosen 10 kHz, which is a compromise between the quality of the output characteristic (the frequency should be higher) and the acceptable switching loss (the frequency should be lower).

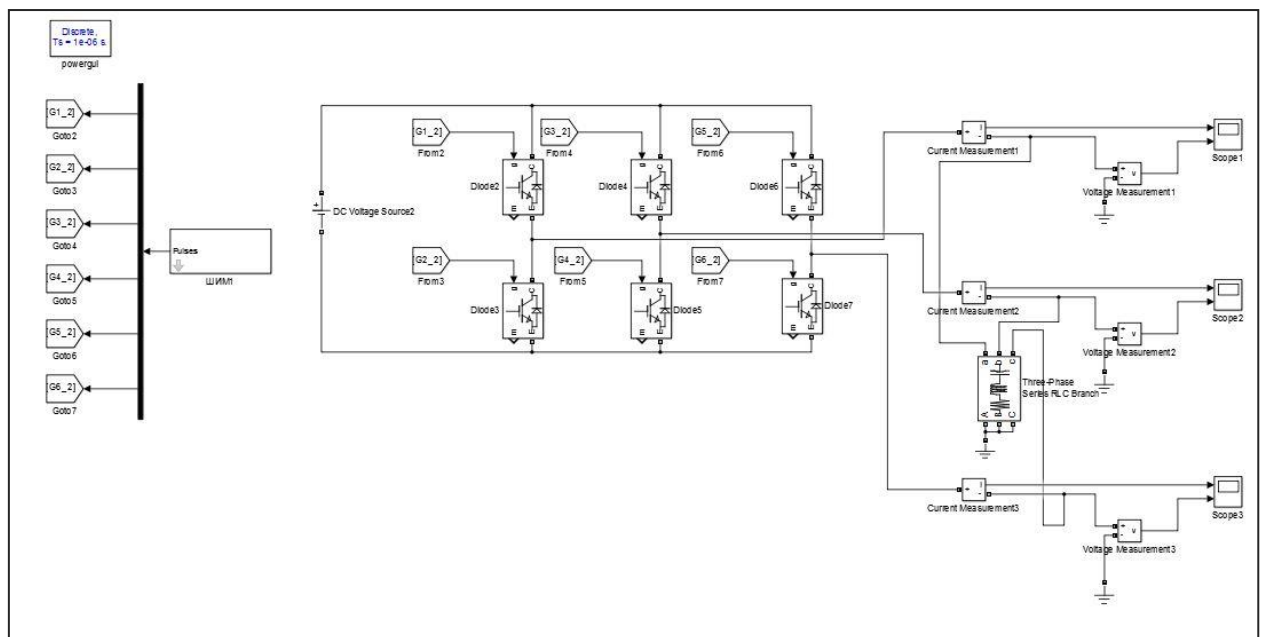


Figure 6 – Inverter circuit with PWM