

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

На правах рукописи

Давлатов Азамджон Махмадиевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА МИНИ-ГЭС НА БАЗЕ МНОГОФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО
ГЕНЕРАТОРА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель—
доктор технических наук,
профессор
Ганджа С.А.

Челябинск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ АВТОНОМНОЙ	
 НЕОБСЛУЖИВАЕМОЙ МИНИ-ГЭС.....	21
1.1 Принцип построения автоматизированной мини-ГЭС, работающей в автономном и сетевом режимах.....	22
1.2 Анализ вариантов генератора для автоматической мини-ГЭС с точки зрения надежности работы.....	28
1.3 Схемы преобразование напряжения применительно к мини-ГЭС.....	33
1.4. Выбор базовой структуры генератор-выпрямитель для мини-ГЭС. Постановка задачи исследования.....	38
Выводы по главе 1.....	41
2. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОФАЗНОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОР	
 ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ	
 И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ.....	42
2.1 Анализ работы многофазного генератора на однополупериодный выпрямитель.....	44
2.2. Анализ работы многофазного генератора на двухполупериодный выпрямитель.....	47
2.2.1. Соединение фаз в звезду.....	47
2.2.2. Соединение фаз в кольцо.....	50
2.3. Анализ работы многофазного генератора на полную мостовую схему выпрямления.....	53
2.3.1. Параллельное соединение мостов	53
2.3.2. Последовательное соединение мостов.....	55

2.4. Сравнительный анализ схем выпрямления.....	58
Выводы по главе 2.....	61
3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА И ВЫПРЯМИТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ФАЗ ДЛЯ АНАЛИЗА НОМИНАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ.....	62
3.1. Теоретические основы моделирования электромеханических преобразователей на основе метода конечных элементов.....	63
3.2. Построение цифровой модели комплекса генератор-выпрямитель для различного количества фаз и различных схем выпрямлении с применением МКЭ.....	67
3.3. Исследование трехфазного генератора и выпрямителя.....	71
3.4. Исследование четырехфазного генератора и выпрямителя	76
3.5. Исследование пятифазного генератора и выпрямителя.....	81
3.6. Исследование шестифазного генератора и выпрямителя.....	87
3.7. Исследование семифазного генератора и выпрямителя.....	92
3.8. Исследование восьмифазного генератора и выпрямителя.....	98
3.9. Исследование девятифазного генератора и выпрямителя.....	104
3.10. Анализ вариантов выпрямления напряжения для различного количества фаз и различных схем выпрямителя для нормального режима и аварийных режимов.....	110
Выводы по главе 3.....	116
4. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕУПРАВЛЯЕМЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ.....	118
4.1 Расчёт показателей надёжности многофазного вентильного генератора мини-ГЭС.....	120
4.2. Модель надёжности многофазного синхронного генератора.....	123
Выводы по главе 4.....	131

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ	
ПОЛОЖЕНИЙ ПО ВЫПРЯМЛЕННОМУ НАПРЯЖЕНИЮ И УРОВНЮ	
ПУЛЬСАЦИЙ МНОГОФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА.....	132
5.1. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду при работе	
на двухполупериодный выпрямитель.....	134
5.2. Тестирование генератора при соединении фаз в кольцо при работе	
на двухполупериодный выпрямитель.....	136
Выводы по главе 5.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Гидроэнергетические ресурсы республики Таджикистан..	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Справка о внедрении результатов диссертационной	
работы в Институте энергетики Таджикистана.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в	
производственную и научную деятельность ООО НПП «Привод».....	169

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Автономная необслуживаемая мини-ГЭС - гидроэлектростанция малой мощности, работающая в автоматическом режиме без обслуживающего персонала

Вентильная электрическая машина - бесщеточная машина постоянного тока, обмотка якоря которой связана с внешними цепями через вентильное коммутирующее устройство.

Коэффициент использования обмотки – отношение количества проводников, по которым диодный мост пропускает ток, к общему количеству проводников.

Многофазная электрическая машина – электрическая машина с числом фаз больше трех традиционных.

Метод конечных элементов - это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Полномостовой выпрямитель – выпрямитель, каждая фаза которого присоединена к мосту из 4 диодов. Различают полномостовые выпрямители при соединении мостов параллельно и при соединении мостов последовательно.

Соединение фаз в звезду – соединение фаз многофазной обмотки при котором концы фаз соединяются в одну нейтральную точку.

Соединение фаз в кольцо – соединение фаз многофазной обмотки при котором конец одной фазы соединяется с началом следующей фазы.

Среднее напряжение – среднее напряжение между максимальным и минимальным значениями.

Среднеквадратичное напряжение – это такое значение переменного напряжения, при котором нагрузка потребляет столько же силы тока, как и при постоянном напряжении.

Схема Миткевича - трёхфазный выпрямитель, в котором три четверти моста соединены параллельно.

Схема Ларионова - трёхфазный выпрямитель, в котором три полумоста, соединенные параллельно, объединены звездой («звезда-Ларионова»).

Уровень пульсаций напряжения – отношение между разностью максимального и минимального напряжения к среднему напряжению.

Цифровая модель – математическая модель электрической машины, описываемая системой дифференциальных уравнений, решаемых методом конечных элементов.

Ansys Electronics Desktop – CAE система, позволяющая рассчитывать электрические и магнитные поля сложных систем на основе метода конечных элементов. Позволяет создавать цифровые двойники электромеханических систем.

Trancient – режим программы **Ansys Electronics Desktop**, который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора.

Scopus – мировая библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. База данных индексирует научные журналы, материалы конференций и серийные книжные издания, а также профессиональные журналы (Trade Journals).

Web of Science – поисковая интернет-платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Web of Science охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БС – блок связи;

ГОСТ – государственный стандарт;

ГТ – гидротурбина;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ДВП – датчики выходных параметров;

КЗА – коммутационно- защитная аппаратура;

КДА – контрольно-диагностическая аппаратура;

КРА – коммутационно - защитная и распределительная аппаратура;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛЭП – линия электропередачи;

МКЭ – метод конечных элементов;

Мини-ГЭС – гидроэлектростанция малой и средней мощности (до 500 кВт);

ПЗТ – привод затвора турбины;

ПРТ – привод разгонный турбины;

РИНЦ – российский индекс научного цитирования;

Р – регулятор турбины;

РВ – регулятор возбуждения;

САЕ – система автоматизированного проектирования, предназначенная для анализа электромеханических систем;

СГ – синхронный трёхфазный генератор;

СПН – силовой преобразователь напряжения;

ТУВ – тиристорное устройство возбуждения;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЮУрГУ – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Все аналитические выражения в диссертации приводятся для единиц измерения системы СИ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Постоянное наращивание потребления электроэнергии является общей тенденцией развития стран европейского и мирового сообщества. Основные потребности в настоящее время в электроэнергии удовлетворяет углеводородная энергетика. Это, в основном, сжигание нефти, газа и угля. Утверждения о том, что эти запасы стремительно истощаются, носят спекулятивный характер. В основном они отражают борьбу сторонников традиционной и альтернативной энергетики. Запасов этого вида энергии хватит еще на достаточно долгое время. Но в наши дни неоспоримым фактором, ограничивающим использование углеводородов, является экология. Нормы выброса диоксида углерода взяты под контроль Пражской конвенцией, которую подписали практически все ведущие мира. В этих условиях мировое сообщество вынуждено развивать альтернативные виды энергетики, которые используют природную энергию, преобразованную от солнечной энергии, и которые не оказывают существенного давления на экологию окружающей среды. Гидроэнергетика в этом балансе занимает ведущую роль, запасы ее достаточно велики, расположены примерно равномерно по всему земному шару и технологически использовать эти запасы гораздо проще, чем запасы атомной энергии, термоядерной энергии, биоэнергии. Но гидроэнергетика тоже содержит в себе существенные противоречия. Как отрасль, гидроэнергетика начала развиваться с больших мощностей. Это легко объяснить. Существует закон в электромеханике: от линейных размеров, определяющих габариты и массу, отдаваемая электрической машиной мощность зависит в четвертой степени. Очень выгодно создавать гидрогенераторы на сотни и тысячи мегаватт. Они имеют наивысшие удельные показатели энергии на единицу объема и массы, самую низкую стоимость производимой электроэнергии. Современные технологии позволяют производить гидрогенераторы, мощность которых ограничена только мощностью реки. Но анализ роста гидроэнергетики большой мощности показывает, что она замедляется в своем развитии и приходит в насыщение. Практически все крупные реки уже освоены. Годовой прирост крупной

гидроэнергетики не превышает 2 %. Этого крайне недостаточно для покрытия нарастающего дефицита энергии. Кроме этого мощные ГЭС так же в определенной степени влияют на экологию, заводняя и заболачивая большие территории, пригодные для использования. В связи с этим, интересы и интеллектуальные усилия ученых стали направляться в сторону гидроэнергетики средней и малой мощности. Энергетический потенциал этой части энергетики на порядок превышает запасы мощной гидроэнергетики и в настоящее время практически не использован, но развитие этой отрасли имеет свои особенности и существенные отличия. Эффект от использования малой и средней гидроэнергетики можно получить только при создании энергосети из большого количества микро-, мини- и средних ГЭС (далее мини-ГЭС). Если мощные гидроэлектростанции сконцентрированы в отдельных местах, где можно создать рабочие места для обслуживающего и эксплуатационного персонала, то мини и микро-ГЭС такой возможности не имеют. Они будут просто экономически не выгодны, если к ним будет прикреплено хотя бы одно рабочее место. Это должны быть станции - роботы с интеллектуальной системой управления и эксплуатации, работающие весь свой ресурс с минимальным регламентом обслуживания и ремонта. В связи с такой постановкой задачи на первый план выходят вопросы надежности работы энергетического комплекса мини-ГЭС. Это комплексная проблема решается повышением надежности всех узлов, агрегатов и компонентов системы управления и их резервированием. Основным энергетическим компонентом мини-ГЭС является генератор, который преобразует механическую энергию водотока в электрическую энергию. В качестве такой электрической машины для этих мощностей применяют вентильные генераторы, которые работают совместно с полупроводниковым выпрямителем. Для генераторов надежными должны быть вращающиеся опоры, токоподвод и якорная обмотка. Одним из направлений повышения надежности вентильных генераторов является увеличение числа фаз. Так для трехфазного генератора выход из строя одной фазы приводит к аварии, для многофазного генератора это приведет только к ухудшению выходных параметров, которые могут оставаться в пределах допустимой нормы. При этом, при

увеличении числа фаз улучшается энергетика генератора, так как в процессах коммутации участвует меньший объем отключаемой от источника меди, которая распределена по фазам.

Следует отметить, что увеличение количества фаз приводит к очередному техническому противоречию. Увеличивается количество вентилях, увеличивается объем и стоимость коммутационной аппаратуры, усложняется токоподвод к якору. Это противоречие можно уменьшить, если делать силовую гибридную сборку для выпрямительного модуля и встраивать его в сам генератор. Но технологии силовой электроники только начали развиваться в этом направлении и нашли применение исключительно в космической технике и приводах специального назначения. Пройдет еще значительный период времени, когда они будут применяться в приводах общепромышленного назначения. **В связи с этим возникает проблема оптимизации количества фаз для многофазных приводов вообще и для мини-ГЭС в частности.** Их должно быть достаточно, чтобы обеспечить с одной стороны требуемую надежность, а с другой стороны - приемлемые габаритные размеры и стоимость. Известно, что 1 А коммутируемого тока стоит примерно около 100 рублей. При увеличении мощности и числа фаз стоимость силовой части может существенно вырасти и стать экономически неоправданной. Для мини-ГЭС при увеличении их общего количества для освоения названного ресурса это очень важно, так как помимо высокой надежности они должны быть экономически выгодными.

Степень научной разработанности исследуемой темы

Анализ российских источников показывает, что тема увеличения фаз для приводов разных назначений развивается уже более 30 лет.

Ученые Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Беспалов В.Я., Каржавов Б.Н., Сидоров А. Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г проводили исследование неуправляемых выпрямителей для вентильных генераторов, многофазных и многополюсных якорных обмоток синхронных генераторов, обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу,

пульсаций напряжения и электромагнитного момента, оптимизации структуры нерегулируемого электропривода.

В Московском государственном строительном университете (национальном исследовательском университете) ученые Вильданов К.Я., Забора И.Г., Чернов Р.О. вели работы по анализу генераторов для альтернативных источников энергоснабжения, исследовали блочно-модульные структуры для автономных источников с произвольным числом фаз.

Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Петров П.Г., Краузе из Омского государственного университета путей сообщения изучали автономные системы электроснабжения на базе возобновляемых источников, в частности для малых гидроэлектростанций.

Ученые Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина Бердичевский А.С., Лопатин Е.Г., Недзельский В.Е., Берая Р.К., Соколов Н.В., Пластун А.Т. проводили анализ и синтез многофазных якорей вентильных электрических машин с кольцевой обмоткой.

В Южно-Уральском государственном университете многофазные системы изучали ученые Лифанов В.А., Зильберман С.З., Воронин С.Г., Ганджа С.А. Они были применены для моментных электродвигателей, электродвигателей с радиальным ротором, электрических машин с аксиальным магнитным потоком [21-47].

В Самарском государственном техническом университете ученые Грачев П.Ю., Костырев М.Л. Разрабатывали математические модели электромеханических преобразователей для автономных установок, включая ВЭУ, микро и мини-ГЭС, занимались многообмоточными преобразователями для автономных источников.

Ученые Уфимского государственного авиационного технического университета Исмагилов Ф. Р., Вавилов В.Е, Фаррахов Д. Р., Минияров А. Х., Веселов А. М. занимались исследованием многофазных синхронных генераторов с однополупериодным выпрямлением.

Ученые Курганского государственного университета Мошкин В.И., Шестаков Д.Н., Угаров Г.Г. на базе линейных электродвигателей изучали надежность и эффективность работы электромеханических преобразователей.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете ученые Петроченков А.Б., Мишуриных С.В. занимались вопросами оптимизации энергопотребления электромеханических преобразователей в сложных условиях эксплуатации.

Анализ международной наукометрической базы Scopus и Web of Science выявил большое количество исследований, касающихся изучению многофазных систем. Среди них:

- G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini Indian Institute of Technology. Проводили исследования 6-ти фазных гидрогенераторов для малых ГЭС

- C. Kalaivani, K. Rajambal, Department of Electrical and Electronics Engineering, Pounicherry Engineering College. Представили исследование 7-ми фазного генератора для малой гидроэлектростанции.

- Steven Jordan, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester. Представил диссертационные исследования многофазного синхронного генератора для системы электроснабжения самолета.

- F. Barrero, M.J. Duran, Electronic Engineering Department of the University of Seville, Spain. Проводили разработку системы управления многофазными электродвигателями.

- E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H.A. Toliyat and S. Williamson, Liverpool John Moores University, Department of Electronics and Electrical Engineering. Изучали многофазные асинхронные приводы.

- J. Liu, L. Huang, H. Yu, C. Wen and W. Zhong, School of Electrical Engineering Southeast University, Nanjing, China. Исследовали 6-тифазный линейный двигатель.

- E. Jung, H. Yoo, S. Sul, H. Choi and Y. Choi, Doosan Infracore, Yongin, South Korea. Опубликовали исследование 9-фазного привода для скоростного лифта.

- M. Jones, S.N. Vukosavic, D. Dujic and E. Levi, Faculty of Engineering and Technology, Liverpool John Moores University, Liverpool, U.K. Представили исследование системы контроля для многофазного асинхронного привода.

- A.G. Yepes, J. Malvar, A. Vidal, O. López and J. Doval-Gandoy, Applied Power Electronics Technology Research Group Universidade de Vigo, Vigo, Spain. Занимались изучением высокочастотных гармоник в многофазных приводах.

- S.S.R. Bonthu, J. Baek and S. Choi, CNC Table Products Cincinnati Incorporated
Фонд Федерального института промышленной собственности содержит большое количество патентов на изобретения и патентов на полезные модели, относящиеся к проблеме многофазных электрических двигателей и генераторов.

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, а также анализ патентного фонда говорит о том, что разработка многофазных систем энергоснабжения является важной и актуальной задачей. В этой области учеными сделаны большие научные заделы и проведены обширные исследования. С одной стороны, изучены различные схемотехнические решения для выпрямления тока, разработаны конструкции многофазных асинхронных, синхронных, реактивных и индукторных генераторов, исследованы квазистационарные и переходные процессы в электрической машине и системе управления, разработаны системы диагностики аварийных ситуаций. Но с другой стороны, большое количество научных исследований, в том числе, проведенных в последние пять лет, говорят о том, что тема многофазных приводов остается актуальной и многие вопросы не решены и до конца не проработаны. В частности, не решен вопрос оптимизации количества фаз многофазных генераторов с точки зрения обеспечения необходимой надежности, нет обоснованных рекомендаций по схемам соединения фаз, применительно к гидрогенератору не изучены вероятности отказа якорной обмотки и ключей силового выпрямителя, не исследован уровень допустимых пульсаций при аварийных режимах обрыва и короткого замыкания. Эти вопросы применительно к гидрогенераторам мини-ГЭС требуют своего решения как на инженерном, так и на научном уровне.

Цель диссертационного исследования. Основной целью диссертационного исследования является изучение аварийных режимов работы вентильного синхронного магнитоэлектрического генератора с произвольным числом фаз, являющегося источником генерации для мини-ГЭС, на основе цифровой модели электромагнитного анализа и цифровой модели подключенного пассивного выпрямителя, выбор оптимального количества фаз из условий обеспечения требуемого уровня пульсаций и вероятности отказа обмотки и силовых ключей.

Задачи исследования. Для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие **научные задачи**:

- определить структуру автономной необслуживаемой мини-ГЭС;
- разработать цифровую комплексную модель генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций;
- провести исследование различных отказов в виде обрывов для различного количества фаз генератора и выпрямителя по критерию пульсаций выходного напряжения;
- исследовать вероятность отказов якорной обмотки и силовых ключей применительно к работе мини-ГЭС;
- определить оптимальное количество фаз по критериям уровня пульсаций и вероятности отказов якорной обмотки и силовых ключей;
- экспериментально подтвердить теоретические результаты, выполненные на цифровой модели.

Объект исследования. Объектом исследования является электротехнический комплекс мини-ГЭС на базе вентильного синхронного магнитоэлектрического генератора с произвольным числом фаз, работающего на неуправляемый выпрямитель.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы анализа вентильного синхронного магнитоэлектрического генератора с произвольным числом фаз, работающего на неуправляемый выпрямитель в нормальных и аварийных режимах на основе цифровой модели электрической машины и

электронной системы, методы статистического и вероятностного анализа отказов якорной обмотки и электронных компонентов.

Методология и методы исследования. Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, теории электрических цепей, теории полупроводниковой преобразовательной техники, методов на основе схем замещения, метода конечных элементов для цифрового моделирования, методов физического моделирования.

Научная новизна. Представленная работа восполняет пробел в исследовании многофазных электрических генераторов в части создания цифровой модели комплекса генератор- выпрямитель при произвольном числе фаз, исследовании пульсаций выходного напряжения при различных вариантах отказов, исследовании вероятности отказов компонентов электротехнического комплекса автономной необслуживаемой мини-ГЭС.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические зависимости среднеквадратичного выпрямленного напряжения, уровня пульсаций выпрямленного напряжения и коэффициента использования обмотки якоря для работы генератора на пассивные выпрямители однополупериодного выпрямления, двухполупериодного выпрямления и полномостового выпрямления, **отличающиеся тем**, что выведены для произвольного числа фаз.

- цифровую комплексную модель генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз, **отличающуюся от известных моделей тем**, что генератор для всех вариантов анализа имеет одинаковые габариты, число полюсов и якорную обмотку с одинаковым общим количеством проводников, разложенных по фазам, что позволяет в одинаковых условиях формирования ЭДС вращения сравнить эффективность различных схем выпрямления, включая штатные режимы и нештатные режимы обрыва фаз и диодов;

- результаты исследования среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем многофазной

якорной обмотки и схем выпрямителя, **которые** для нештатных ситуаций обрыва фазы или диода позволяют определить оптимальное количество фаз и эффективную схему выпрямителя;

- результаты исследования вероятности отказа многофазной якорной обмотки генератора и электронных компонентов выпрямителя применительно к работе в мини-ГЭС при нештатных ситуациях обрыва фаз и диодов, **отличающиеся тем**, что позволяют выбрать оптимальное число фаз по критерию наименьшей вероятности отказа.

Соответствие паспорту специальности

Проведенные исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2.Электротехнические комплексы и системы: п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Теоретическая значимость. В работе представлены дальнейшее развитие электротехнических комплексов, включающих в себя многофазные генераторы и выпрямители, в части исследования среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения при разных вариантах отказов якорной обмотки и компонентов выпрямителя. Проведен анализ этих показателей для разного количества фаз, вариантов соединения якорной обмотки и схем выпрямления. Проведены исследования вероятности отказов элементов

комплекса, позволяющие оптимизировать число фаз с точки зрения наименьшей вероятности отказа.

Практическая значимость. Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка цифровой комплексной модели генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций. Кривые выпрямленного среднеквадратичного напряжения и кривые пульсаций выпрямленного напряжения в инженерной практике позволяют провести предварительный анализ вариантов исполнения многофазной якорной обмотки и схем выпрямления. Практическую ценность имеют рекомендации по выбору оптимального числа фаз применительно к работе автономной мини-ГЭС.

Внедрение результатов работы. Математические модели электрических машин с выпрямителем, зависимости среднеквадратичного выпрямленного напряжения и уровня пульсаций выпрямленного напряжения для многофазных систем, методики анализа коротких замыканий используются в учебном процессе при подготовке специалистов электротехнических специальностей ЮУрГУ и Института энергетики Таджикистана

Апробация работы. Основные положения результатов диссертационной работы и отдельные ее части докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники (Казань 2019);
- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Green Energy» (Челябинск 2019);
- Международная научная конференция по энергетическому, экологическому и строительному инжинирингу «ЕЕСЕ-2019» (Санкт-Петербург, 2019);
- Молодая мысль – развитию энергетики (Братск 2020);
- Международная научно-техническая конференция, «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (Sochi 2020);

- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Electrical Power Engineering» (Магнитогорск 2021).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 8 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 5 статей в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus, 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, включая математическое, имитационное и компьютерное моделирование комплексной модели генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз для анализа штатных и аварийных ситуаций, разработка безопасной и эффективной эксплуатации на основе диагностики различных видов отказов; исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из определений, используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка литературы из наименований, приложений. Работа изложена на 169 страницах, из них 143 страницы основного текста. Работа содержит 134 иллюстрации, 70 аналитических выражений, 21 таблицу, 3 приложения.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

Во введении показана актуальность освоения гидроэнергопотенциала малых и средних рек, степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, теоретическая значимость, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

Первая глава содержит определение структуры автономной необслуживаемой мини-ГЭС, обоснование принципа построения мини-ГЭС. На основе анализа различных вариантов в качестве основного выбран вентильный генератор с постоянными магнитами, имеющий число фаз отличное от трех для обеспечения большей надежности при работе в автоматическом режиме. Рассмотрены однополупериодные, двухполупериодные и мостовые схемы выпрямления, применительно к автономной мини-ГЭС. Выбрана базовая структура генератор-выпрямитель для мини-ГЭС.

Во второй главе делается теоретический анализ многофазной модели генератор-выпрямитель. Рассмотрены следующие пассивные выпрямители: однополупериодная схема, двухполупериодная схема при соединении фаз в звезду и кольцо, полномостовая схема при соединении мостов параллельно и последовательно. Выведены аналитические зависимости для среднеквадратичного выпрямленного напряжения, уровня пульсаций и коэффициента использования обмотки якоря. Проведен сравнительный анализ схем выпрямления.

В третьей главе разрабатывается цифровая модель генератора и пассивного выпрямителя. Необходимость разработки цифровой модели обусловлена тем, что на выпрямленное напряжение, помимо схем выпрямления, влияют такие параметры якорной обмотки, как коэффициент укорочения, коэффициент распределения, коэффициент скоса. При создании цифровой модели для корректности сравнения был выбран генератор одних и тех же габаритов, имеющий одни и те же размеры активных частей, одинаковое количество проводников. Изменялось только количество пазов для возможности уложить симметричные

обмотки с различным количеством фаз. На основе цифровой модели были исследованы штатные и нештатные режимы работы при обрывах фаз и диодов для различных схем выпрямления. Проведен сравнительный анализ вариантов. В качестве критериев сравнения были выбраны среднее напряжение и уровень пульсаций.

В четвертой главе сделан анализ показателей надежности вентильного генератора с неуправляемым выпрямителем при нештатных ситуациях для различного числа фаз. Сделан вывод о том, что по этим показателям увеличение фаз должно быть оптимальным из-за увеличения вероятности отказов. Рекомендована шестифазная обмотка как с точки зрения надежности, так и с точки зрения технологичности.

В пятой главе показаны результаты испытаний генератора с шестифазной обмоткой для нормальной работы и нештатной работы обрыва фазы или обрыва диода. Исследовались соединения фаз в звезду и кольцо. Эксперимент с достаточной точностью подтвердил теоретические выводы работы.

Заключение содержит выводы, сделанные по результатам всей работы. Определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики.

В диссертации приведен список использованных источников из 154 наименований отечественных и зарубежных авторов. В работе имеется 3 приложения.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ АВТОНОМНОЙ НЕОБСЛУЖИВАЕМОЙ МИНИ-ГЭС

Вводные замечания

Разделение рек по категориям большие, средние и малые весьма условно и его часто связывают с видом использования этих ресурсов [6]. Наиболее широкое применение имеет классификация их по гидрологическим характеристикам, например, по ГОСТ 19179-73. Согласно этому документу, к малым причисляют реки длиной до 100 км и площадью водосбора до 2000 км².

ГОСТ 17.1.1.02-77 делит водотоки на категории. Малой категории соответствуют реки, площадью водосбора не более 20 тыс. кв. км и расходом воды за период низкого стока не выше 5 м³/с.

СП 33-101-2003 называет малыми реки с площадью водосбора от 1000 до 5000 кв. км.

Целесообразно при оценке гидроэнергоресурсов делить реки по величине потенциальной мощности. По этой классификации к малым относят водотоки мощностью не более 2000 кВт для равнинных условий и не более 1700 кВт – для горных условий.

Классификация рек Северо-Востока РФ [2] делит их на 3 группы по величине потенциальной мощности за лимитирующий сезон (май-сентябрь):

1-я группа – мощностью более 5000 кВт;

2-я группа – 1000-5000 кВт;

3-я группа – 100-1000 кВт.

Малыми реками принято так же считать водотоки некоторой территории длиной не более 200 км, площадью водосбора до 5000 кв. км, с расходом до 50 м³/с, которые имеют особый характер гидрологических процессов и определенные возможности хозяйственного использования природных ресурсов.

Перечень наиболее характерных малых и средних рек России и ближнего зарубежья приведен в приложении П1.

Анализ показывает, что в значительной мере неиспользованный потенциал малых и средних рек как в России, так и за рубежом, во много раз превышает потенциал крупных ГЭС. При этом следует отметить, что освоение его экономически целесообразно только при развитии сети необслуживаемых мини-ГЭС, работающих в автономном и сетевом режимах. В связи с этим возникает вопрос надежности работы этой энергосети.

1.1. Принцип построения автоматизированной мини-ГЭС, работающей в автономном и сетевом режимах

Особенностью существующих мини-ГЭС является наличие механических регулировочных устройств частоты вращения гидротурбины, которые устанавливаются для стабилизации выходного напряжения в нормируемых пределах. Как правило, это регулировка затвора водопровода к турбине, регулировка угла наклона лопастей гидротурбины, балластная нагрузка, изменяющая момент сопротивления гидротурбины. Достаточно подробно структура существующих мини-ГЭС описана в источниках [48, 50-52].

Следует отметить, что механические устройства регулировки частоты работают крайне ненадежно. Статистика отказов мини-ГЭС в республике Таджикистан подтверждает этот вывод. Например Ховалингская гидроэлектростанция в деревне Сариосёб, построенная в 2010 году мощностью 15 кВтч, из-за отказа системы регулирования не работает. Малая гидроэлектростанция «Яхшо» мощностью 5 кВт была построена в Шурободском районе в 2009 году, прекратила работу в связи с выходом из строя гидротурбины. Другая малая гидроэлектростанция, «Хафса» была построена в 2010 году, мощностью 15 кВт в Шуробском районе – не функционирует из-за повреждение системы регулирования возбуждения генератора. В 2009 году была построена малая гидроэлектростанция «Шуробский район» мощностью 20 кВтч. По этой же причине мини-ГЭС прекратила работу. Также существует большая статистика отказов из-за выхода из строя регуляторов гидротурбин. Следовательно, можно заключить, что основными причинами выхода из строя малых электростанций является отказ механических

регуляторов турбин, а также системы возбуждения генератора. Проблему не решает автоматизация и компьютеризация этих систем. Они становятся более сложными, что снижает надежность их работы. Другими словами, отказывают те элементы, которые обеспечивают качество электроэнергии: стабильность амплитуды выходного напряжения- система возбуждения генератора; стабильность частоты выходного напряжения- регулятор скорости вращения турбины. Следует также отметить, что данная система регулирования снижает эффективность работы станции, так как часть энергии водяного потока не преобразуется в полезную мощность для потребителя и является балластом.

Статистика показывает [1, 11,14], что каждую мини-ГЭС обслуживают в среднем 2...3 человека непрерывно. К этому персоналу необходимо добавить людей, работающих в районных системах электроснабжения и занятых конкретной станцией. Таким образом, стоимость производства электроэнергии возрастает весьма значительно из-за высоких эксплуатационных расходов. Практика показывает, что такая система работает крайне неэффективно. Многие мини-ГЭС из-за отказов законсервированы и ожидают ремонта. Для поставленной цели создания сети автоматических необслуживаемых мини-ГЭС эта структура не подходит и требует замены.

Для построения автоматизированной мини-ГЭС необходимо совершенствовать элементный состав мини-ГЭС с целью повышения его надежности и сокращения эксплуатационных расходов. Основная идея заключается в отказе от традиционных методов регулирования амплитуды напряжения, путём изменения тока возбуждения, и частоты за счет регулирования скорости вращения турбины или балластной нагрузки [10-18]. Вместо этого предлагается обеспечить стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения ГЭС с помощью электронного преобразователя напряжения, а возбуждение генератора осуществлять от постоянных магнитов. Реализации мини-ГЭС в таком виде способствует, во- первых, значительное развитие электронной элементной базы в части существенного повышения передаваемой мощности,

уменьшения потерь преобразования, массы и габаритов аппаратуры, во-вторых, появление новых магнитных материалов с высокой удельной энергией.

Расширение использования электронной аппаратуры позволит сделать ГЭС действительно необслуживаемым объектом. Для этого в её состав необходимо ввести устройства, реализующие функции диагностики состояния узлов и агрегатов ГЭС и функции связи с центральным диспетчерским пунктом системы электроснабжения республики. С учётом изложенного функциональная схема мини-ГЭС, как автономного электротехнического комплекса может быть представлена в виде (рис.1.1.1). Комплекс содержит следующие элементы:

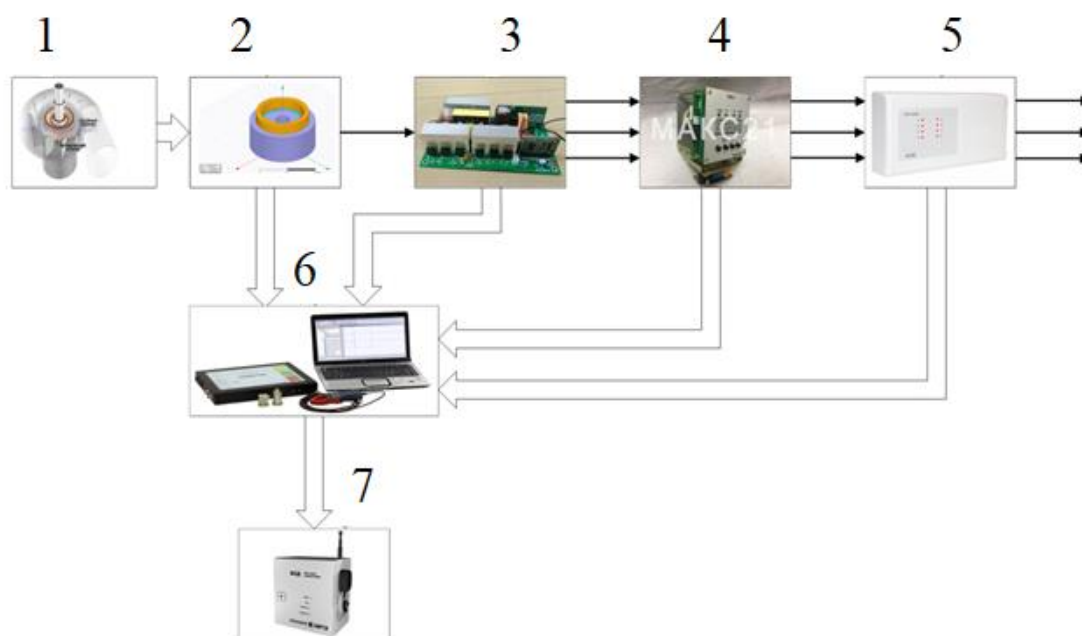


Рис.1.1.1. Функциональная схема автономной автоматизированной мини-ГЭС

1. Гидротурбина (ГТ), в качестве которой предлагается использовать серийный центробежный насос.

2. Синхронный трёхфазный генератор (СГ), в качестве которого предлагается использовать серийный синхронный трёхфазный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

3. Силовой преобразователь напряжения (СПН), включающий в себя три элемента- преобразователь переменного ток в постоянный, преобразователь

постоянного тока в переменный заданной амплитуды и частоты, устройство симметрирования выходного трёхфазного напряжения.

4. Блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), который выдаёт информацию о текущих значениях частоты, тока, напряжения, мощности и выработанной энергии.

5. Блок коммутационно - защитной аппаратуры (КЗА), который включает в себя стандартные для любой электростанции коммутационно- защитные устройства.

6. Блок контрольно-диагностической аппаратуры (КДА), предназначенный для реализации функций диагностики состояния элементов комплекса и оценки его текущей и последующей работоспособности.

7. Блок связи (БС), предназначенный для связи и передачи данных о выходных параметрах и состоянии отдельных элементов на центральный диспетчерский пункт.

Представленная структурная схема хотя и является очевидной, однако почти каждый из её элементов требует дополнительной научно- технической проработки, поэтому рассмотрим её подробнее.

Использование центробежного насоса в качестве гидротурбины достаточно хорошо изучено [48]. При этом для обоснованного выбора типа и мощности насоса, а также оценки возможного диапазона изменения его скорости вращения в процессе эксплуатации, необходимо детальное исследование гидродинамических процессов его работы в режиме турбины. В целом агрегат работает достаточно надёжно.

Генератор на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) является хорошо технологически отработанной и изученной машиной. При правильно подобранных по нагрузке и частоте вращения подшипниках, при использовании высококоэрцитивных постоянных магнитов, исключающих размагничивание при перегрузках и аварийных режимах, эта электромеханическая система работает достаточно надёжно. Существенным недостатком СДПМ при использовании его в качестве генератора автоматической

энергетической установки является возможность возникновения обрывов и коротких замыканий якорной обмотки. **Повышение надежности якоря является определяющим фактором в электротехническом комплексе мини-ГЭС, и требует дополнительного исследования и инновационных предложений.**

Одним из вариантов стабилизации частоты выходного напряжения при изменении нагрузки на валу генератора является выпрямление переменного напряжения генератора и затем конвертация его в стандартное переменное напряжение. Такая схема позволяет применить накопитель энергии в виде аккумуляторной батареи, включенной в звено постоянного тока. В СПН преобразователь переменного тока в постоянный может быть выполнен в разных вариантах. Это может быть стандартный одно- или двухполупериодный выпрямитель, а также синусный выпрямитель [13]. Недостатком первой схемы является влияние выпрямителя на синхронный генератор за счёт несинусоидальности потребляемого тока, что ухудшает его энергетические показатели. Синусоидальный выпрямитель позволяет обеспечить синусоидальность фазных токов, но схема его существенно сложнее и стоимость выше. **Поэтому потребуются дополнительная оценка эффективности и границ применения того и другого выпрямителей. Кроме этого необходимо исследовать надежность работы системы генератор-неуправляемый выпрямитель с оценкой вероятности отказа элементов обеих систем.**

На первый взгляд не вызывает вопросов преобразователь постоянного напряжения в переменное трёхфазное, так как схемы таких устройств хорошо отработаны и серийно выпускаются. Однако в рассматриваемом случае преобразователь работает на несимметричную нагрузку, и вопросы симметрирования напряжений требуют особого внимания, так как несимметрия может быть весьма существенной. Например, одна фаза может иметь нулевую нагрузку, а две другие нагружены до номинальных токов или наоборот, две фазы нагружены, а одна без нагрузки. **Вопросы симметрирования нагрузки на выходе преобразователей хотя и рассмотрены в настоящее время [13], однако**

имеющиеся технические решения достаточно сложны и требуют усовершенствования.

Блок датчиков выходных координат энергетической установки и блок коммутационно - защитной аппаратуры могут быть выполнены на основе стандартных элементов. В первом случае это стандартные датчики частоты и напряжения, а также датчики тока и вырабатываемой мощности. Во втором случае это стандартная коммутационно- защитная аппаратура. Дополнительным требованием к ним является вывод информации об измеряемых координатах и о состоянии коммутационно защитных элементов в цифровой и импульсной форме, для последующего анализа в устройстве диагностики и передачи по выбранным каналам связи.

Блок диагностики является в данном случае важнейшим алгоритмически сложным элементом, так как должен в режиме онлайн на действующей аппаратуре оценивать её работоспособность и выявлять не только возникшие неисправности, но и прогнозировать возможность их возникновения. При этом на него поступает информация с различных датчиков. Например, это датчики вибраций корпусов турбины и генератора. По информации с этих датчиков можно судить о состоянии опор этих устройств. Датчик расхода жидкости, поступающей в турбину, информация с которого используется при определении соответствия её мощности расчётным значениям. Датчик температуры обмотки генератора и силовых ключей преобразователя напряжения, информация с которых позволяет судить об исправности генератора и преобразователя. Датчики, фиксирующие возникновение несимметрии и искажение картины магнитного поля, позволяющие экстренно фиксировать витковое замыкание. Датчики для определения сопротивления изоляции обмотки. Информация с перечисленных датчиков, а также информация о значениях выходных напряжений и токов совместно с информацией, получаемой от математической модели процессов преобразования энергии, заложенной в блок диагностики, являющейся по существу цифровым двойником энергоустановки, используется для оценки её работоспособности и выявления неисправностей.

Полностью автоматизированная необслуживаемая мини-ГЭС должна быть включена в систему мониторинга сети мини-ГЭС. Для связи с центральным диспетчерским пунктом должен быть использован интернет, радиоканал, спутниковая связь.

1.2. Анализ вариантов генератора для автоматической мини-ГЭС с точки зрения надежности работы

Электрическая машина может работать как в двигательном режиме, так и в генераторном режиме. Представляет интерес выбор типа электрической машины с точки зрения надежности для работы в качестве генератора автоматической мини-ГЭС.

Все классы электрических машин, имеющих контактный токоподвод к вращающимся частям, исключим из рассмотрения по причине низкой надежности работы и необходимости обслуживания скользящей контактной пары.

Асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором используются в качестве источников энергии для мини-ГЭС [70,76]. Сам генератор работает достаточно надежно, но при этом следует отметить, что асинхронная машина не имеет внутри себя источника для возбуждения магнитного поля (обмотки возбуждения, постоянных магнитов). Свое возбуждение он обеспечивает за счет реактивной энергии через якорную обмотку из внешней цепи, являясь для сети индуктивной нагрузкой. При наличии большого количества таких генераторов в сети в ней возникает дефицит реактивной мощности. Коэффициент мощности сети резко понижается. Кроме этого, по условиям эксплуатации мини-ГЭС может работать полностью в автономном режиме. В этом случае наличие реактивной мощности в виде конденсаторной батареи необходимо для функционирования генератора. Габариты, стоимость и надежность работы конденсаторной батареи существенным образом зависят от мощности мини-ГЭС. Для малых мощностей это решение может быть приемлемым, но практика показывает, что для средних и больших мощностей использование асинхронных генераторов нецелесообразно по

причине высокой цены и низкой надежности. Кроме этого для данного типа генераторов уменьшается рабочий диапазон частот вращения турбины и усложняется система преобразования напряжения в стандартное по амплитуде. Для разработки типового мощностного ряда мини-ГЭС, которые отличались бы только габаритами, применение асинхронного генератора нецелесообразно.

Вентильно-индукторные генераторы применительно к мини-ГЭС могут быть привлекательны с точки зрения простоты ротора и отсутствия скользящего контактора [20]. Принцип работы его основан на изменении проводимости магнитной цепи при повороте ротора. Но этому классу электрических машин присущи те же недостатки, что и для асинхронного генератора. Свое возбуждение генератор обеспечивает через якорную цепь. Кроме этого, энергоэффективность вентильно-индукторного генератора еще ниже, если сравнивать ее с асинхронным генератором, так как в данный момент времени к сети подключается только одна обмотка, при этом остальные обмотки отключены и ожидают своего такта включения в зависимости от положения ротора. Это резко снижает коэффициент использования меди, КПД и увеличивает потери. Практика показывает, что система управления вентильной машиной достаточно сложна. Она требует наличие датчика положения ротора, его сложной настройки и калибровки для определения оптимального переключения фаз. Само наличие датчика существенно снижает надежность генератора, не смотря на отсутствие контактного токоподвода для якорной цепи. По выше названным причинам вентильно-индукторную машину следует исключить из дальнейшего рассмотрения. Практика применения мини-ГЭС подтверждает этот вывод.

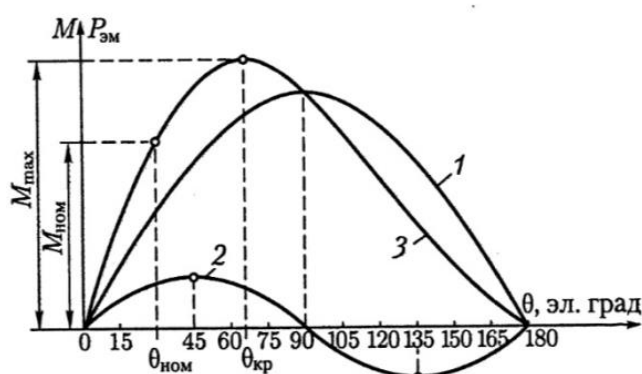
В качестве бесконтактной электрической машины применительно к мини-ГЭС следует рассмотреть синхронный реактивный генератор. По принципу работы он близок к вентильно-индукторной машине. Генератор имеет простую конструкцию явно выраженного ротора. Контактный токоподвод к силовой цепи отсутствует. Для своей работы он не требует дополнительных датчиков. В системе мини-ГЭС он работает на выпрямительный мост.

Оценим энергетические характеристики этого варианта.

Как известно, для синхронной машины с явно выраженными полюсами электромагнитный момент определяется следующей зависимостью:

$$P = \frac{mUE}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (1.2.1)$$

Графическая зависимость электромагнитного момента от угла нагрузки представлена на рис.1.2.1



$$P = f(\theta) \text{ при } E = \text{const}, U = \text{const}$$

Рис.1.2.1. Электромагнитный момент синхронной машины

(1 – составляющая мощности, обусловленная обмоткой возбуждения,
2 – составляющая мощности, обусловленная разностью проводимости по продольной и поперечной осям, 3 – результирующая мощность)

Из рис. 1.2.1 наглядно видно, что составляющая электромагнитной мощности, обусловленная разностью проводимости по продольной и поперечной осям ротора (второй член в уравнении 1.2.1), примерно в 4-5 раз меньше мощности, которую генерирует обмотка возбуждения. Электрическую машину с такой низкой энергетической эффективностью вряд ли стоит рекомендовать для построения ряда перспективных автоматических мини-ГЭС.

Гораздо большую эффективность с точки зрения преобразования энергии имеет класс машин асинхронизированные синхронные генераторы (машины двойного питания) [22,38]. Конструктивно они представляют собой асинхронные машины с фазным ротором, в которых статорная обмотка и роторная обмотка

подключены к своим источникам питания. В классическом варианте для работы машины двойного питания необходим контактный токоподвод к роторной обмотке, но современное развитие этого класса машин позволяет сделать бесконтактный токоподвод. Для этого применяют дополнительные устройства в виде отдельной электрической машины (возбудителя) или вращающегося трансформатора. Преимущество такого класса электрических машин заключается в возможности преобразования напряжения непосредственно в самой электрической машине за счет встраивания во вращающуюся часть управляемого частотного преобразователя. Это преимущество оказывается весьма существенным для генераторов большой мощности от 1.0 МВт до 10 МВт. Предварительный качественный и количественный анализ показал, что для автоматических мини-ГЭС этот класс электрических машин является весьма рискованным с технической точки зрения, так как энергокомплекс является достаточно сложным, и не приемлем с экономической точки зрения, поскольку для малых и средних мощностей является дорогим применение двух встроенных электрических машин и системы управления ими. Очевидным является снижение надежности за счет этого усложнения, кроме этого в машинах двойного питания достаточно сложно применить многофазные системы.

В последнее время появился перспективный класс вентильных машин комбинированного возбуждения [21]. Это бесконтактные электрические машины, в которых индуктор содержит два источника электрического поля. Это бесконтактная обмотка возбуждения и постоянные магниты. При этом мощные высококоэрцитивные постоянные магниты обеспечивают хорошие массоэнергетические показатели и малые габариты, а обмотка возбуждения позволяет регулировать выходное напряжение генератора по слаботочной цепи возбуждения. Существуют научные проработки использования этих электрических машин в качестве приводов для электро- и гибридного транспорта [28,45], в ветроэнергетических установках [27,47], а также в гидрогенераторах для мини-ГЭС [81]. Следует отметить, что этот класс электрических машин интенсивно развивается, но в теоретическом плане недостаточно проработан. В полной мере не

отработана конструкция, недостаточно изучена система регулирования и стабилизация выходного напряжения, не изучены варианты применения многофазной обмотки. Самым главным препятствием ориентации на этот класс электрических машин является отсутствие их серийного производства.

Вентильные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов являются хорошо отработанным в производстве классом электрических машин, который развивается уже около 70 лет [28]. Они имеют бесконтактный токоподвод. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет минимизировать объем и массу и получить высокие удельные энергетические показатели. Отсутствие потерь на возбуждение делает КПД максимально возможным. Применение специальных конструкторских решений позволяет изготовить его в водопогружном варианте. Современная силовая электроника дает возможность стабилизировать выходные параметры при изменении частоты вращения по якорной цепи, коммутируя большие токи. Конструктивно синхронный генератор с постоянными магнитами состоит из двух основных частей: статора и ротора. Важно отметить, что существует много видов конструкции. Рассмотрим наиболее применимую конструкцию. Это синхронный генератор с радиальной магнитной системой. При этом для рассмотрения примем нормальную конструкцию, когда статор расположен снаружи, а ротор с постоянными магнитами находится внутри (см. рис.1.2.2).

Данный класс электрических машин работает достаточно надежно. Практика их эксплуатации показывает, что повреждение ротора, выход из строя подшипников, размагничивание постоянных магнитов от действия реакции якоря являются маловероятными. Основным источником неисправности является якорная обмотка, которая из-за старения изоляции или превышения допустимого предела по перегреву может выйти из строя.

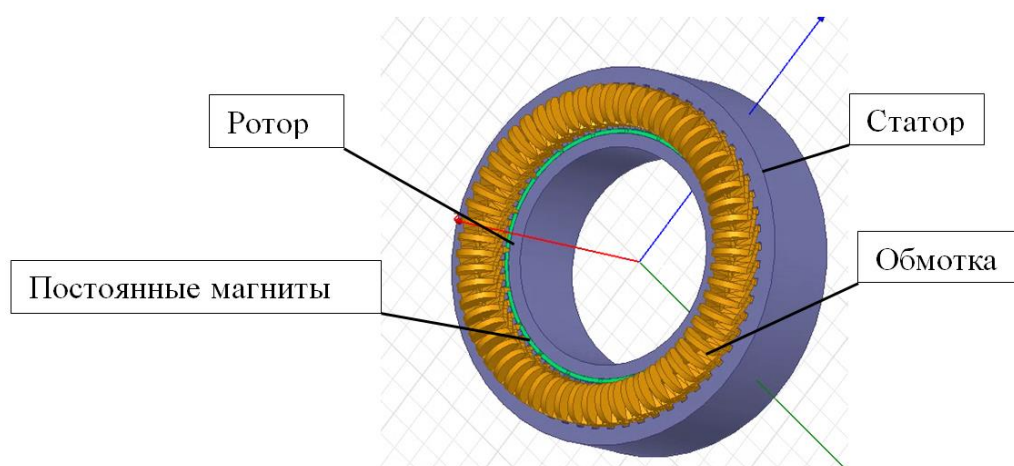


Рис.1.2.2. Статор и ротор синхронного генератора с радиальной магнитной системой нормального исполнения

Короткое замыкание и обрыв обмотки якоря является одной из возможных причин неисправностей синхронного генератора.

Анализ всех вариантов неисправностей на реальном образце представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Современное компьютерное моделирование позволяет создать цифровой близнец реального образца и на нем провести все необходимые исследования. Для исследования надежности работы этого типа генератора воспользуемся этой возможностью и разработаем такой цифровой прототип.

Перечисленные преимущества позволяют выбрать вариант вентильной синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов в качестве базового для разработки мини-ГЭС.

1.3. Схемы преобразования напряжения применительно к мини-ГЭС

Как было указано выше, в предлагаемой структуре автоматизированной мини-ГЭС отсутствует непосредственное регулирование частоты и амплитуды выходного напряжения, поскольку на практике она показала низкую надежность и стала основной причиной отказов и аварий. Эта функция возложена на электронную систему управления. В качестве генератора для мини-ГЭС выбрана

вентильная синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов, которая серийно производится и имеет хорошие показатели надежности. Но данный класс электрогенераторов не может обеспечить стандартную частоту выходного напряжения при изменении частоты вращения ротора, обусловленной изменением водотока и нагрузкой потребителя. Это обусловлено тем, что постоянные магниты системы возбуждения не могут изменить магнитный поток, определенный намагниченностью высококоэрцитивного материала. В синхронной машине частота жестко привязана к частоте вращения ротора, которая меняется от нагрузки на валу турбины. В этих условиях единственным вариантом получения стандартного напряжения является вариант преобразования переменного нестандартного напряжения в постоянное напряжение, постоянного напряжения в стандартное переменное напряжение.

Исходя из функциональных целей мини-ГЭС, ее структурную схему можно изобразить следующим образом (рис.1.3.1)

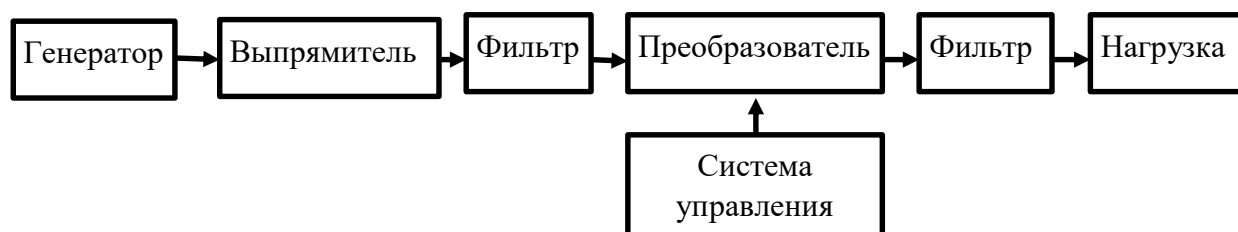


Рис.1.3.1. Структурная схема мини-ГЭС

Сконцентрируем внимание на первой части этой задачи – преобразовании переменного напряжения в постоянное для последующей инверсии применительно к мини-ГЭС.

Следует отметить, что преобразование переменного напряжения в постоянное является достаточно хорошо изученной проблемой. Существует достаточно широкий спектр выпрямительных устройств, которые имеют разное назначение и применяются в различных источниках энергии, как автономных, так и сетевых. В основном они привязаны к наиболее распространенной трехфазной сети. В источнике [50] приведена их подробная классификация (см. рис. 1.3.2).

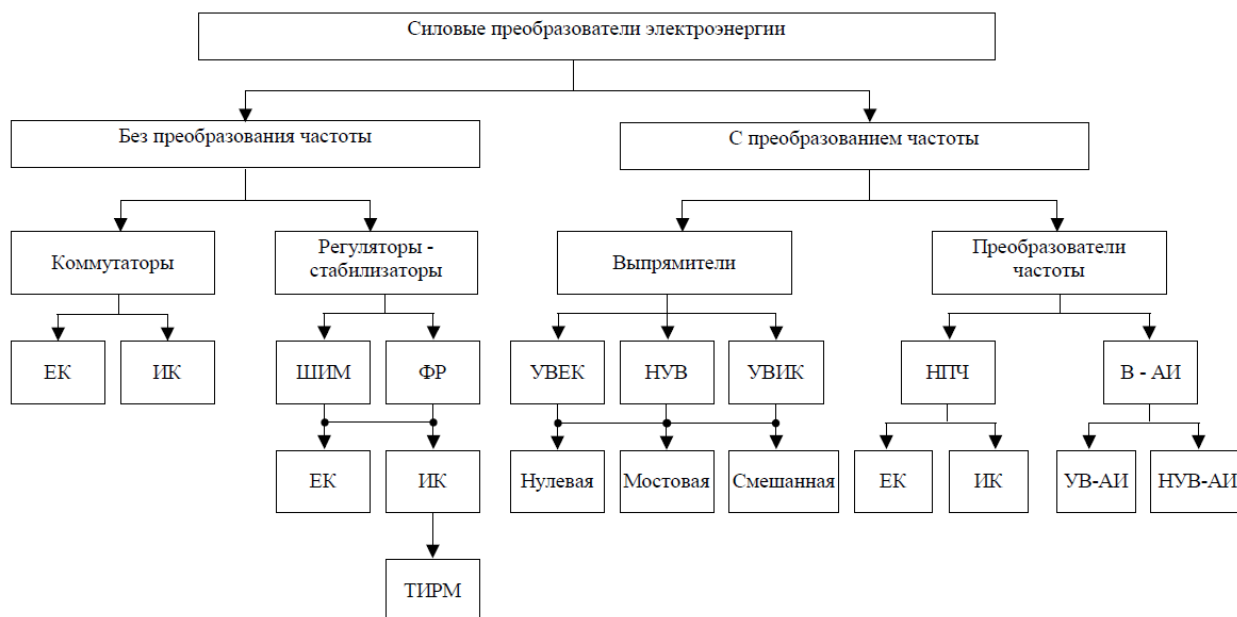


Рис.1.3.2. Классификация силовых преобразователей энергии

Согласно этой классификации, преобразователи делятся на два класса.

К первому классу относятся преобразователи малой мощности, основное назначение которых заключается в генерировании и преобразовании сигналов определенной формы. В основном они предназначены для передачи информации, а не для передачи электроэнергии. Для этих преобразователей основными являются амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики и условия устойчивой работы.

Ко второму классу относятся преобразователи, которые применяются в качестве источников электропитания. Они служат для преобразования электрического напряжения и тока: переменного напряжения в постоянное, постоянного напряжения в переменный, переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты, низкого напряжения в высокое и наоборот. К этому классу следует отнести устройства фильтрации и стабилизации напряжения и тока. В качестве основных характеристик электрических цепей этого класса следует отметить КПД, коэффициент мощности, удельные объемные и массовые характеристики. Устройства этого класса служат энергетическим

характеристикам, поэтому электронику называют энергетической или силовой электроникой, а сами устройства преобразователями электрического тока.

Выпрямительные энергетические устройства можно разделить на активные, которые содержат управляемые ключи, способные регулировать амплитуду выпрямленного напряжения и пассивные, которые построены на диодных схемах и осуществляют только выпрямление переменного напряжения, оставляя функцию регулирования последующим звеньям.

Вполне логичным для мини-ГЭС было бы рассмотрение пассивных выпрямителей согласно функциональной схеме рис.1.3.1, так как преобразование выпрямленного напряжения в стандартное переменное напряжение представляет собой отдельную задачу.

При всем многообразии пассивных выпрямителей, которые по сути представляют собой индустрию преобразовательной техники, их можно разделить на следующие классы: однополупериодные выпрямители (схема Миткевича В.Ф.) и двухполупериодные выпрямители (схема Ларионова А.Н.) [153]. Менее известны полномостовые выпрямители по схеме «параллельные мосты» или «последовательные мосты», которые по многим параметрам превосходят названные выпрямители [153].

Наиболее отработанными являются схемотехнические решения, привязанные к трехфазной сети. Для наглядности эти варианты трехфазных пассивных выпрямителей приведены на рис.1.3.3-1.3.5.

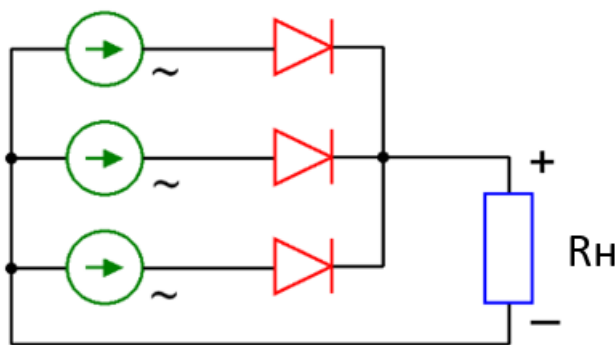


Рис.1.3.3. Схема пассивного однополупериодного трехфазного выпрямителя (три четверть моста параллельно (схема Миткевича))

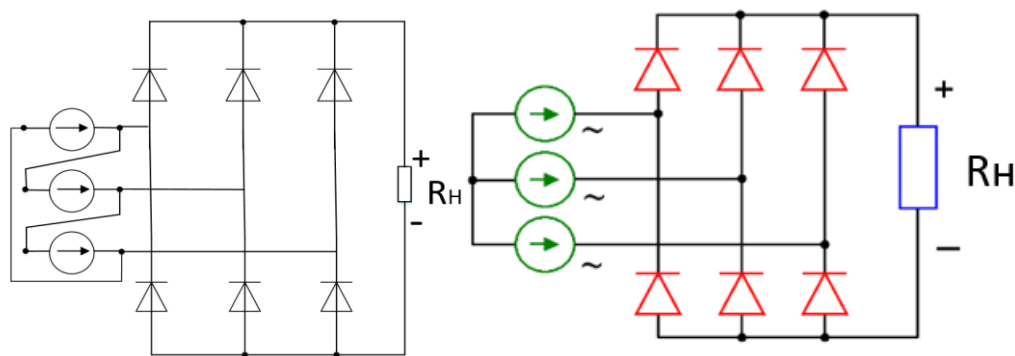


Рис.1.3.4. Схема пассивного двухполупериодного трехфазного выпрямителя (три полумоста параллельно (схема Ларионова для соединения фаз в треугольник и звезду))

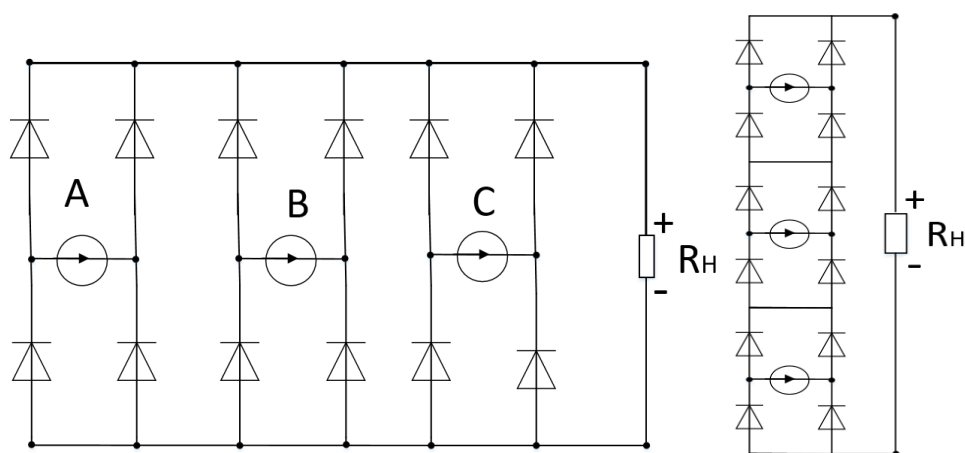


Рис.1.3.5. Схема пассивного трехфазного полномостового выпрямителя (три моста параллельно и три моста последовательно)

При выборе наиболее приемлемой для мини-ГЭС схемы пассивного выпрямителя следует учесть два противоречивых фактора. С одной стороны, это качество выпрямленного напряжения, с другой стороны это надежность и минимальная цена.

Однополупериодные схемы содержат один диод на фазу. Минимальное количество электронных компонентов повышает надежность работы выпрямителя, но при этом следует отметить, что пульсации выпрямленного напряжения при этом максимальны. Кроме того, в данный момент времени работает только одна фаза, что снижает энергетические показатели всей системы.

Двухполупериодные схемы выпрямления содержат два диода на фазу. Это несколько снижает надежность работы выпрямителя, но для двухполупериодных

схем пульсации момента гораздо ниже, что важно для последующего преобразования постоянного напряжения в стандартное переменное.

Полномостовые схемы имеют примерно такое же качество выпрямленного напряжения, что и двухполупериодные схемы, но при этом они содержат 4 ключа на фазу. Это в разы снижает надежность работы выпрямителя и увеличивает его цену. Особенно этот фактор скажется при переходе на многофазные системы. Кроме этого, габаритные размеры выпрямителя будут существенно большими по сравнению с рассмотренными вариантами. Одним из преимуществ этих схем является независимость работы фаз друг от друга. Это может оказаться существенным фактором при обрыве одной из фаз или выхода из строя силового диода. Тем не менее, более низкая надежность, большая цена и увеличенные габариты не позволяют выбрать эти схемы в качестве базовых при построении энергосистемы мини-ГЭС.

Для полного качественного анализа выберем все варианты пассивных выпрямителей для дальнейшего рассмотрения.

1.4. Выбор базовой структуры генератор-выпрямитель для мини-ГЭС.

Постановка задачи исследования

Как было отмечено, основным показателем работы автоматизированной необслуживаемой мини-ГЭС является надежность ее работы. Остальные показатели должны быть подчинены этому критерию.

Повышение надежности можно достичь только при комплексном подходе, когда стремятся повысить надежность всех узлов и агрегатов, входящих в систему. При этом следует отметить, что абсолютно надежных систем в технике не существует. Особенно это касается электромеханических систем, содержащих вращающиеся элементы, электронные компоненты, работающие с кратковременными кратными перегрузками, материалы, подверженные коррозии. Задача разработчиков повысить надежность работы системы, которая определяется законами вероятности и математической статистики, определяемыми износом,

старением изоляции, стойкостью к кратковременным повышениям напряжения и тока и другими факторами.

Как известно, вероятность отказа всей системы определяется произведением вероятности отказа ее составных частей, поэтому производители комплектующих и компонентов стремятся повысить их надежность, чтобы системы, из которых они строятся, имели высокие показатели в отношении отказов. Так производители подшипников постоянно улучшают контактные материалы, свойства смазки, уплотнения. Разработчики силовой электроники идут по пути создания интеллектуальных ключей, которые защищают себя при перегрузках по току и напряжению. Изоляционные материалы постоянно повышают температурный класс изоляции. В настоящее время созданы изоляционные покрытия, которые могут непрерывно работать в течение 15 лет при температуре 220 градусов.

Производители электрических машин и электротехнических комплексов тоже ведут исследования по повышению надежности их систем. Самый простой путь повышения надёжности в электромеханике – это двойное резервирование. Оно подразумевает наличие двух приводов, один из которых находится в работе, а другой в резерве. При отказе первого привода он отключается от системы, а в работу вступает привод из резерва. Такой подход требует удвоения стоимости системы и разработки дополнительной системы управления на случай аварии для отключения одной системы и подключения другой. Для мини-ГЭС такой подход неприемлем, так как изначально была поставлена задача об экономической рентабельности создаваемой сети мини-ГЭС.

Следует отметить, что наиболее слабым звеном в электрической машине с точки зрения отказов является якорная обмотка. Для наиболее распространенных трехфазных систем отказ одной фазы приводит к отказу всей энергосистемы мини-ГЭС. Причиной этого является крайне неудовлетворительные характеристики выходного напряжения при работе на двух и, тем более, на одной фазе. Это касается прежде всего такого показателя, как пульсация выпрямленного напряжения и среднее значение выпрямленного напряжения. Неоднократно предпринимались попытки заложить в статор генератора несколько резервных трехфазных обмоток,

на случай отказа основной, но и эти попытки не привели к удовлетворительному результату по причине недоиспользования якорной меди и усложнения системы управления.

Наиболее очевидным путем решения проблемы является увеличение числа фаз обмотки генератора. Этому благоприятствует тот фактор, что генератор работает на выпрямитель и от него не требуется выдать трехфазное напряжение нужной частоты, а также то обстоятельство, что при увеличении числа фаз существенно снижаются пульсации выпрямленного напряжения и увеличивается его среднее значение. При определенном числе фаз качество выпрямленного напряжения настолько улучшается, что можно отказаться от ненадежных дорогих и громоздких фильтров. Отказ одной из фаз из-за обрыва или выхода из строя диода не приводит всю систему в аварийное состояние, а только несколько снижает качество выпрямленного напряжения, которое может оставаться в пределах нормы.

Анализ состояния вопроса по разработки многофазных систем электропитания в области авиации, космоса, специальной техники [53-63] позволяет сделать вывод, что проведенные исследования касаются изучения нормальных неаварийных режимов работы. Основной недостаток проведенных НИОКР заключается в том, что они рассматривают отдельно многофазный генератор и многофазный преобразователь. **Исследованию комплекса многофазный генератор – многофазный выпрямитель уделено очень мало внимания, а это ограничивает использование уже полученных результатов.** Кроме этого, практически не исследованы вопросы надежности и вероятности отказов такого комплекса. С одной стороны, увеличение числа фаз повышает надежность работы генератора и его энергетические параметры, с другой стороны, увеличение количеств силовых диодов повышает вероятность их отказа в соответствии с законом произведения вероятности. Эти два противоречивых фактора должны привести к оптимальному решению по выбору числа фаз, как для систем электроснабжения вообще, так и для энергетического комплекса мини-ГЭС в частности.

Поставленные вопросы на сегодняшний день не нашли своего решения и требуют исследования в этой области.

Выводы по главе 1

1. Статистический анализ эксплуатации действующих гидроэлектростанций показывает, что энергетический потенциал мощных ГЭС подходит к своему пределу, при этом энергоемкость малых и средних рек, превышающая во много раз потенциал крупных рек практически не использована. Единственным реальным путем его применения, целесообразным с точки зрения экономических затрат, является создание сети малых и средних автоматических необслуживаемых ГЭС.

2. Основным параметром автоматических необслуживаемых мини-ГЭС является высокая надежность при требуемом качестве вырабатываемой электроэнергии. Наиболее реальным направлением решения этой задачи является ориентация на создание комплекса многофазного вентильного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и многофазный двухполупериодного пассивного выпрямитель. Повышение надежности комплекса обусловлено его работоспособностью при отказе одной или нескольких фаз из-за обрыва или выхода из строя диода. При этом качество выходного напряжения многофазных систем намного выше, чем традиционных трехфазных.

3. Существующие исследования многофазных систем позволяют сделать вывод о том, что изучены в основном номинальные неаварийные режимы, при этом генератор и выпрямитель исследовались не в комплексе, а по отдельности друг от друга без взаимного влияния. При этом вопросы вероятности отказов элементов комплекса и оптимизации по этому параметру числа фаз практически не изучены и требуют исследования.

2. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОФАЗНОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОР-ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Вводные замечания

В качестве источника питания многофазные генераторы, работающие автономно на нагрузку, широкого распространения не получили из-за узкоограниченного применения многофазных сетей (рис.2. В.1). Многофазные генераторы представляют интерес при работе совместно с выпрямителем для генерации звена постоянного тока с последующим преобразованием в переменный ток. Но работа генератора на выпрямитель имеет существенные отличия от работы его на многофазную сеть. Это связано с тем, что выпрямительные схемы не позволяют фазам генератора работать одновременно на полную мощность. В зависимости от тактов выпрямления диоды запирают фазы, отключая их от нагрузки. При этом якорная медь подключенных фаз работает только на межкоммутационном интервале. Это снижает энергетические показатели генератора. В связи с этим возникает задача выбора схемы выпрямления и числа фаз по критерию качества выходного напряжения, эффективности использования якорной обмотки и показателям надежности.

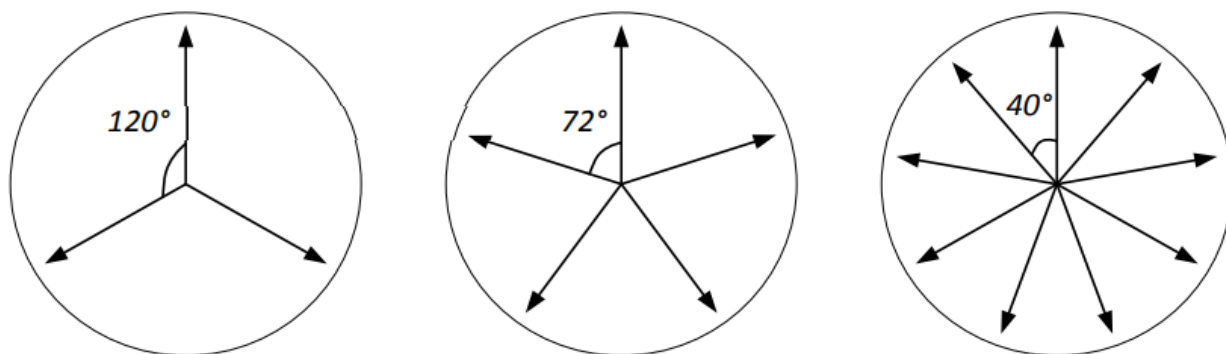


Рис.2.В.1. Вектора фазных ЭДС для трехфазного, пятифазного и девятифазного генератора

Теоретически возможны следующие варианты соединения фаз в системе генератор-выпрямитель:

- соединение фаз в звезду(рис.2.В.2);
- соединение фаз в кольцо (рис.2.В.3) (для трехфазной системы это соединение в треугольник). При соединении фаз в кольцо в схеме отсутствует нейтрал, что не позволяет использовать однополупериодный выпрямитель.
- соединение фаз в мосту независимо друг от друга (рис.2.В.4).

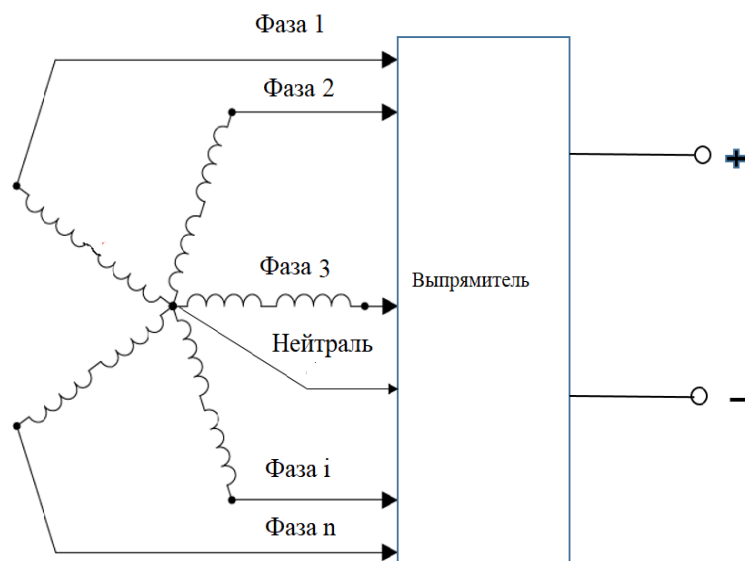


Рис. 2.В.2. Соединение фаз в звезду

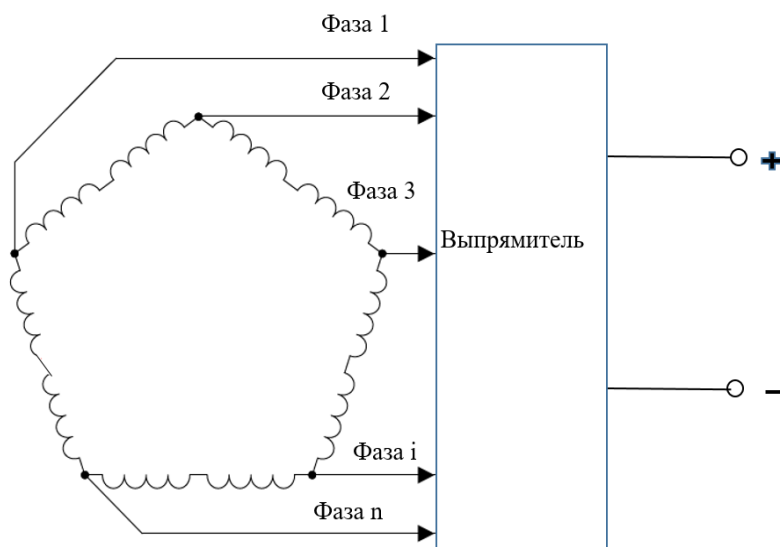


Рис.2.В.3. Соединение фаз в кольцо

Это соединение фаз в звезду и соединение фаз в кольцо (для трехфазной системы это соединение в треугольник).

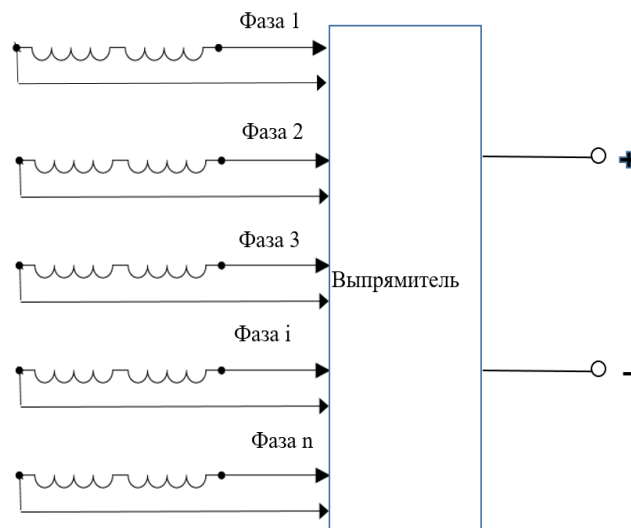


Рис.2. В.4. Соединение фаз независимо друг от друга

Оценим эффективность многофазных генераторов при работе их совместно с различными вариантами выпрямителя. В качестве показателя качества примем среднее значение выпрямленного напряжения и пульсации выпрямленного напряжения.

2.1. Анализ работы многофазного генератора на однополупериодный выпрямитель

Рассмотрим работу m -генератора, работающего на однополупериодный выпрямитель. Единственным вариантом подключения может быть соединение фаз в звезду с выведенной нейтралью. Принципиальная схема представлена на рис.2.1.1.

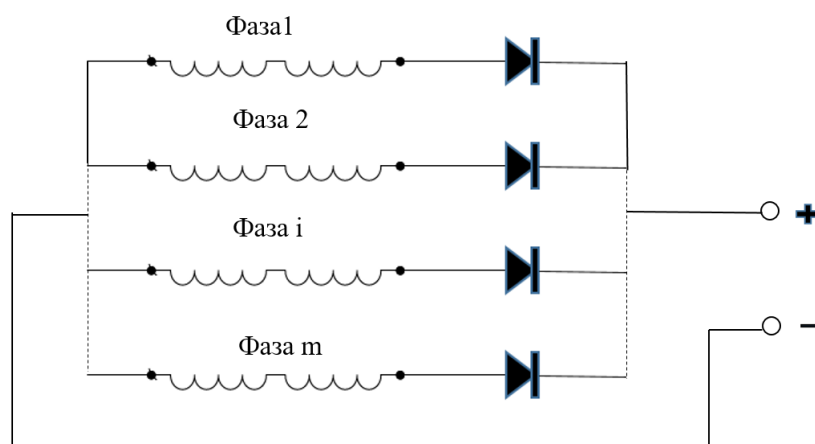


Рис.2.1.1. Принципиальная схема m -фазного генератора и однополупериодного выпрямителя

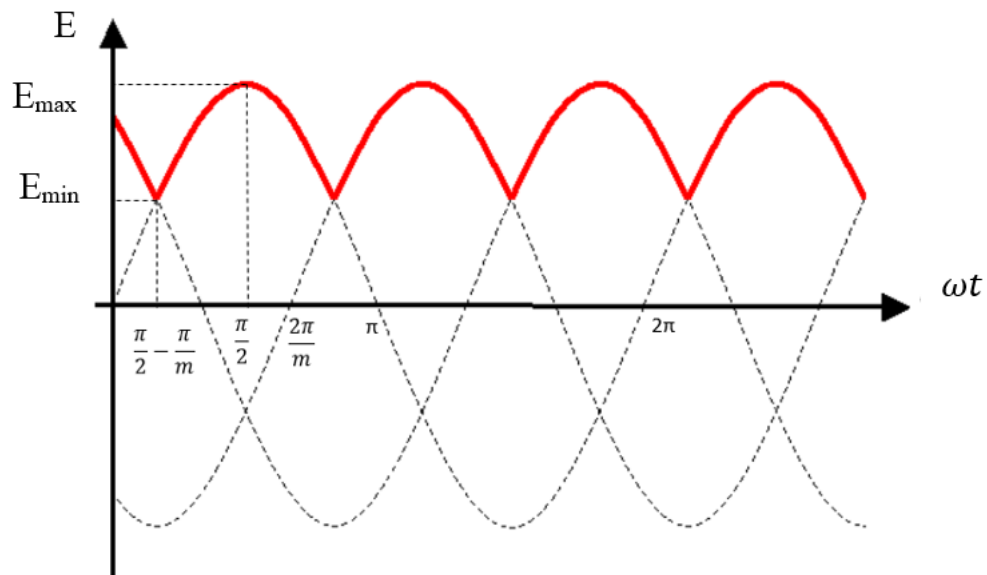


Рис.2.1.2. Зависимость выпрямленного напряжения m -фазного генератора и однополупериодного выпрямителя

На основании анализа зависимостей рис.2.1.2. можно определить следующие характеристики выпрямителя, представленные ниже.

Угол, при котором выпрямитель имеет минимальное напряжение:

$$\alpha_{min} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}, \quad (2.1.1)$$

где m – число фаз.

Угол, при котором выпрямитель имеет максимальное напряжение:

$$\alpha_{max} = \frac{\pi}{2}. \quad (2.1.2)$$

Соответственно, минимальное напряжение определится по формуле:

$$E_{min} = E_m \sin(\alpha_{min}). \quad (2.1.3)$$

Максимальное напряжение будет равно амплитуде фазного напряжения генератора E_m :

$$E_{max} = E_m. \quad (2.1.4)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{ср\text{кв}} = \frac{m \int_{\alpha_{min}}^{\frac{\pi}{2}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi} \quad (2.1.5)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{2}. \quad (2.1.6)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}. \quad (2.1.7)$$

Следует отметить, что для данной схемы выпрямителя в единицу времени работает только одна фаза. Это означает, что коэффициент использования обмотки якоря определится по формуле:

$$K_{\text{исп_якоря}} = \frac{1}{m}. \quad (2.1.8)$$

Приведем значения этих показателей для разного количества фаз в относительных единицах, взяв за базовое значение амплитуду фазной ЭДС генератора. Число фаз будем изменять от 3 до 9. Значения этих показателей представлено в таблице 2.1.1

Таблица 2.1.1. Показатели однополупериодного выпрямителя для различного количества фаз

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{\text{срkv}}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{\text{ср}}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{\text{исп_якоря}}$
3	0.827	0.75	0.333	0.333
4	0.9	0.854	0.172	0.25
5	0.935	0.905	0.106	0.2
6	0.955	0.933	0.072	0.167
7	0.967	0.95	0.052	0.143
8	0.974	0.962	0.04	0.125
9	0.98	0.97	0.31	0.111

Таким образом, для однополупериодной схемы при увеличении числа фаз улучшаются параметры выпрямленного напряжения, но ухудшается

использование меди якорной обмотки, что существенно сказывается на энергетических показателях.

Проведем аналогичный анализ для схемы с двухполупериодным выпрямлением при различном числе фаз.

2.2. Анализ работы многофазного генератора на двухполупериодный выпрямитель

Для двухполупериодного выпрямителя возможны два варианта соединения фаз: в звезду и в кольцо. Исследуем оба варианта для режима холостого хода.

2.2.1. Соединение фаз в звезду

Принципиальная схема данного варианта представлена на рис.2.2.1.

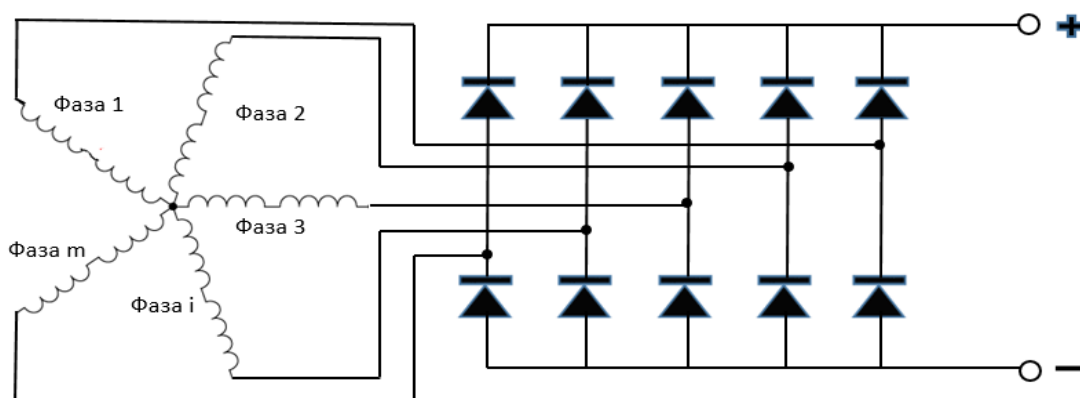


Рис.2.2.1. Принципиальная схема m-фазного генератора и двухполупериодного выпрямителя при соединении фаз в звезду

Особенность работы генератора и двухполупериодного выпрямителя при соединении фаз в звезду заключается в том, что в единицу времени работают только два противоположных диода из выпрямительного моста. Причем, включается только та пара диодов, которые подсоединены к фазам, имеющим в этот момент времени максимальный положительный и отрицательный потенциалы.

Углы между фазами для многофазного генератора представлены на рис.2.2.2.

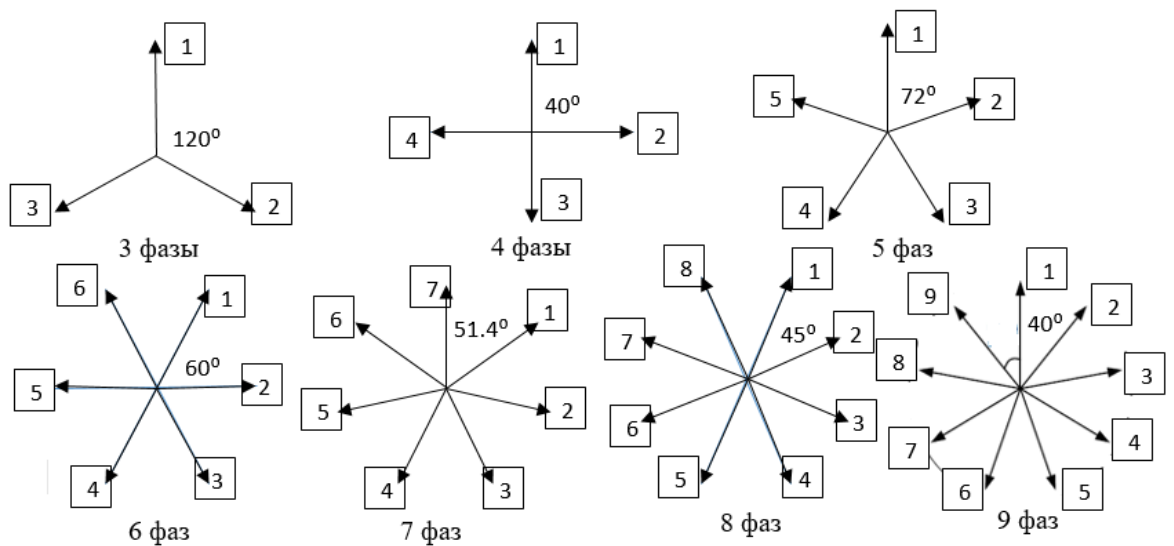


Рис.2.2.2. Углы между фазами для многофазного генератора

Угол между фазами для генератора с произвольным числом фаз определяется выражением:

$$\alpha_{m\text{фаз}} = \frac{360\text{гр}}{m}. \quad (2.2.1)$$

В соответствии с рис.2.2.2 определим на сколько фазных зон сдвинуты фазы, одновременно работающие на выпрямитель. Обозначим количество фазных зон, на которые сдвинуты фазы, одновременно работающие на выпрямитель через параметр i .

3 фазы - $\alpha_{m\text{фаз}}$ ($i=1$);

4 фазы - $2\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=2$);

5 фаз - $2\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=2$);

6 фаз - $3\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=3$);

7 фаз - $3\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=3$);

8 фаз - $4\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=4$);

9 фаз - $4\alpha_{m\text{фаз}}$; ($i=4$);

Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в звезду, для двухполупериодного выпрямления показано на рис.2.2.3.

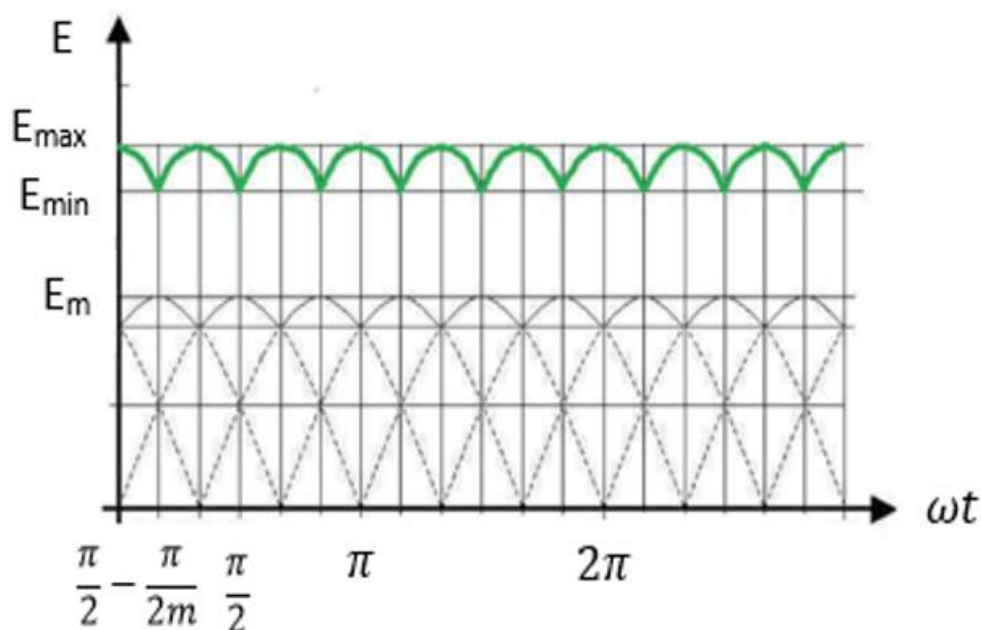


Рис.2.2.3. Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в звезду, для двухполупериодного выпрямления

Максимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{max} = 2E_m \sin\left(\frac{\pi}{m}\right). \quad (2.2.2)$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{min} = E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}\right). \quad (2.2.3)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{cp} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}. \quad (2.2.4)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}. \quad (2.2.5)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{срkv} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi}. \quad (2.2.6)$$

Коэффициент использования обмотки якоря определится по формуле:

$$K_{исп_якоря} = \frac{2}{m}. \quad (2.2.7)$$

Для удобства сравнительного анализа сведем параметры двухполупериодного многофазного выпрямления при соединении фаз в звезду в табл.2.2.1

Таблица 2.2.1. Показатели двухполупериодного выпрямителя для различного количества фаз, соединенных в звезду

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{сркв}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	1.654	1.616	0.072	0.667
4	1.949	1.924	0.04	0.5
5	1.871	1.856	0.025	0.4
6	1.977	1.966	0.017	0.333
7	1.934	1.925	0.013	0.286
8	1.987	1.981	0.0097	0.25
9	1.96	1.955	0.00765	0.222

Сравнительный анализ параметров табл.2.1.1 и табл.2.2.1 показывает, что двухполупериодная коммутация имеет преимущество перед однополупериодной, включая коэффициент использования меди обмотки якоря.

2.2.2. Соединение фаз в кольцо

Принципиальная схема этого варианта представлена на рис.2.2.4.

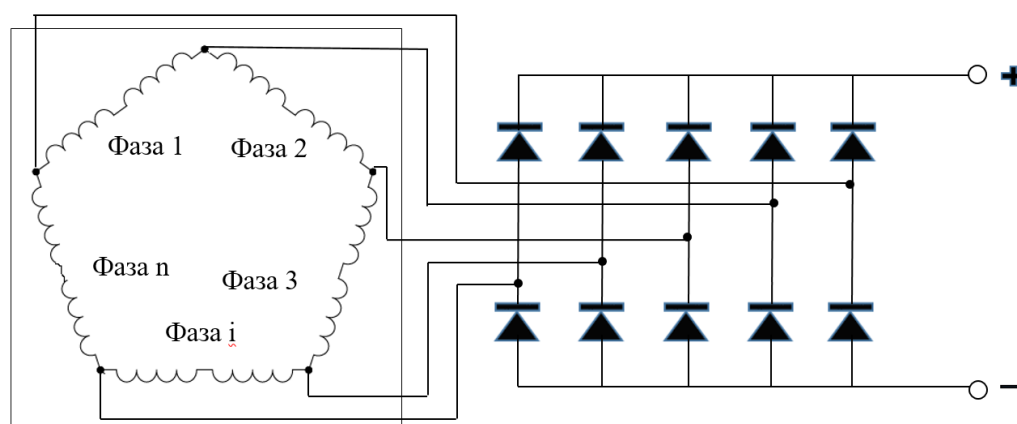


Рис.2.2.4. Принципиальная схема m-фазного генератора и двухполупериодного выпрямителя при соединении фаз в кольцо

Принцип работы двухполупериодного выпрямителя не меняется и в этом варианте. В единицу времени открываются для работы только два диода, которые подключены к точке максимального положительного и максимально отрицательного потенциала.

По внешнему виду выпрямленное напряжение будет повторять выпрямленное напряжение при соединении фаз в звезду (рис.2.2.5), но среднее значение будет определяться количеством фаз в параллельной ветви.

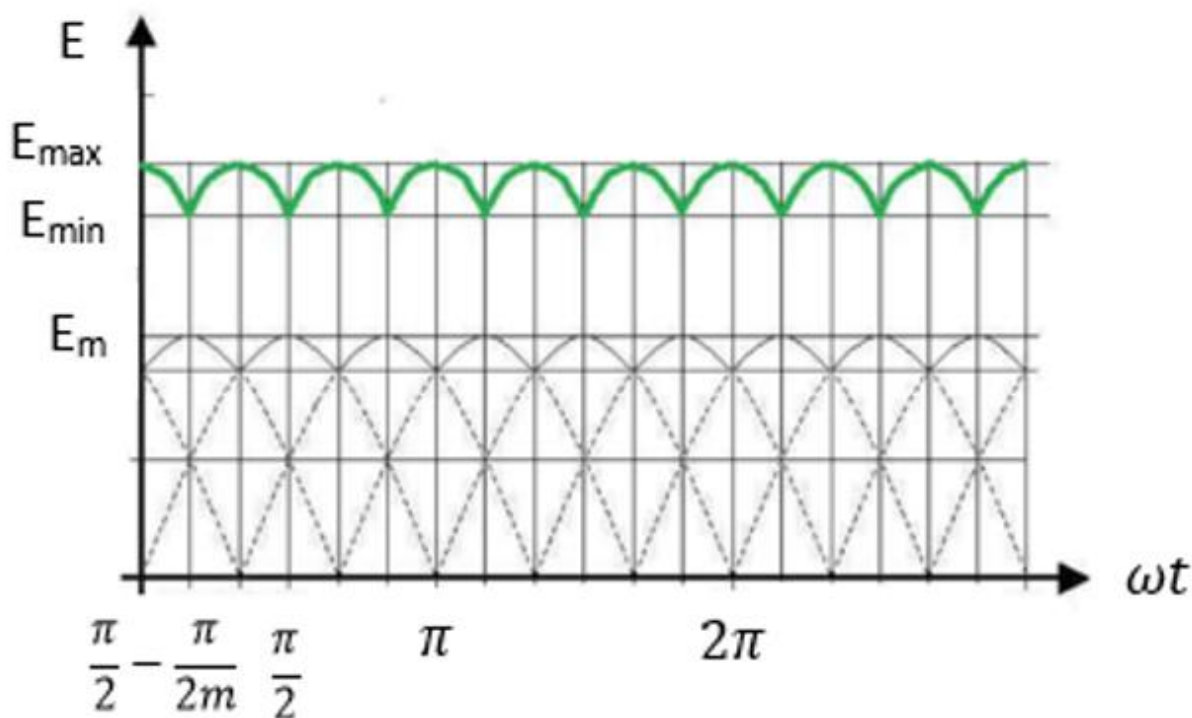


Рис.2.2.5. Зависимость выпрямленного напряжения при произвольном числе фаз, соединенных в звезду, для двухполупериодного выпрямления

Поскольку по всем фазам будет протекать ток, так как они будут находиться либо в одной, либо в другой параллельной ветви, то коэффициент использования меди якоря можно принять $K_{\text{исп_якоря}} = 1$.

Максимальное значение выпрямленного напряжения определим для всех вариантов количества фаз от 3 до 9 исходя из равенства суммы ЭДС фаз параллельной ветви.

Для 3-х фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = E_m. \quad (2.2.8)$$

Для 4-х фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1.414E_m. \quad (2.2.9)$$

Для 5-ти фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) = 1.618E_m. \quad (2.2.10)$$

Для 6-ти фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{2\pi}{6}\right) + E_m = 2.0E_m. \quad (2.2.11)$$

Для 7-ми фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{2\pi}{7}\right) + E_m = 2.247E_m. \quad (2.2.12)$$

Для 8-ми фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) + E_m \cos\left(\frac{\pi}{8} + \frac{2\pi}{8}\right) = 2.613E_m \quad (2.2.13)$$

Для 9-ти фаз

$$E_{max} = 2E_m \cos\left(\frac{\pi}{9}\right) + E_m \cos\left(\frac{\pi}{9} + \frac{2\pi}{9}\right) = 2.879E_m. \quad (2.2.14)$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{min} = E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}\right). \quad (2.2.15)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{cp} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}. \quad (2.2.16)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}. \quad (2.2.17)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{сркв} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi}. \quad (2.2.18)$$

Сведем в таблицу 2.2.2 параметры для этого варианта выпрямления

Таблица 2.2.2. Показатели двухполупериодного выпрямителя для различного количества фаз, соединенных в кольцо

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{ср\text{кв}}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	0.955	0.933	0.072	1.0
4	1.378	1.36	0.04	1.0
5	1.592	1.578	0.025	1.0
6	1.977	1.966	0.017	1.0
7	2.228	2.219	0.013	1.0
8	2.596	2.588	0.0097	1.0
9	2.865	2.721	0.00765	1.0

Сравнительный анализ параметров табл.2.2.1 и табл.2.2.2 показывает, что с 3-х до 5-ти фаз по выпрямленной ЭДС соединения фаз в кольцо уступает соединению фаз в звезду, при 6-ти фазах параметры одинаковые, а при 7-ми, 8-ми и 9-ти фазах выпрямленное напряжение больше. При этом следует отметить лучшее значение коэффициента использования меди якоря. По совокупности показателей соединение в кольцо более предпочтительно.

2.3. Анализ работы многофазного генератора на полную мостовую схему выпрямления

2.3.1. Параллельное соединение мостов

Принципиальная схема этого варианта представлена на рис.2.3.1

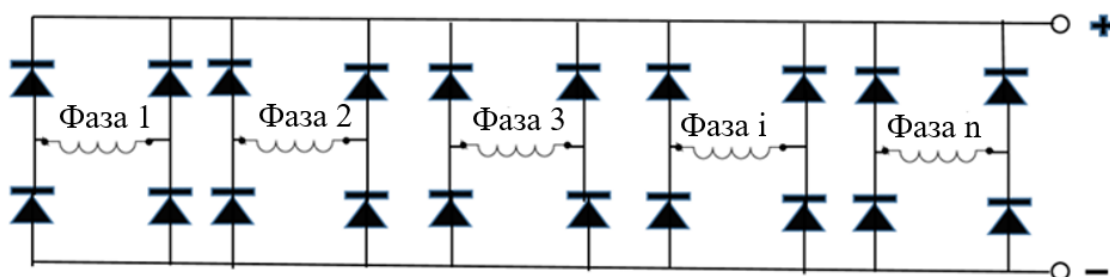


Рис. 2.3.1. Принципиальная схема многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при параллельном соединении мостов

В режиме холостого хода ЭДС в мосту с наибольшей на данном отрезке большого периода ЭДС закрывает диоды в мостах с меньшими на данном отрезке большого периода ЭДС. При этом работает только один мост. При увеличении нагрузки появляются и увеличиваются отрезки периода на которых большее количество мостов работают на нагрузку параллельно. Рассмотрим пессимистическую картину, когда работает только один мост. Зависимость выпрямленного напряжения при этом представлено на рис.2.3.2

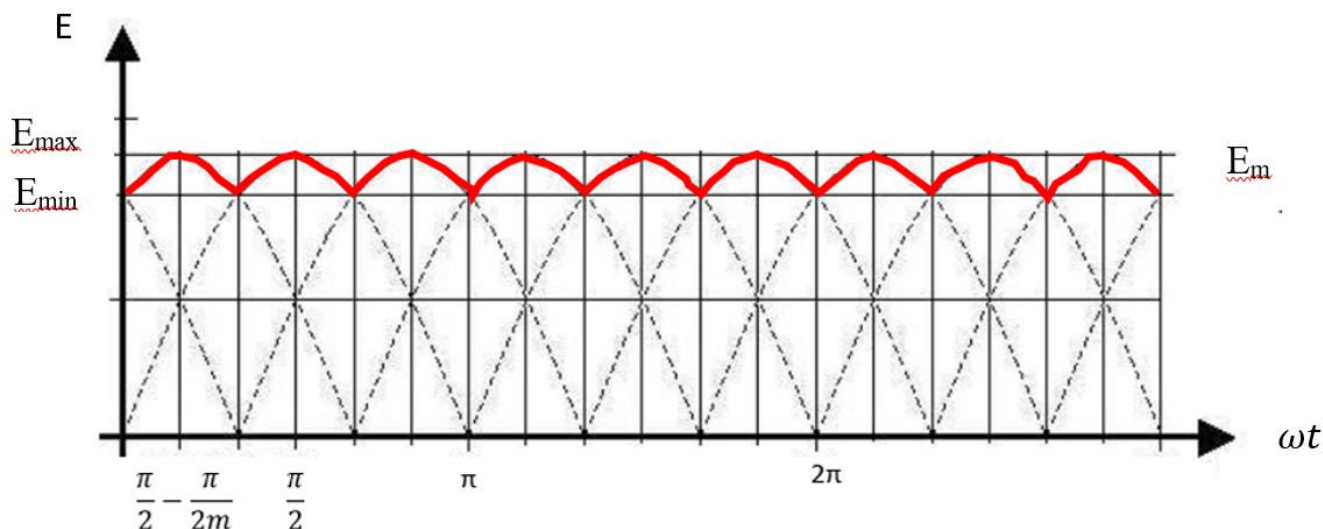


Рис.2.3.2. Зависимость выпрямленного напряжения для многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при параллельном соединении мостов

Максимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{max} = E_m. \quad (2.3.1)$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{min} = E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}\right). \quad (2.3.2)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{cp} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}. \quad (2.3.3)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}. \quad (2.3.4)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{\text{сркв}} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi}. \quad (2.3.5)$$

Коэффициент использования обмотки якоря определится по формуле:

$$K_{\text{исп_якоря}} = \frac{1}{m}. \quad (2.3.6)$$

Для удобства сравнительного анализа сведем параметры двухполупериодного многофазного выпрямления при соединении фаз в звезду в табл.2.3.1.

Таблица 2.3.1. Показатели полного мостового выпрямителя для различного количества фаз при параллельном соединении мостов.

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{\text{сркв}}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{\text{ср}}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{\text{исп_якоря}}$
3	0.955	0.933	0.072	0.333
4	0.974	0.962	0.04	0.25
5	0.984	0.976	0.025	0.2
6	0.989	0.983	0.017	0.167
7	0.992	0.987	0.013	0.143
8	0.994	0.99	0.0097	0.125
9	0.995	0.992	0.00765	0.111

Из таблицы видно, что данная схема имеет хорошие показатели по пульсациям, но небольшое значение выпрямленного напряжения низкий коэффициент использования обмотки якоря.

2.3.2. Последовательное соединение мостов

Принципиальная схема этого подсоединения фаз к выпрямителю представлена на рис.2.3.4. На рис.2.3.3. представлена зависимость выпрямленного напряжения.

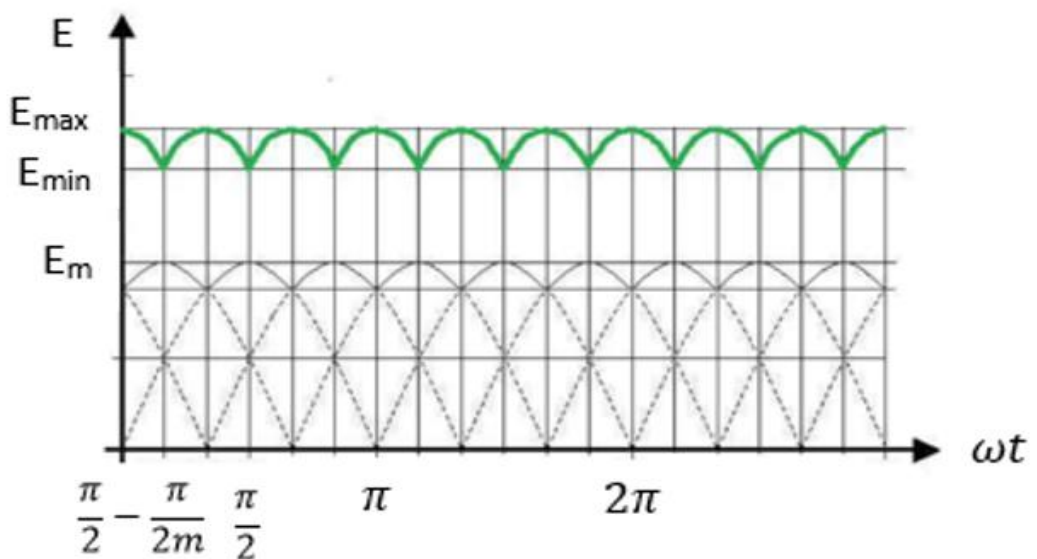


Рис.2.3.3. Зависимость выпрямленного напряжения для многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при последовательном соединении мостов

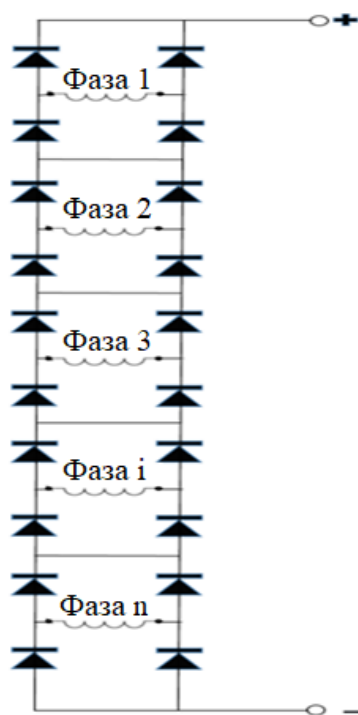


Рис. 2.3.4. Принципиальная схема многофазного генератора с полной мостовой схемой выпрямления при последовательном соединении мостов

Поскольку по всем фазам будет протекать ток, то коэффициент использования меди якоря можно принять $K_{\text{исп_якоря}} = 1$.

Максимальное значение выпрямленного напряжения определим для всех вариантов количества фаз от 3 до 9

Для 3-х фаз

$$E_{max} = E_m + 2E_m \cos(60^0) = 2E_m. \quad (2.3.7)$$

Для 4-х фаз

$$E_{max} = 2E_m + 2E_m \cos(90^0) = 2E_m. \quad (2.3.8)$$

Для 5-ти фаз

$$E_{max} = E_m + 2E_m \cos(54^0) + 2E_m \cos(72^0) = 2.794 E_m. \quad (2.3.9)$$

Для 6-ти фаз

$$E_{max} = 2E_m + 4E_m \cos(60^0) = 4.0E_m. \quad (2.3.10)$$

Для 7-ми фаз

$$E_{max} = E_m + 2E_m \cos(25.8^0) + 2E_m \cos(51.4^0) + 2E_m \cos(77.2^0) = 4.49E_m. \quad (2.3.11)$$

Для 8-ми фаз

$$E_{max} = 2E_m + 4E_m \cos(45^0) = 4.82E_m. \quad (2.3.12)$$

Для 9-ти фаз

$$E_{max} = E_m + 2E_m \cos(20^0) + 2E_m \cos(40^0) + 2E_m \cos(60^0) + 2E_m \cos(80^0) = 5.759E_m. \quad (2.3.13)$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{min} = E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2m}\right). \quad (2.3.14)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{cp} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}. \quad (2.3.15)$$

Пульсации выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}. \quad (2.3.16)$$

Среднеквадратичное значение выпрямленного напряжения определим по формуле:

$$E_{срkv} = \frac{m \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m}} E_m \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi}. \quad (2.3.17)$$

Сведем в таблицу 5 параметры для этого варианта выпрямления

Таблица 2.3.2. Показатели полного мостового выпрямителя для различного количества фаз при последовательном соединении мостов.

Число фаз	Среднеквадратичное выпрямленное напряжение $E_{сркв}$	Среднее выпрямленное напряжение $E_{ср}$	Пульсации выпрямленного напряжения ΔE	Коэффициент использования обмотки $K_{исп_якоря}$
3	1.91	1.886	0.072	1.0
4	1.949	1.924	0.04	1.0
5	2.748	2.724	0.025	1.0
6	3.954	3.932	0.017	1.0
7	4.454	4.435	0.013	1.0
8	4.747	7.782	0.0097	1.0
9	5.73	5.71	0.00765	1.0

Из табл.2.3.2 видно, что этот выпрямитель имеет наибольшую среднюю ЭДС, низкий уровень пульсаций и хороший коэффициент использования якорной обмотки.

2.4. Сравнительный анализ схем выпрямления

На основании проведенного анализа мы получили основные характеристики (среднеквадратичное выпрямленное напряжение, среднее выпрямленное напряжение, пульсации выпрямленного напряжения) вариантов работы однополупериодного выпрямителя, двухполупериодного выпрямителя, мостового выпрямителя при соединении их с многофазным генератором. Проведем сравнительный анализ этих комплексов по названным показателям.

Следует отметить, что однополупериодное выпрямление имеет низкий коэффициент использования якорной обмотки, так как в единицу времени при этой схеме работает только одна фаза. Соответственно с увеличением числа фаз этот показатель снижается. Данный вариант уступает рассмотренным схемам по среднеквадратичному выпрямленному напряжению и по среднему выпрямленному напряжению. Кроме этого, данная схема имеет наибольшее значение пульсаций выпрямленного напряжения по сравнению с другими рассмотренными схемами. Для

реализации данной схемы необходимо наличие доступной нейтрали при соединении фаз, что тоже вызывает некоторые технологические сложности. Из положительных факторов следует отметить минимальное количество диодов для данной схемы, что упрощает монтаж и благоприятно сказывается на снижении стоимости комплекса. По совокупности показателей данный вариант является наименее предпочтительным для применения к автоматизированной мини-ГЭС, тем не менее он будет рассмотрен далее при анализе надежности в случае аварийных отказов.

Двухполупериодные схемы выпрямления имеют лучшие энергетические показатели по сравнению с однополупериодной схемой. Это объясняется тем, что в единицу времени в преобразовании энергии задействовано большее количество фаз. При этом при соединении в звезду работают две фазы. Это повышает выпрямленное напряжение и коэффициент использования якорной обмотки. Для этой схемы выпрямления наиболее выгодно соединить фазы в кольцо. При этом все фазы вступают в работу и коэффициент использования обмотки якоря становится равным 1.0. Выпрямленное напряжение определяется количеством фаз в параллельной ветви между включенными в данный момент диодами. При увеличении количества фаз среднеквадратичное выпрямленное напряжение и среднее выпрямленное напряжение растут. С точки зрения этого показателя количество фаз следует увеличивать. Для двухполупериодной схемы выпрямления пульсации выпрямленного напряжения снижаются по сравнению с однополупериодной схемой. Для схем соединения в звезду и кольцо они одинаковы. Негативным фактором для этого варианта является увеличение числа силовых диодов в 2 раза. Это увеличивает стоимость и повышает вероятность отказов при эксплуатации. Тем не менее по совокупности показателей двухполупериодный многофазный выпрямитель с генератором может быть применен для автоматической мини-ГЭС, и он будет рассмотрен в дальнейшем с точки зрения устойчивости к отказам.

Рассмотрение полной мостовой выпрямительной схемы дало следующие результаты. Отметим, что данный вариант имеет в 4 раза больше диодов по сравнению с однополупериодной схемой и в 2 раза больше по сравнению с двухполупериодной схемой. Количество токоподводов от генератора к

выпрямителю тоже увеличивается в 2 раза. Это повышает вероятность отказов, усложняет электромонтаж, увеличивает стоимость.

Вариант параллельного соединения мостов показал низкую эффективность по анализируемым показателям. Это связано с тем, что в данный момент времени работает только один мост и, соответственно, одна фаза. Эта схема лучше по сравнению с однополупериодной по показателям выпрямленного напряжения и пульсациям, но не существенно. Коэффициент использования якорной обмотки низкий. Он уменьшается с увеличением числа фаз.

Вариант последовательного соединения мостов показал самые высокие показатели по сравнению со всеми рассмотренными выше схемами. Он имеет наибольшие среднеквадратичное и среднее выпрямленные напряжения. Это обусловлено тем, что в данной схеме на выпрямленное напряжение работают все фазы. Коэффициент использования якорной обмотки для этого варианта равен 1.0.

Как было отмечено выше, этот вариант существенно усложняет технологию изготовления. Тем не менее его следует рассмотреть по следующим причинам. В настоящее время развивается технология силовых гибридных сборок электронных компонентов. В одном объеме собираются бескорпусные силовые диоды и система управления. Это позволяет в перспективе встраивать силовой электронный выпрямитель в корпус гидрогенератора, в том числе и многофазного, исключая при этом сложный токоподвод. При этом при однопроводной схеме к генератору подходит только положительная шина. Будем ориентироваться на эту перспективную технологию и рассмотрим в дальнейшем вариант многофазного генератора с полномостовой схемой выпрямления.

Полученные таблицы с основными показателями для разных выпрямителей и числа фаз удобно применять в инженерной практике для выбора и оценки варианта мини-ГЭС, при этом следует иметь в виду, что для корректного сравнения необходимо взять два или несколько абсолютно одинаковых генераторов по мощности, частоте вращения, напряжению, габаритам, количеству полюсов, количеству проводников во всех обмотках. Добиться полной аналогии достаточно сложно, хотя бы по той причине, что генераторы с разным числом фаз будут иметь

разные обмоточные коэффициенты. Тем не менее такую оценку с учетом этих отличий сделать можно. Данные исследования на цифровой модели представлены в следующей главе.

Выводы по главе 2

1. Проведен анализ работы однополупериодного выпрямителя с многофазным генератором. По показателям выпрямленного среднеквадратичного напряжения, выпрямленного среднего напряжения и пульсациям выпрямленного напряжения этот вариант уступает двухполупериодной и полной мостовой схеме выпрямления.

2. Анализ работы двухполупериодного выпрямителя с многофазным генератором показал, что для данного варианта более предпочтительно соединение фаз в кольцо. При этом повышается среднеквадратичное выпрямленное напряжение и среднее выпрямленное напряжение. По уровню пульсаций выпрямленного напряжения варианты соединения в кольцо и звезду идентичны.

3. Применение полной мостовой схемы выпрямления при соединении мостов последовательно дает наилучшие энергетические показатели (среднеквадратичное выпрямленное напряжение и среднее выпрямленное напряжение) при наименьших пульсациях выпрямленного напряжения, но при этом вариант технологически сложен, имеет более высокую вероятность отказов силовой электроники и наивысшую себестоимость. Это следует рассматривать как перспективу для гибридных силовых сборок.

4. Полученные таблицы основных показателей для разных вариантов выпрямления и изменении фаз от 3-х до 5-ти можно использовать в инженерной практике для оценки и выбора вариантов выпрямления.

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА И ВЫПРЯМИТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ФАЗ ДЛЯ АНАЛИЗА НОМИНАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Вводные замечания

Как было отмечено, выпрямитель оказывает существенное влияние на работу генератора. В зависимости от схемы выпрямителя и его подсоединения к генератору он может блокировать работу фаз, запирая силовые диоды в зависимости от разности потенциалов на аноде и катоде. В связи с этим различные схемы выпрямления имеют различную эффективность с точки зрения энергетических показателей мини-ГЭС. В предыдущей главе было показано, что разные схемы выпрямителя имеют разные коэффициенты использования якорной обмотки. Для некоторых схем, при которых работают только одна или две фазы, увеличение количества фаз нецелесообразно, поскольку количество меди, участвующее в преобразовании энергии, уменьшается.

С другой стороны, увеличение количества фаз необходимо для повышения надежности автоматизированной мини-ГЭС. Возникающее техническое противоречие необходимо решить через определение оптимального количества фаз. Для этого надо сравнить эффективность различных схем выпрямления как для номинального режима, так и для аварийных режимов, вызванных отказами генератора и выпрямителя.

Проведем такое сравнение на цифровой модели. Практика показала, что наиболее точным методом для построения модели является метод конечных элементов (МКЭ). Покажем кратко его основу для расчета электромагнитного состояния электрической машины.

3.1. Теоретические основы моделирования электромеханических преобразователей на основе метода конечных элементов

Основу цифрового моделирования электрических машин составляет расчет электромагнитного поля. Применительно к анализу электромагнитного поля математический аппарат МКЭ основывается на понятии векторного магнитного потенциала $\bar{A}$, представляющего собой математическую величину, которая связана с физической характеристикой магнитной индукцией $\bar{B}$ следующим соотношением

$$\bar{B} = \text{rot} \bar{A} = \nabla \times \bar{A}. \quad (3.1.1)$$

где ∇ - математическая процедура, называемая лапласианом.

Раскрывая компоненты вектора магнитной индукции по осям декартовой системы координат, получим

$$\begin{aligned} B_x &= (\nabla \times A)_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}; \\ B_y &= (\nabla \times A)_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}; \\ B_z &= (\nabla \times A)_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}. \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

Магнитная индукция связана со второй основной физической характеристикой магнитного поля напряженностью $\bar{H}$ известным уравнением Максвелла:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{J}, \quad (3.1.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

$\bar{J}$ – вектор намагниченности среды в исследуемой точке.

Для изотропной среды формула преобразуется к виду:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \mu}, \quad (3.1.4)$$

где μ - скалярная величина, названная относительной проницаемостью среды.

Таким образом, расчет магнитного поля сводится к определению величины векторного магнитного потенциала в каждой точке исследуемой области. Далее, все остальные параметры поля рассчитываются по известным соотношениям.

Сам метод конечных элементов основывается на кусочно-линейной аппроксимации векторного магнитного потенциала дискретной моделью. Сама модель строится на множестве кусочно-непрерывных функций, которые определены на конечном числе областей, называемых конечными элементами.

Покажем теоретическую основу реализации МКЭ на плоскопараллельной задаче, к которой мы сведем нашу модель, поскольку она имеет плоскую симметрию. Используем декартову систему координат. Для каждого элемента векторный магнитный потенциал представим в виде полинома первой степени (рис.3.1.1).

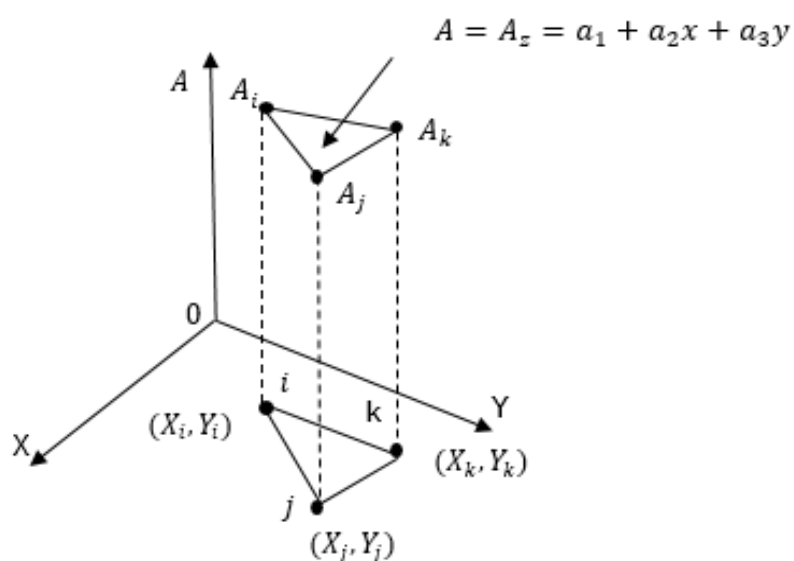


Рисунок. 3.1.1. Представление векторного магнитного потенциала для одного элемента

Для нумерации узлов в элементе с индексами i, j, k примем направление против часовой стрелки. Соответственно, узловые значения потенциала обозначим как A_i, A_j, A_k , а координаты узлов этих потенциалов как $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j), (X_k, Y_k)$. Если мы подставим эти значения в интерполяционный полином, то получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
A_i &= \alpha_1 + \alpha_2 X_i + \alpha_3 Y_i \\
A_j &= \alpha_1 + \alpha_2 X_j + \alpha_3 Y_j , \\
A_k &= \alpha_1 + \alpha_2 X_k + \alpha_3 Y_k
\end{aligned}
\tag{3.1.5}$$

Решая эту систему относительно коэффициентов, получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_j Y_k - X_k Y_j) A_i + (X_k Y_i - X_i Y_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right] \\
\alpha_2 &= \frac{1}{2S_a} \left[(Y_j - Y_k) A_i + (Y_k - Y_i) A_j + (Y_i - Y_j) A_k \right] , \\
\alpha_3 &= \frac{1}{2S_a} \left[(X_k - X_j) A_i + (X_i - X_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k \right]
\end{aligned}
\tag{3.1.6}$$

Для определения площади выбранного элемента S_a можно воспользоваться следующим матричным выражением:

$$S_a = 0.5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix} ,
\tag{3.1.7}$$

Введем понятие функции формы для каждого узла и запишем через него значение векторного магнитного потенциала:

$$A = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k ,
\tag{3.1.8}$$

Функции формы будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
N_i &= \frac{1}{2S_a} (a_i + b_i x + c_i y) \\
a_i &= X_j Y_k - X_k Y_j, \quad b_i = Y_j - Y_k, \quad c_i = X_k - X_j ,
\end{aligned}
\tag{3.1.9}$$

$$\begin{aligned}
N_j &= \frac{1}{2S_a} (a_j + b_j x + c_j y) \\
a_j &= X_k Y_i - X_i Y_k, \quad b_j = Y_k - Y_i, \quad c_j = X_i - X_k ,
\end{aligned}
\tag{3.1.10}$$

$$N_k = \frac{1}{2S_a} (a_k + b_k x + c_k y) \quad (3.1.11)$$

$$a_k = X_i Y_j - X_j Y_i, \quad b_k = Y_i - Y_j, \quad c_k = X_j - X_i,$$

Для МКЭ прямое решение краевой полевой задачи заменяется эквивалентной вариационной задачей по минимизации энергетического функционала:

$$F = \int_s \left(\int_{\mu}^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) ds - \int_s A J dS, \quad (3.1.12)$$

где $B_x = \frac{\partial A}{\partial y}$, $B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$ составляющие вектора магнитной индукции поля, распределенного в области S по осям X и Y .

Для нахождения минимума функционала возьмем частные производные по значению векторного магнитного потенциала в узлах A_i, A_j, A_k и приравняем их к нулю. При этом получим следующую систему алгебраических уравнений для выбранного элемента α :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_i} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i^2 + b_i^2) A_i + (c_i c_j + b_i b_j) A_j + (c_i c_k + b_i b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0 \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_j} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_j + b_i b_j) A_i + (c_j^2 + b_j^2) A_j + (c_j c_k + b_j b_k) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0, \\ \frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_k} &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_k + b_i b_k) A_i + (c_i c_k + b_i b_k) A_j + (c_k^2 + b_k^2) A_k \right] - j \frac{S_\alpha}{2} = 0 \end{aligned} \quad (3.1.13)$$

Эта система уравнений образует локальную матрицу для каждого элемента. Из локальных матриц путем их сложения можно сформировать глобальную матрицу для исследуемой области. Решая эту систему алгебраических уравнений, мы получим значение магнитного потенциала в вершинах всех треугольников и таким образом решим полевую задачу.

Далее можно определить все необходимые параметры и характеристики, включая динамические (индуктивности, активные сопротивления, ЭДС, токи, потоки, потери, моменты).

Задача построения цифровой модели с применением МКЭ во многом облегчается тем, что достаточно сложный математический аппарат, а также

трудоемкая процедура разбиения на конечные элементы, формализованы хорошо проверенными на практике САЕсистемами, такими как Ansys, Comsol, Elcut и другими[41-43].

3.2. Построение цифровой модели комплекса генератор-выпрямитель для различного количества фаз и различных схем выпрямления с применением МКЭ

Для построения цифровой модели комплекса воспользуемся программной средой Ansys Electronics Desktop. Выбор данного программного средства обусловлен, прежде всего, наличием в университете официальной лицензии, приобретенной для суперкомпьютера.

Для корректного сравнения различных вариантов по показателям эффективности необходимо, чтобы генератор имел одни и те же удельные энергетические показатели при изменении количества фаз и схем выпрямителя. В качестве таких неизменных показателей были выбраны:

- номинальная мощность 10 кВт;
- частота вращения 3000 об/мин
- габаритные размеры активных частей (наружный диаметр 300 мм, диаметр расточки 200 мм длина пакета 240 мм)
- число полюсов 2;
- воздушный зазор 1.0 мм,
- ротор с постоянными магнитами для всех вариантов один и тот же.
- общее число проводников, распределенных по фазам 2520. Обмотка принималась двухслойной, чтобы была возможность в одних пазах размещать разные фазы.
- активные материалы (медь, сталь для статора, сталь для ротора) выбирались одними и теми же для всех вариантов.

Число пазов выбиралось из соображений размещения многофазной диаметральной двухслойной обмотки с целым число пазов на полюс и фазу. При этом общее количество проводников в пазах оставалось неизменным. При

необходимости они добавлялись в терминалы фаз. Число пазов для разных фаз соответственно:

- для 3-х фазной обмотки: $Z=60$, $q=10$;
- для 4-х фазной обмотки: $Z=60$, $q=15$;
- для 5-ти фазной обмотки: $Z=60$, $q=6$;
- для 6-ти фазной обмотки: $Z=60$, $q=5$;
- для 7-ми фазной обмотки: $Z=84$, $q=6$;
- для 8-ми фазной обмотки: $Z=48$, $q=3$;
- для 9-ти фазной обмотки: $Z=54$, $q=3$.

Для идентичности сравнения тестирование всех вариантов будем проводить на холостом ходу работы генератора.

Решение поставленной задачи проведем в следующей последовательности:

- построение геометрической модели синхронного генератора;
- разделение проводников по фазам;
- разбиение области решения на конечные элементы;
- задание параметров материалов и постоянного магнита;
- задание граничных условий;
- решение полевой задачи.

После построения генератора его конфигурация не меняется для разного сочетания фаз, меняются только схемы выпрямителей.

Расчетная модель синхронного генератора, построенная в двумерной плоскости представлена на рис. 3.2.1

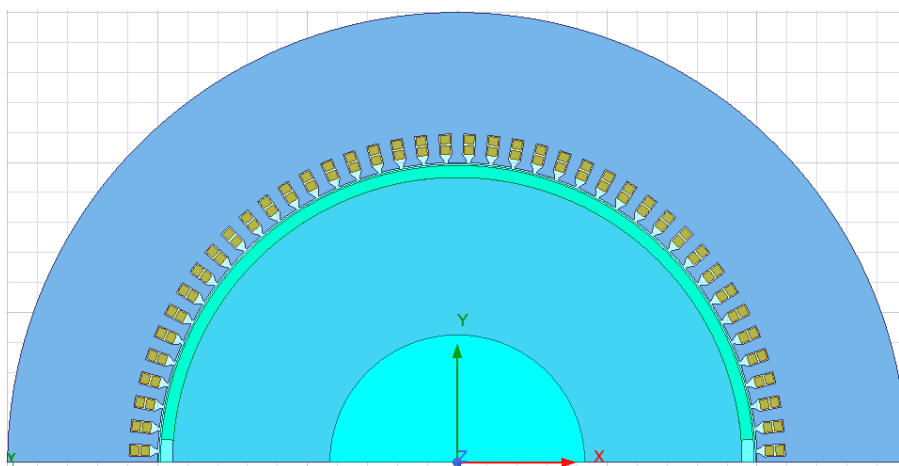


Рис.3.2.1 Расчётная модель синхронного генератора

Осевая симметрия электрической машины позволила упростить модель и рассматривать только половину генератора, что существенно упростило анализ. На рис.3.2.2 показано распределение магнитного поля в плоской симметрии генератора.

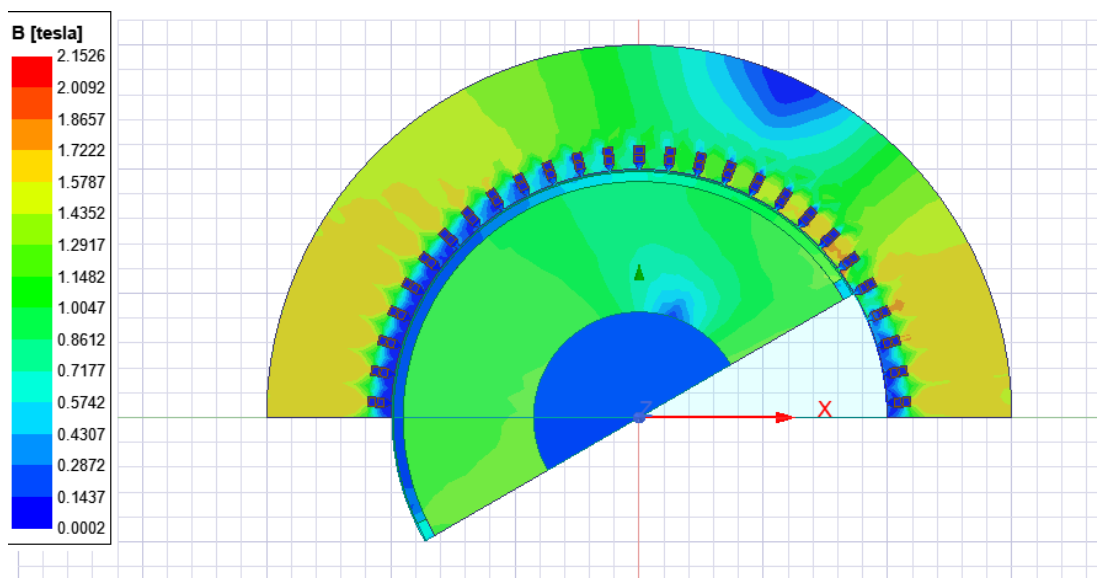


Рис.3.2.2 Распределение магнитного поля

Правильность формирования и подключения фаз контролировалась по фазным ЭДС.

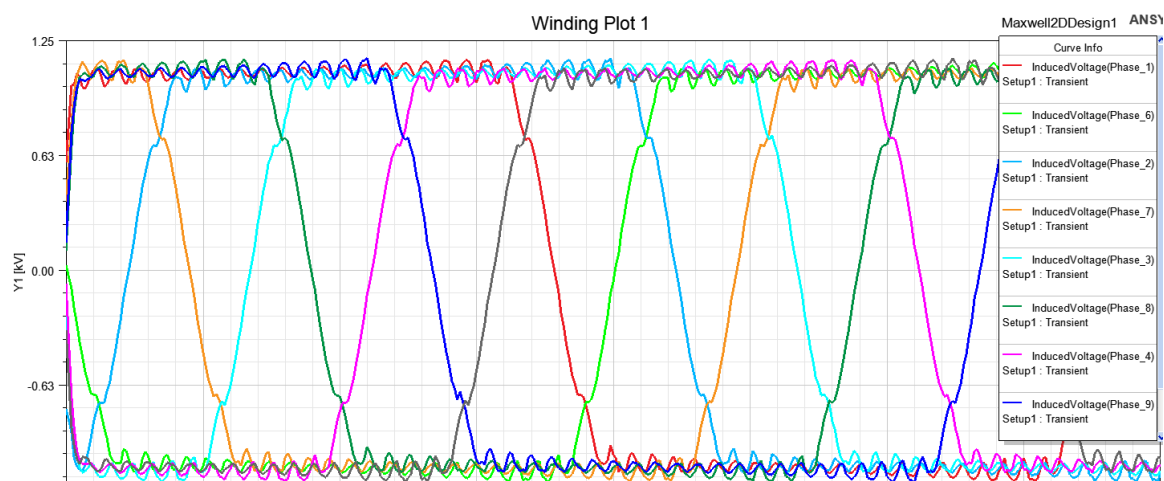


Рис.3.2.3. Формирование фазных ЭДС для генератора с 9-ю фазами

Эти кривые возьмем как эталонные для индикации отклонений при коротких замыканиях

Для моделирования принципиальных схем выпрямителя воспользуемся имитатором электронных компонентов Maxwell Circuit в приложении Ansys Electronics Desktop.

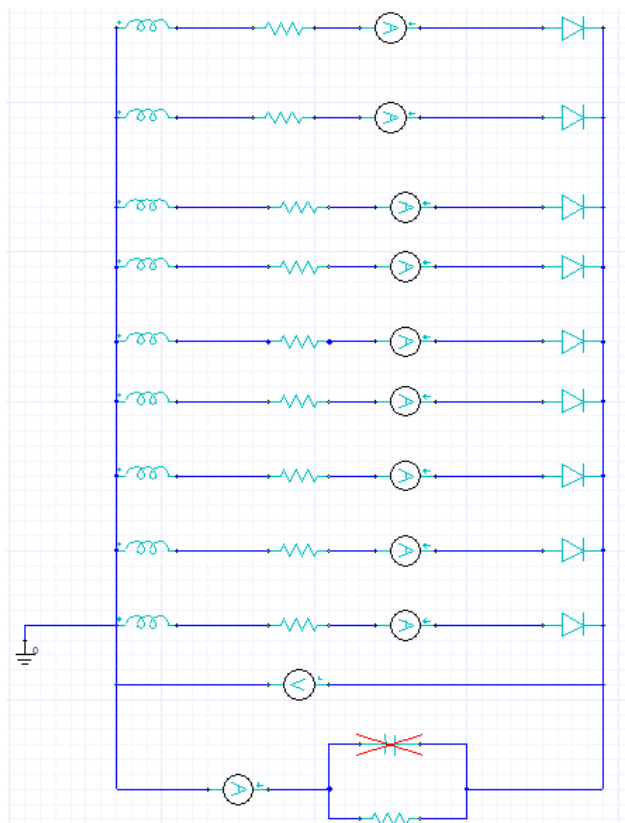


Рис.3.2.4. Цифровая модель однополупериодного выпрямителя и генератора с 9 фазами в приложении Maxwell Circuit

На основании данной цифровой модели проведем анализ номинальных и нештатных режимов работы генератора и выпрямителя для различного числа фаз и различных схем выпрямителя. Для тестирования выполним следующий объем цифровых экспериментов: для 3-х, 4-х, 5-ти, 6-ти, 7-ми, 8-ми и 9-ти фаз генератора с одним и тем же количеством витков исследуем выпрямленное напряжение для однополупериодного выпрямления, двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и кольцо, двухполупериодного полномостового выпрямления при соединении мостов в параллель и последовательно. Тестирование комплексов проведем на холостом ходу в нормальном режиме работы и нештатном режиме работы с обрывом одной фазы или одного диода. В качестве критериев сравнительного анализа примем параметры выпрямленного

напряжения (среднее выпрямленное напряжение, уровень пульсаций выпрямленного напряжения).

Результаты данных экспериментов приведены ниже (рис.3.3.1-3.9.14)

3.3. Исследование трехфазного генератора и выпрямителя

3.3.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

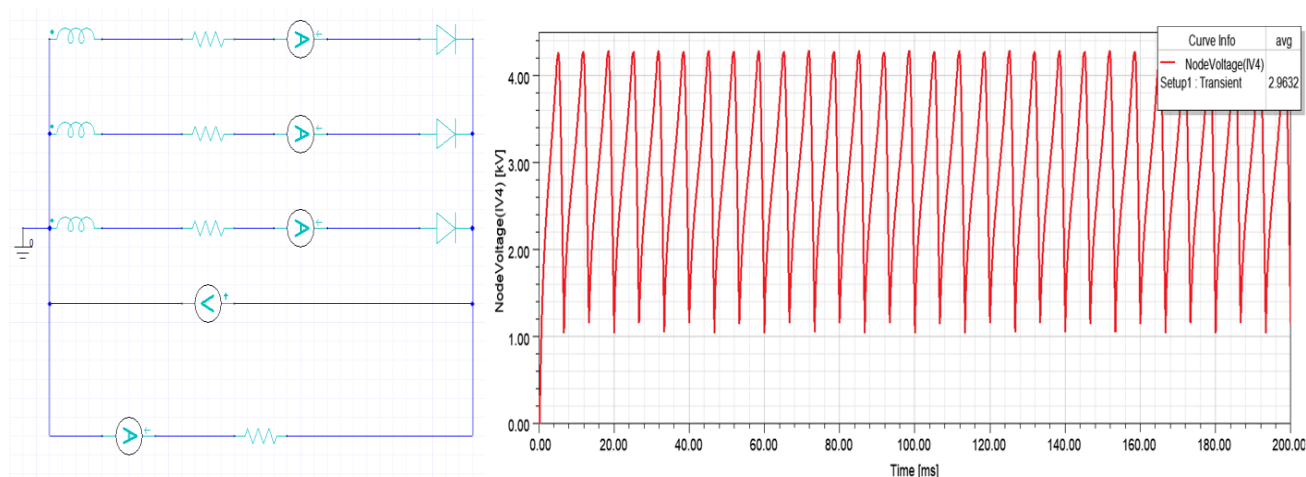


Рис.3.3.1. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного однополупериодного выпрямления при работе не холостом ходу (основные показатели:

$$U_{cp}=2,96 \text{ кВ}, \Delta U=0,55)$$

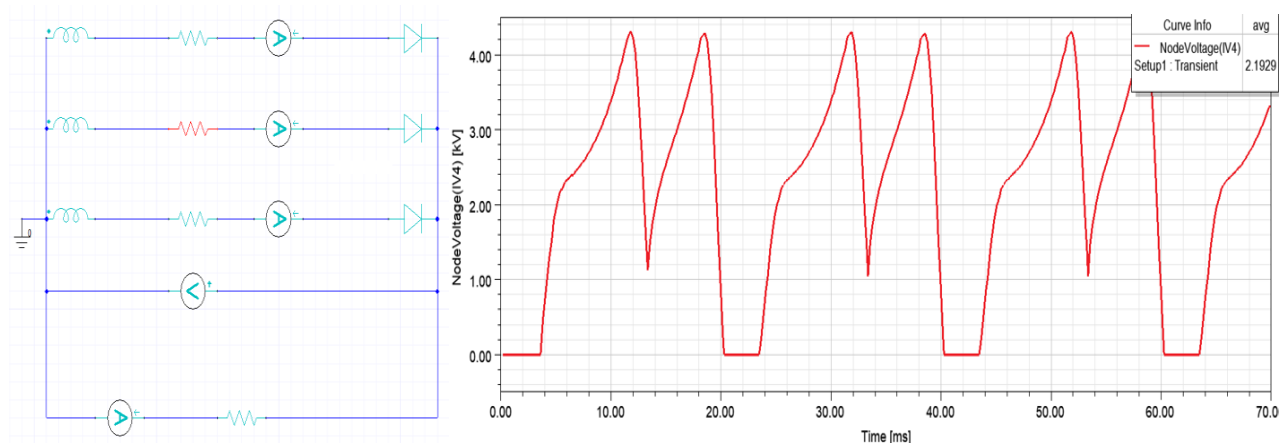


Рис.3.3.2. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки

$$(U_{cp}=2,19 \text{ кВ}, \Delta U=1,0)$$

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.3.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

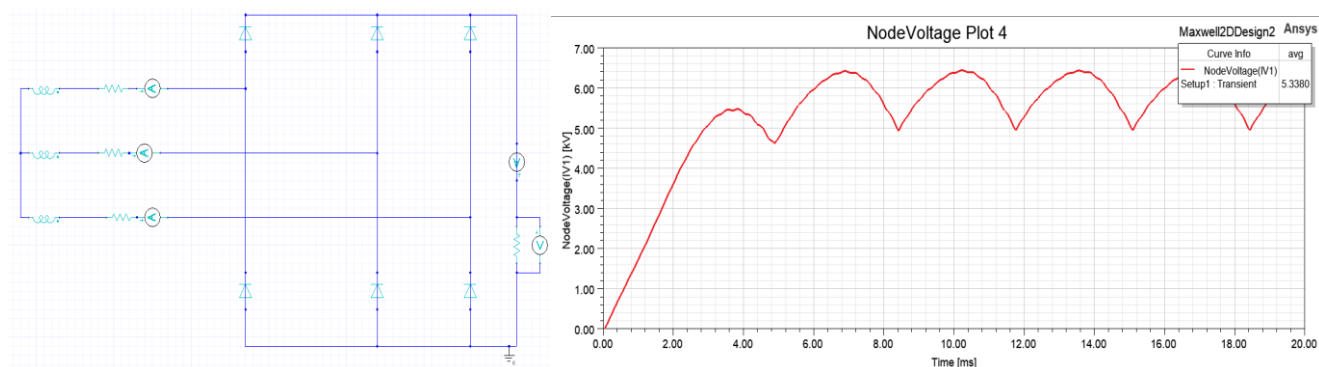


Рис.3.3.3. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе
(5,33 кВ, $\Delta U=0,15$)

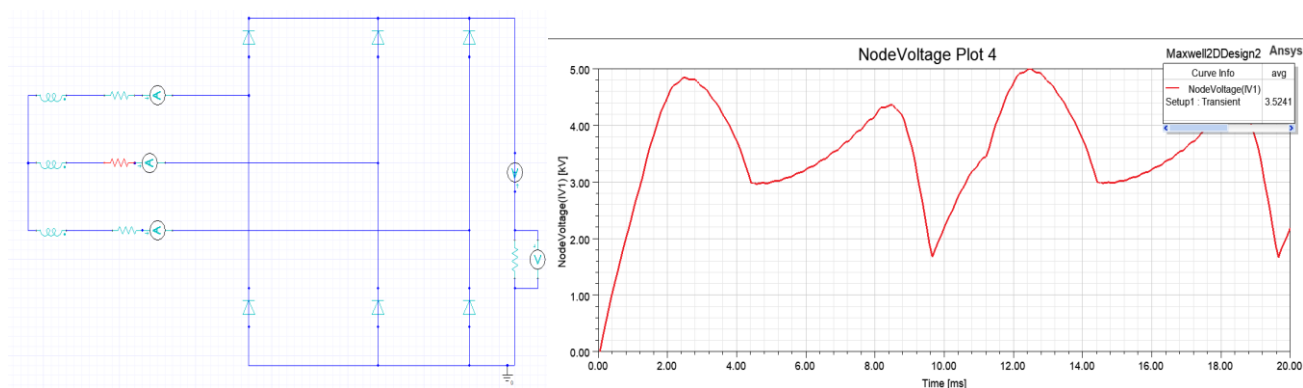


Рис.3.3.4. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы
($U_{ср}=3,8$ кВ, $\Delta U=0,61$)

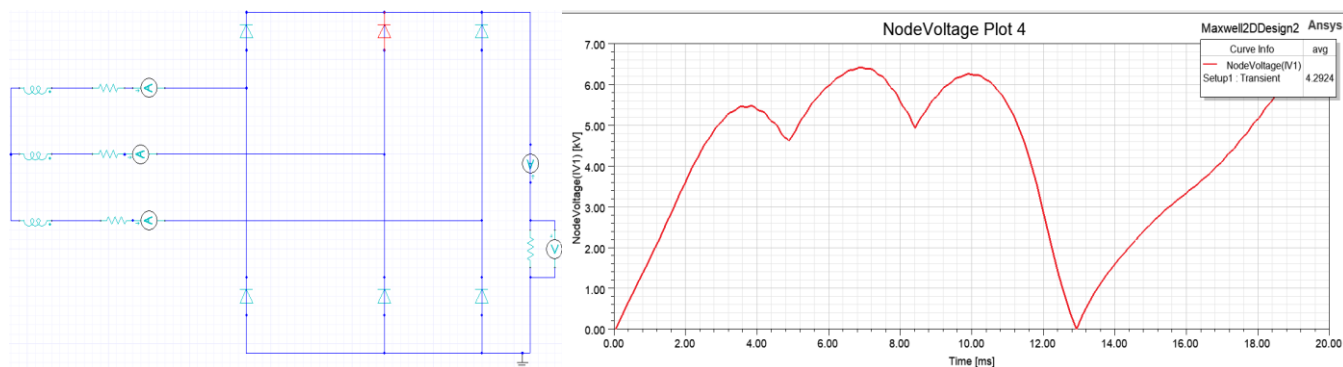


Рис.3.3.5. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода
($U_{ср}=4,29$ кВ, $\Delta U=1,0$)

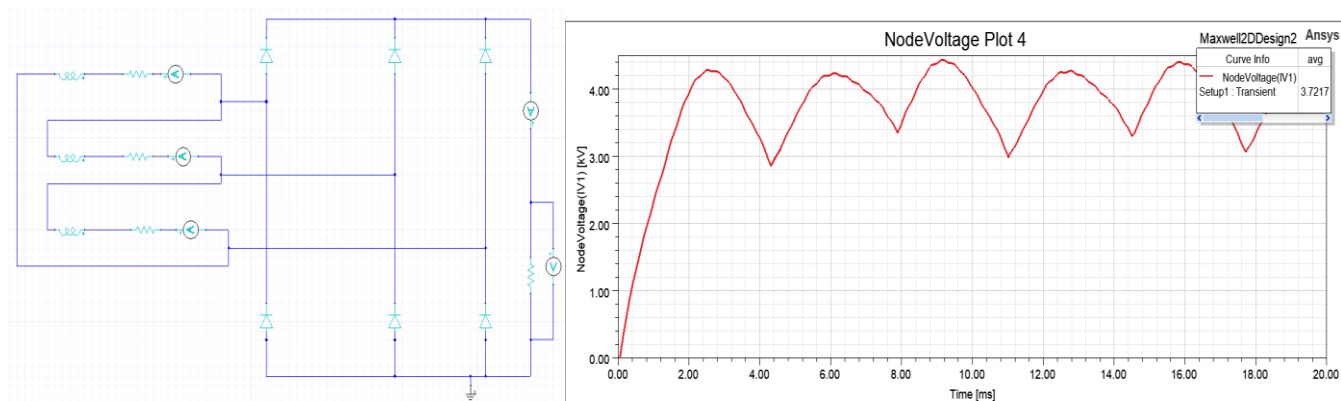


Рис.3.3.6. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{cp}=3,72$ кВ, $\Delta U=0,12$)

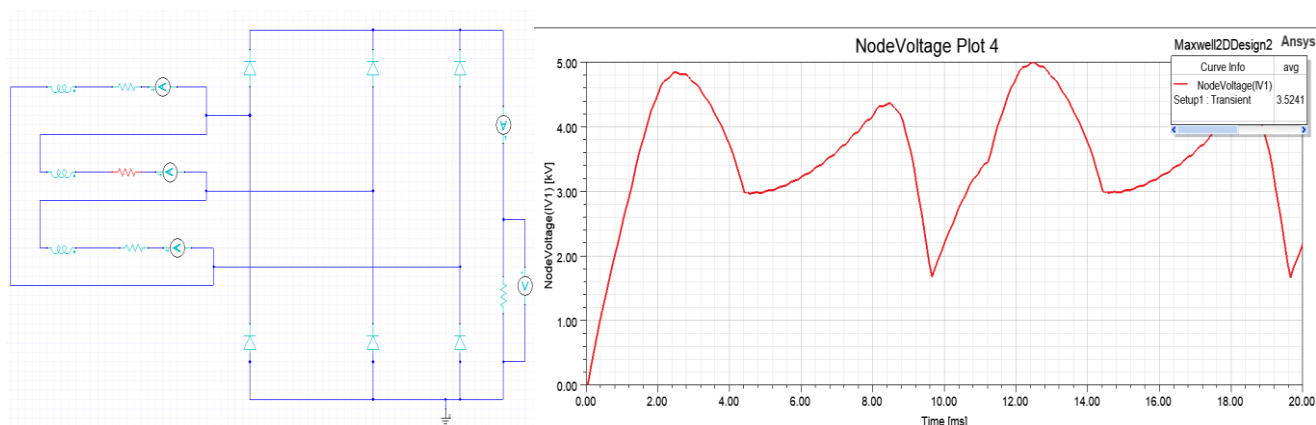


Рис.3.3.7. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{cp}=3,32$ кВ, $\Delta U=0,71$)

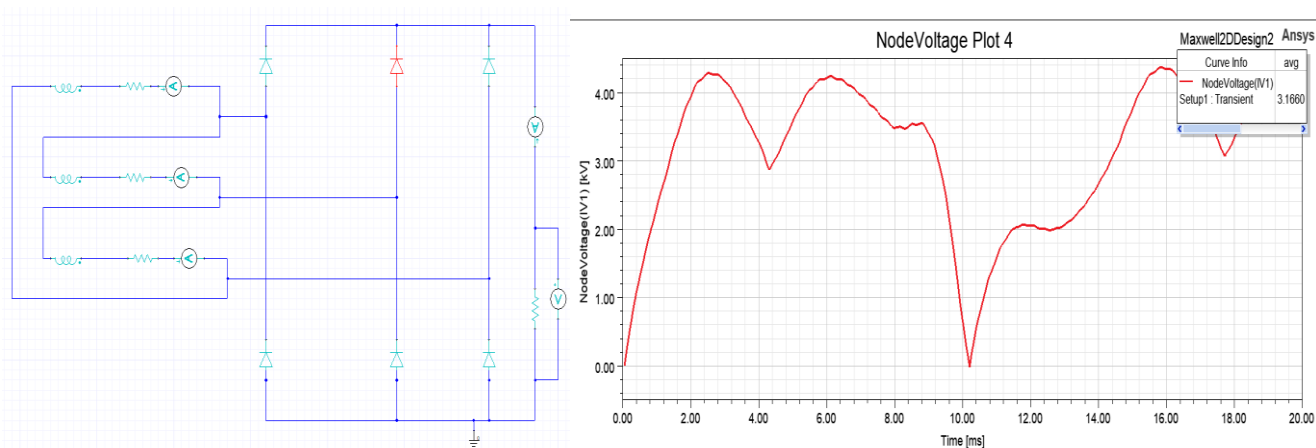


Рис.3.3.8. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{cp}=3,16$ кВ, $\Delta U=1$)

3.3.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель.

Номинальный и аварийный режимы работы

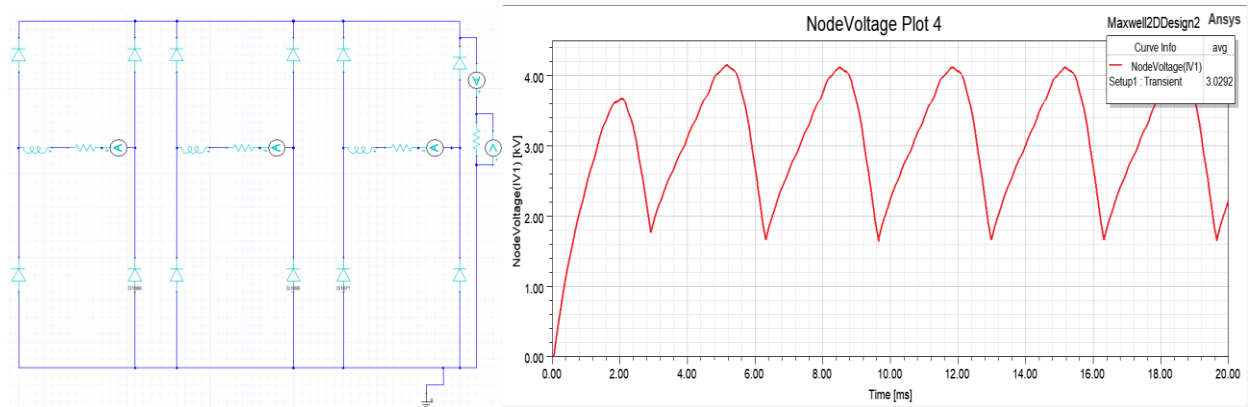


Рис.3.3.9. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{ср}=3,2$ кВ, $\Delta U=0,4$)

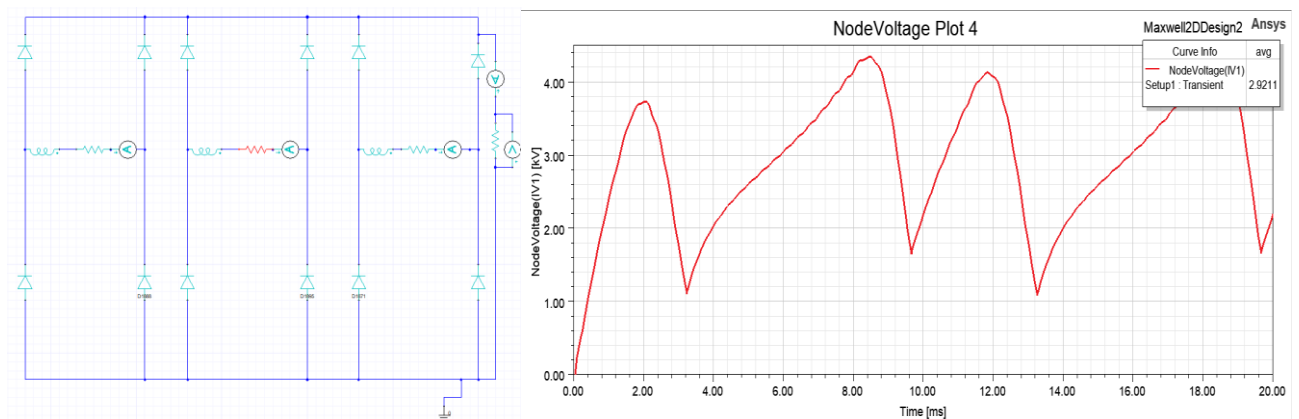


Рис.3.3.10. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{ср}=3,02$ кВ, $\Delta U=0,58$)

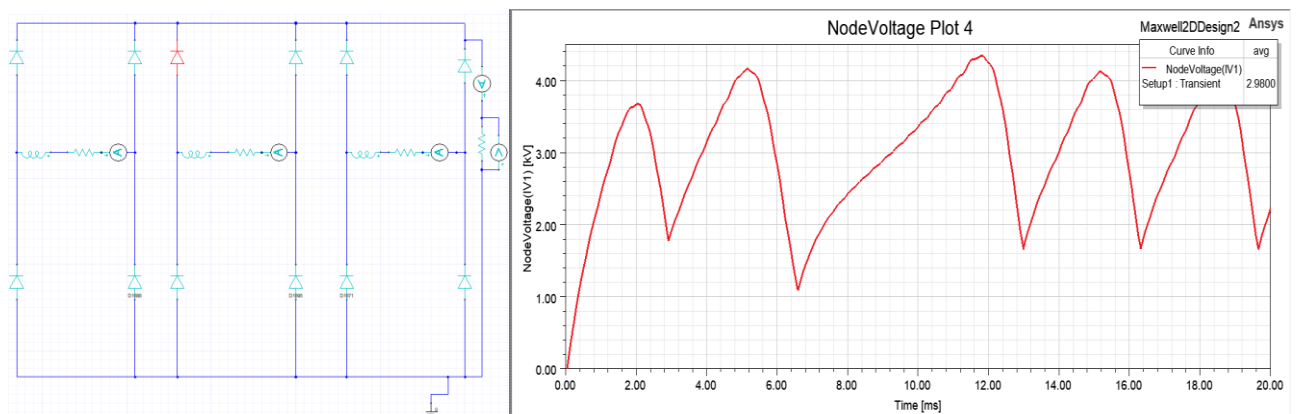


Рис.3.3.11. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{ср}=2,98$ кВ, $\Delta U=0,6$)

3.3.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно.

Номинальный и аварийный режимы работы

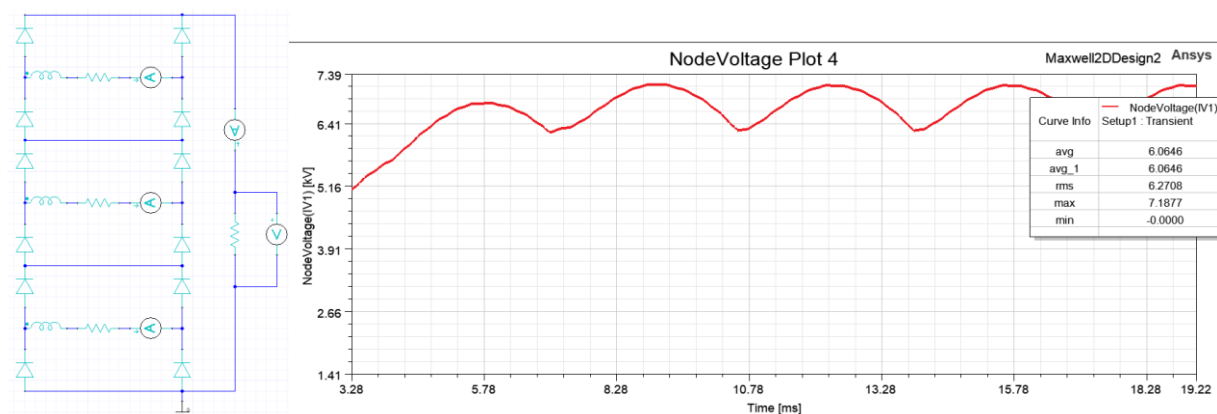


Рис.3.3.12. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в последовательно на холостом ходу
($U_{cp}=6,06$ кВ, $\Delta U=0,06$)

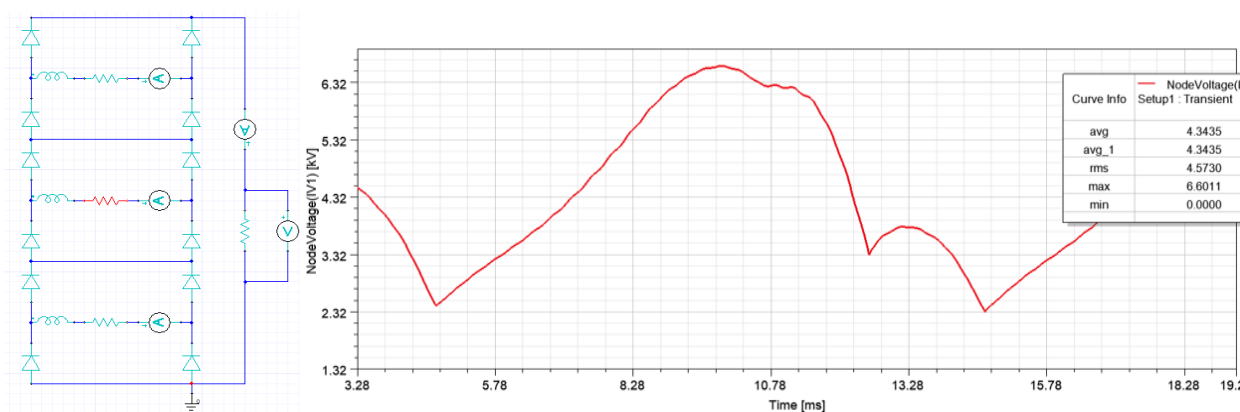


Рис.3.3.13. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в последовательно при обрыве одной фазы
($U_{cp}=5,01$ кВ, $\Delta U=0,5$)

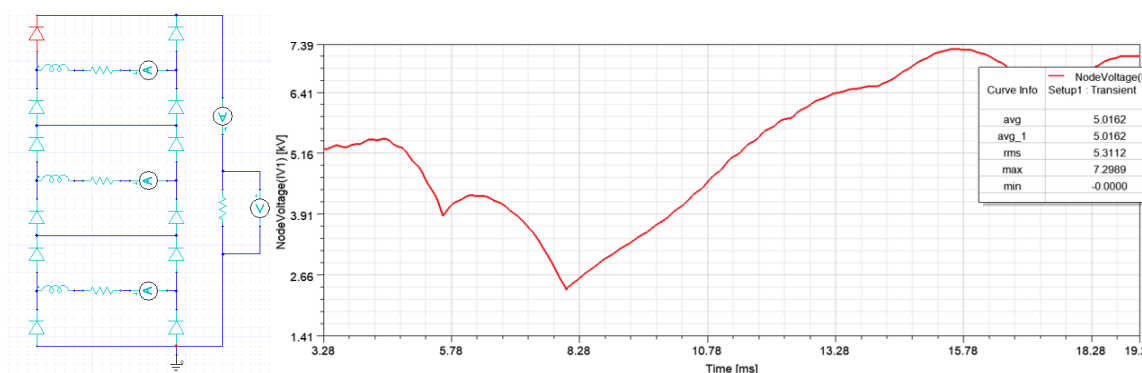


Рис.3.3.14. Схема и выпрямленное напряжение трехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в последовательно при обрыве диода
($U_{cp}=5,01$ кВ, $\Delta U=0,5$)

3.4. Исследование четырехфазного генератора и выпрямителя

3.4.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

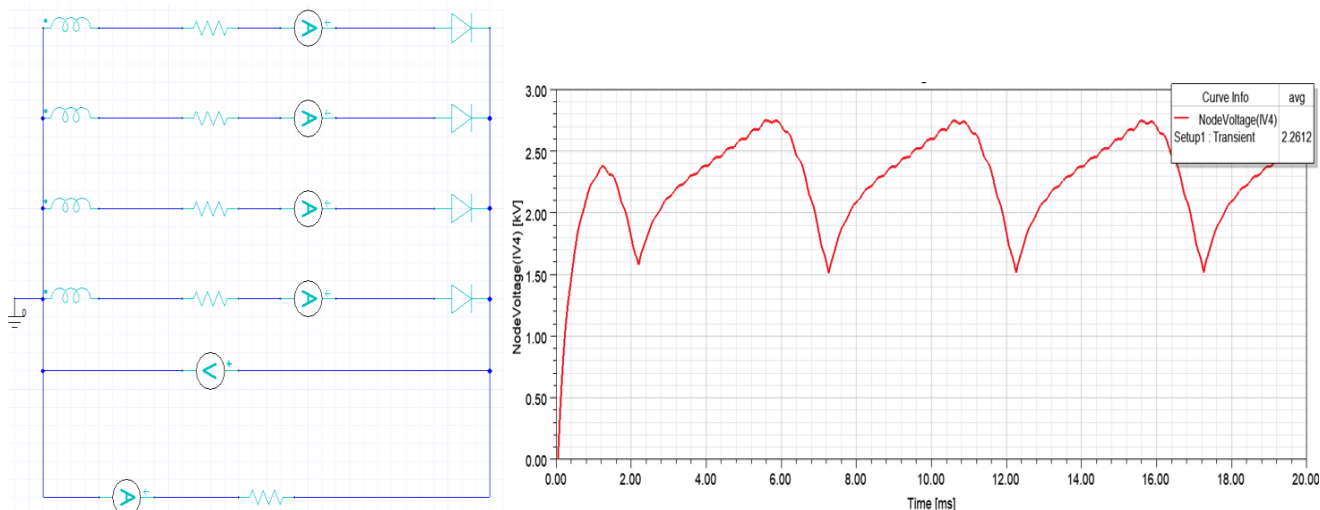


Рис.3.4.1. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного однополупериодного выпрямления при работе не холостом ходу ($U_{cp}=2,26$ кВ, $\Delta U=0,4$)

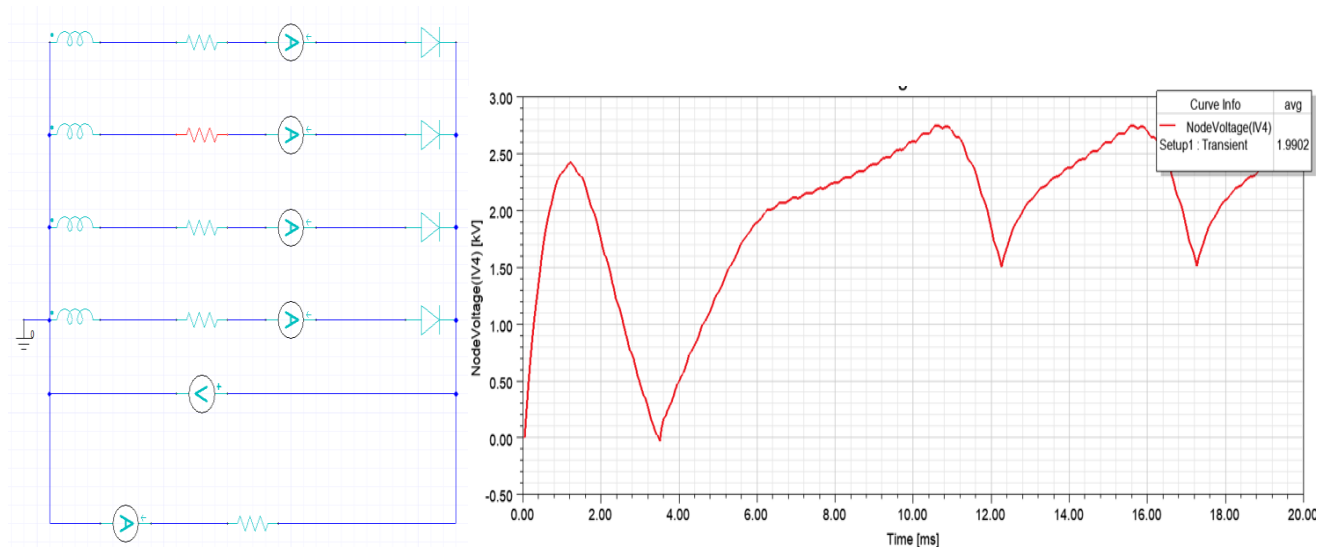


Рис.3.4.2. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки ($U_{cp}=1,99$ кВ, $\Delta U=0.66$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.4.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

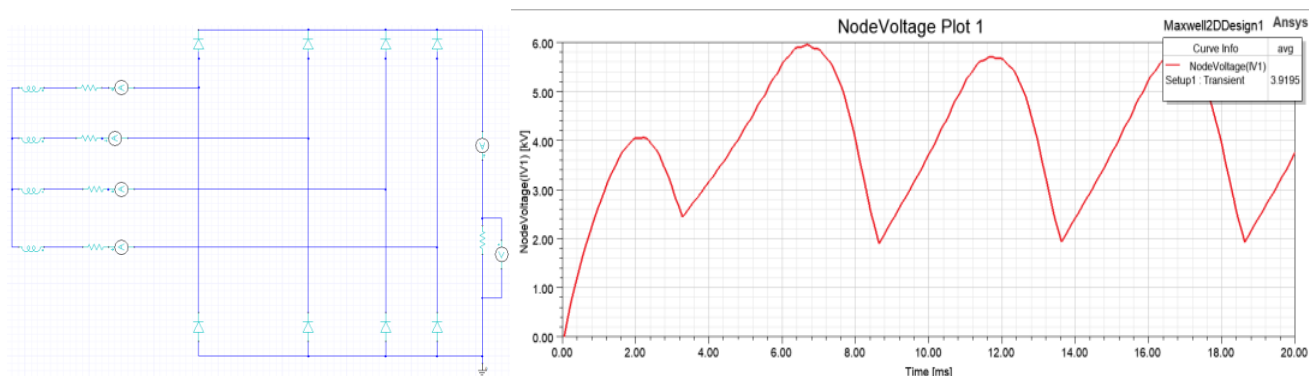


Рис.3.4.3. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе ($4,5 \text{ кВ}$, $\Delta U=0,14$)

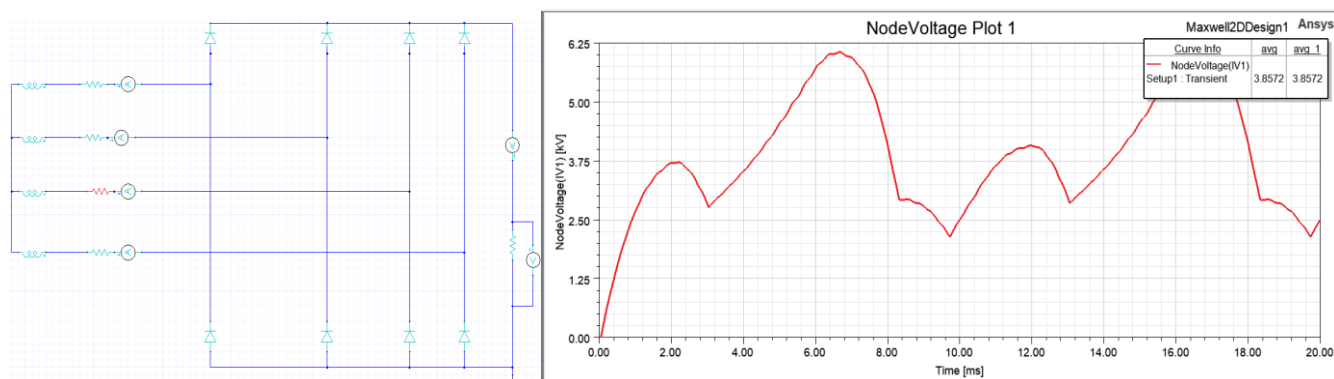


Рис.3.4.5. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы ($U_{ср}=3,2 \text{ кВ}$, $\Delta U=0,58$)

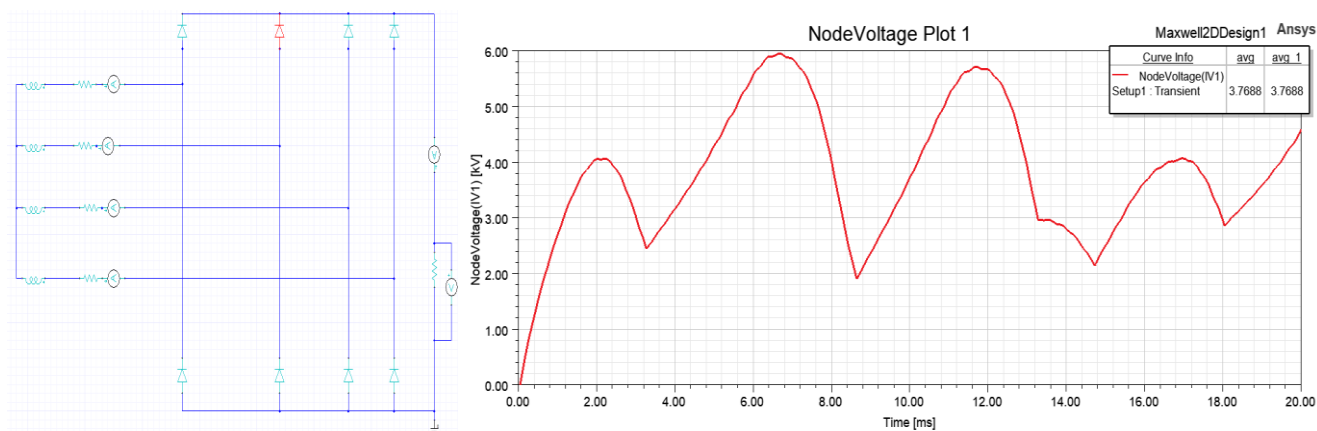


Рис.3.4.6. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода ($U_{ср}=3,76 \text{ кВ}$, $\Delta U=0,8$)

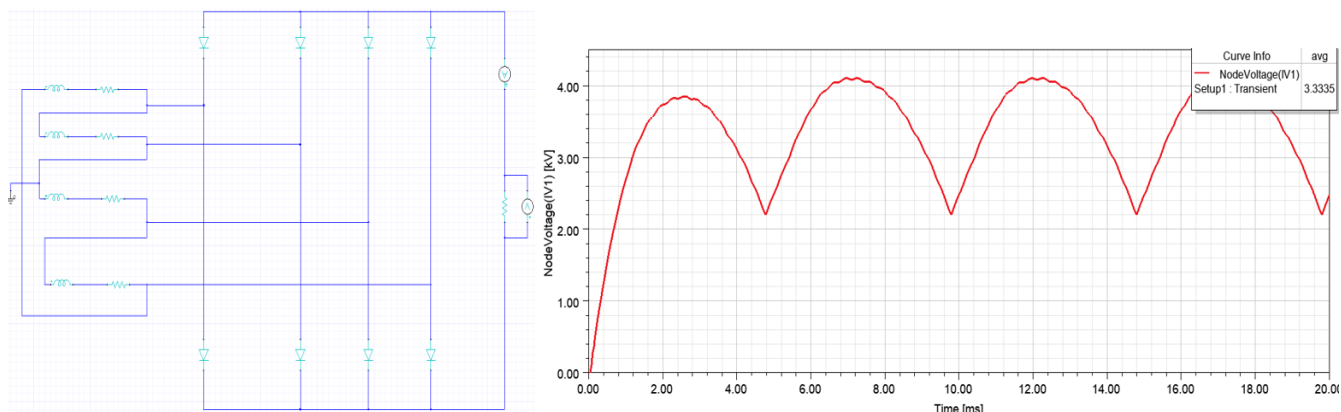


Рис.3.4.6. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе ($U_{cp}=3,58$ кВ, $\Delta U=0,1$)

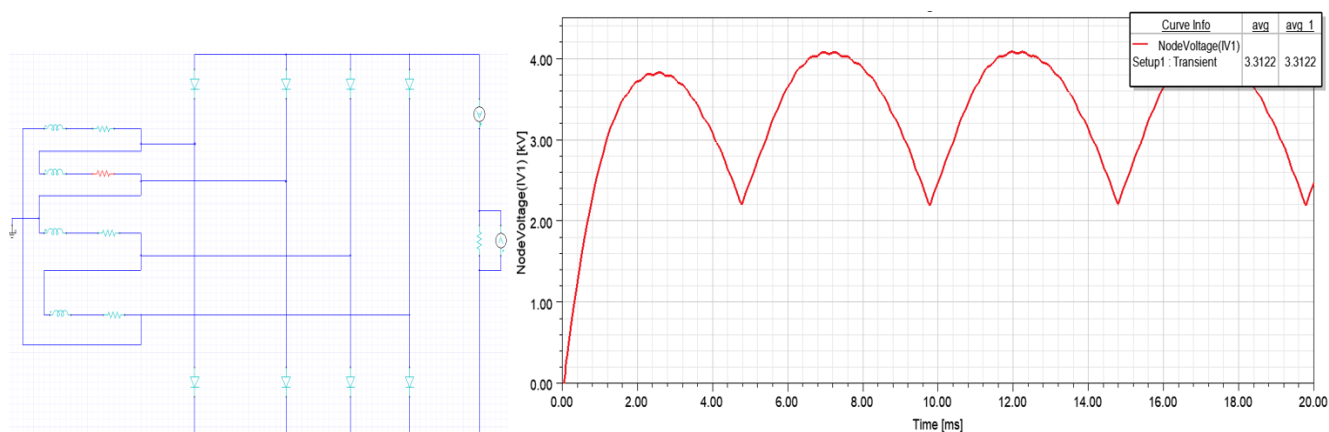


Рис.3.4.7. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы ($U_{cp}=3,31$ кВ, $\Delta U=0,5$)

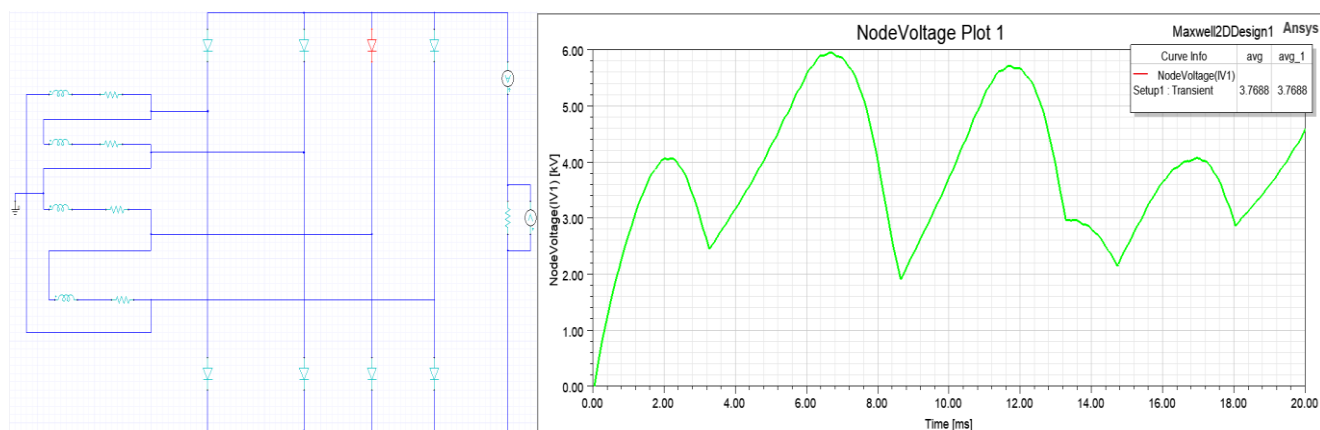


Рис.3.4.8. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода ($U_{cp}=3,76$ кВ, $\Delta U=0,7$)

3.4.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель. Номинальный и аварийный режимы работы

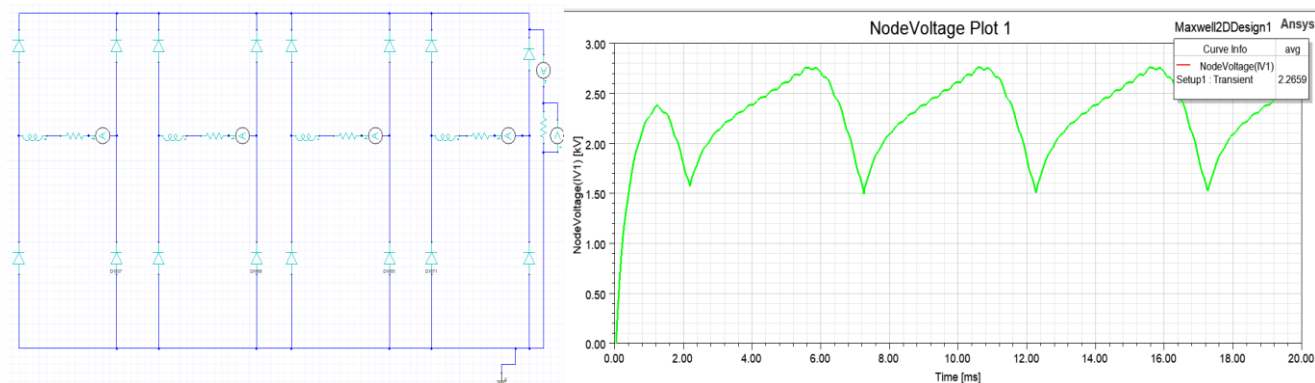


Рис.3.4.9. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{cp}=2,5$ кВ, $\Delta U=0,34$)

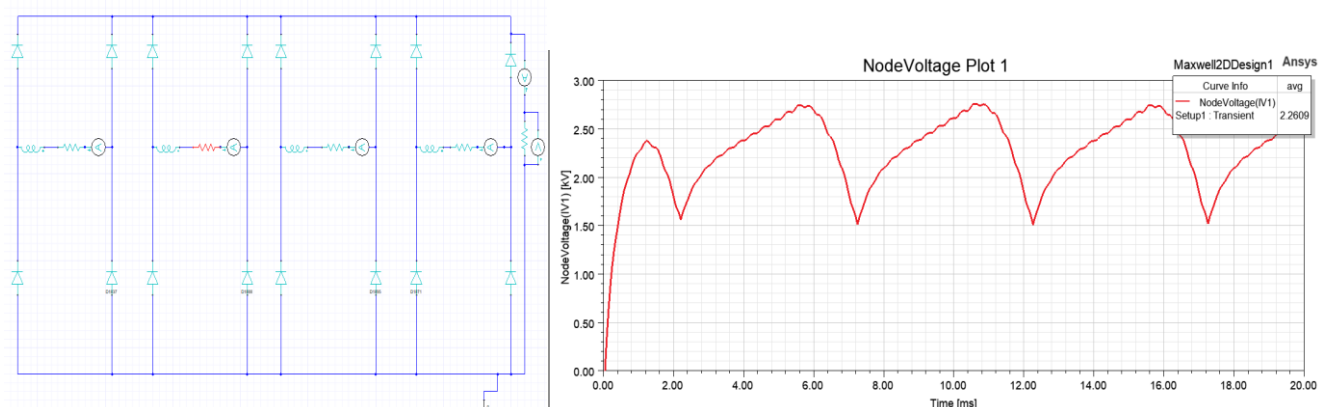


Рис.3.4.10. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{cp}=2,26$ кВ, $\Delta U=0,45$)

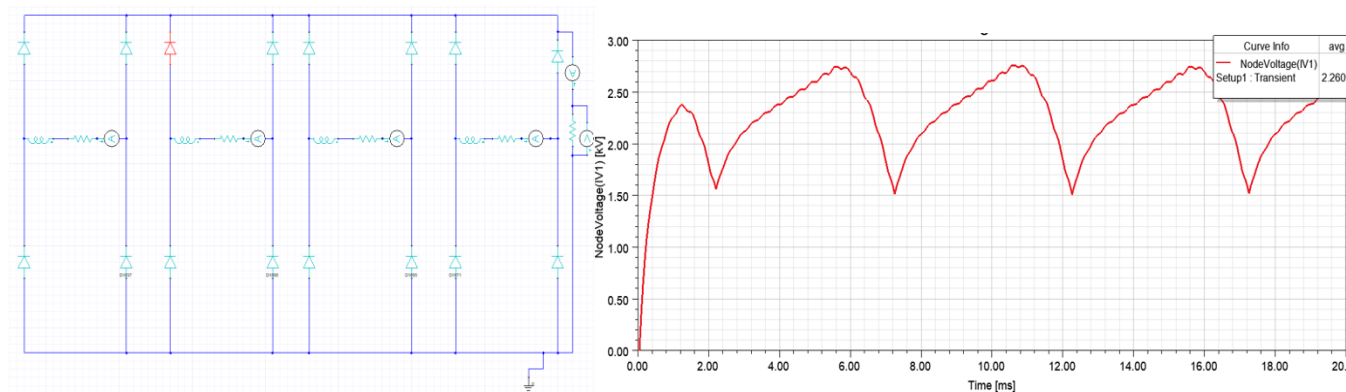


Рис.3.4.11. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{cp}=2,26$ кВ, $\Delta U=0,5$)

3.4.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно.

Номинальный и аварийный режимы работы

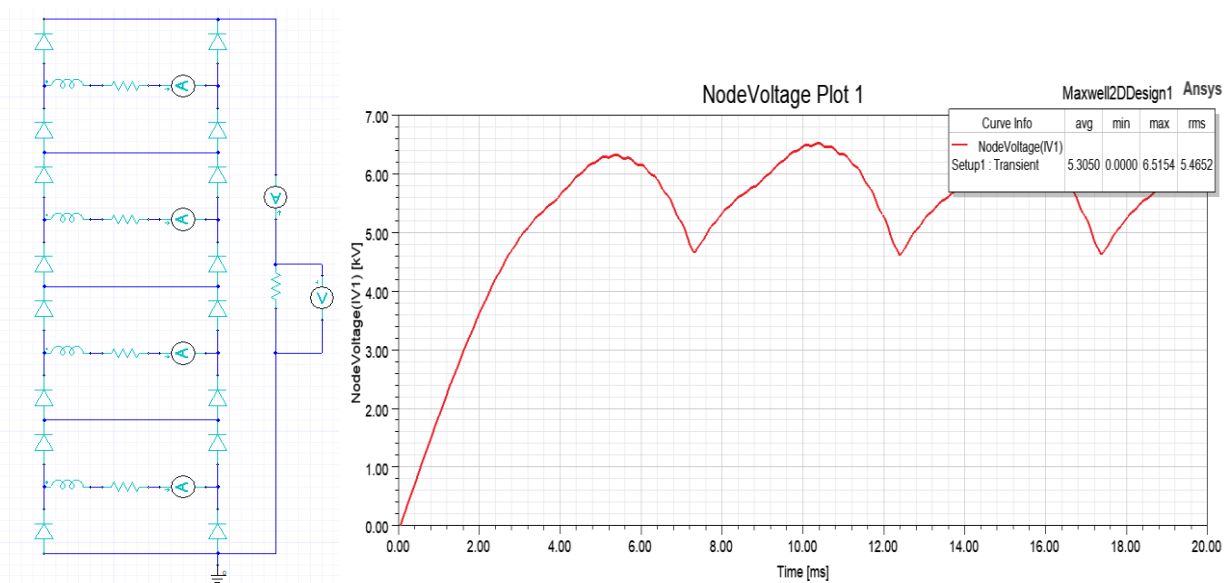


Рис.3.4.12. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямления при соединении мостов последовательно на холостом ходу ($U_{ср}=6,1$ кВ, $\Delta U=0,04$)

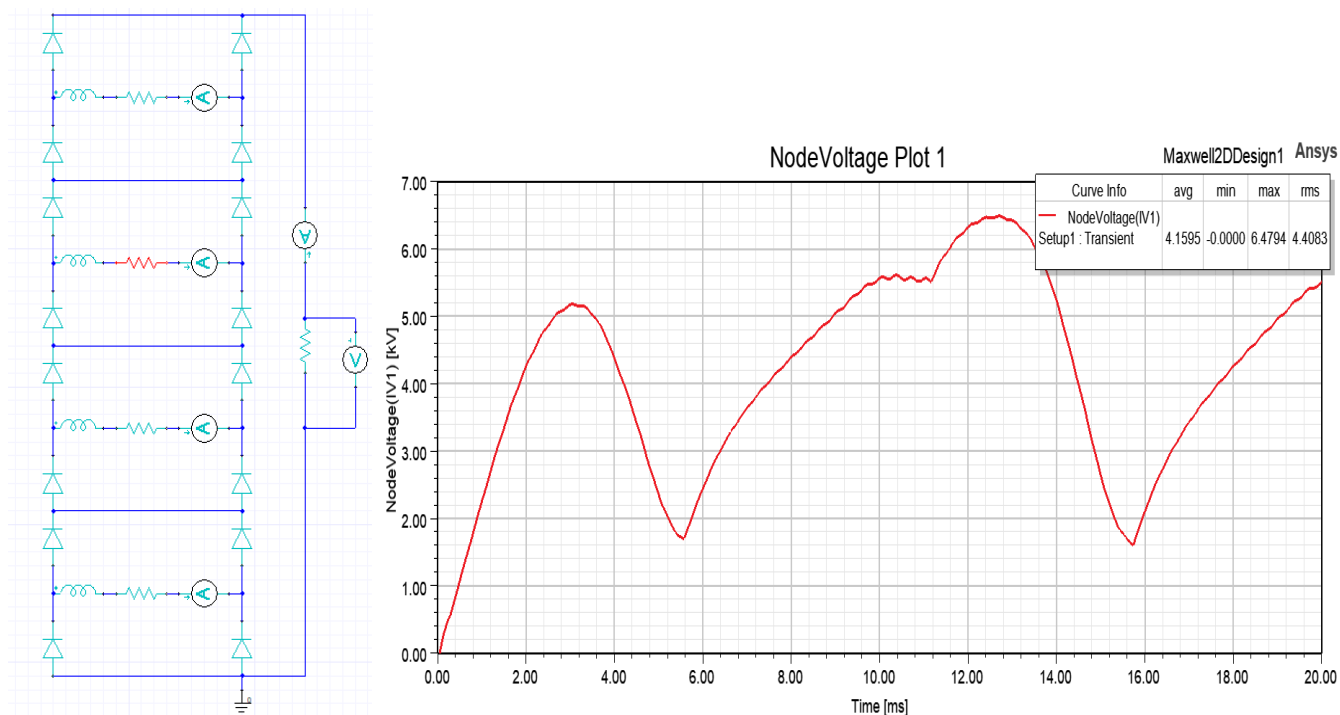


Рис.3.4.13. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямления при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы ($U_{ср}=4,7$ кВ, $\Delta U=0,28$)

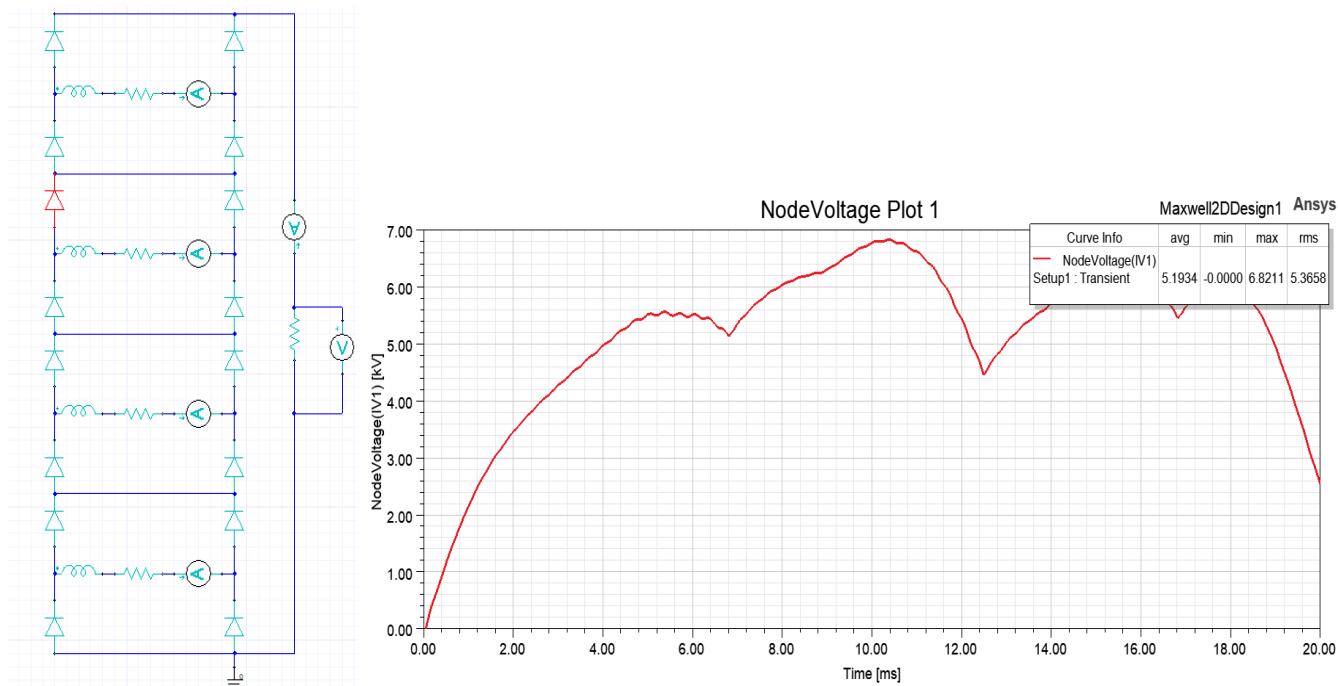


Рис.3.4.14. Схема и выпрямленное напряжение четырехфазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода ($U_{ср}=5,19$ кВ, $\Delta U=0,38$)

3.5. Исследование пятифазного генератора и выпрямителя

3.5.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

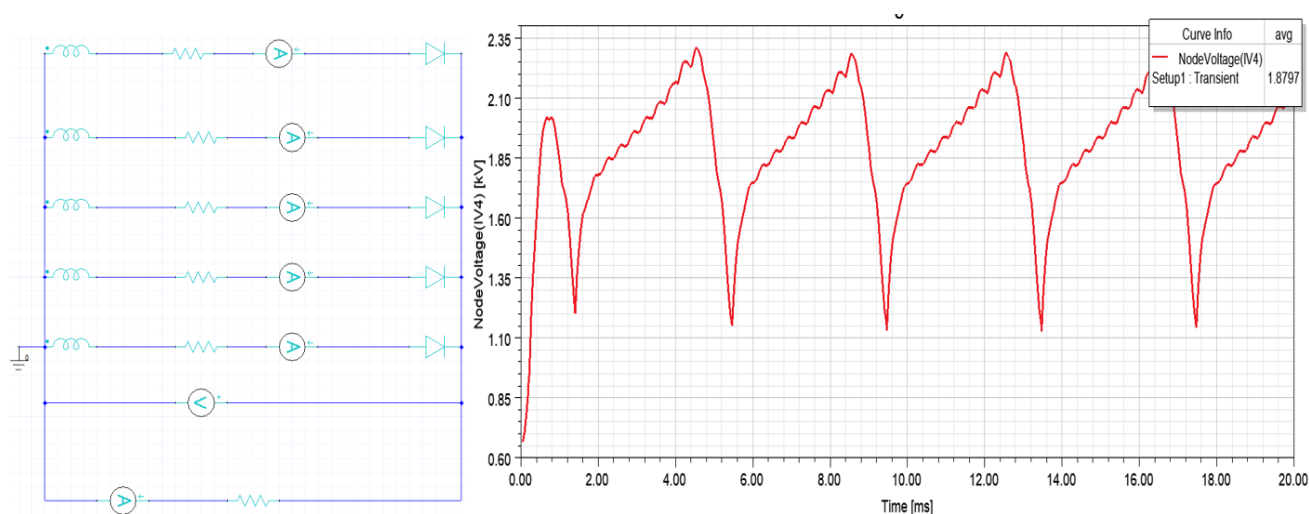


Рис.3.5.1 Схема и выпрямленное напряжение пятифазного однополупериодного выпрямления при работе на холостом ходу ($U_{ср}=1,88$ кВ, $\Delta U=0,34$)

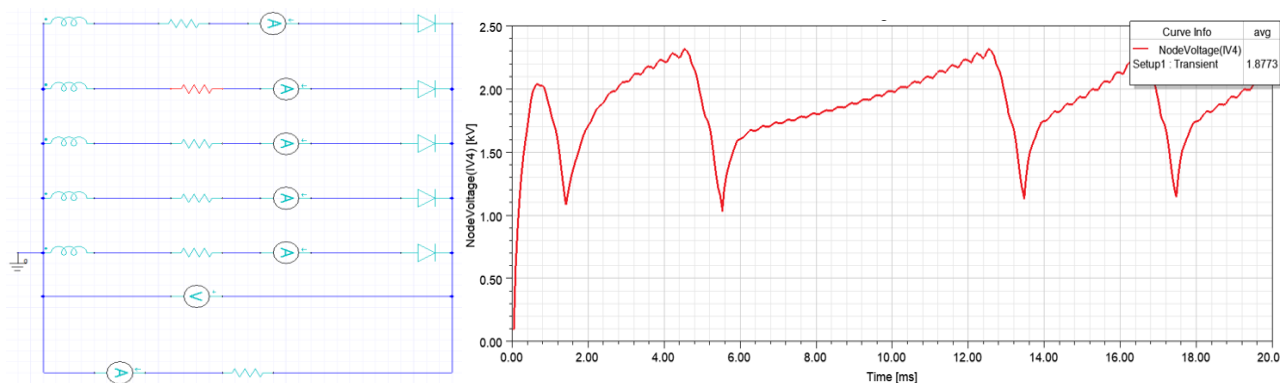


Рис.3.5.2. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки ($U_{ср}=1,88$ кВ, $\Delta U=0,57$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.5.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

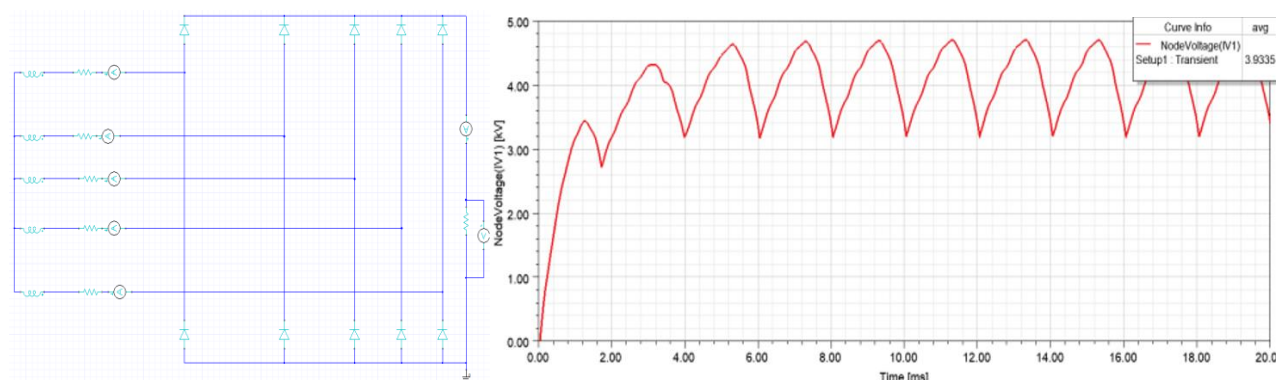


Рис.3.5.3. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе ($U_{ср}=3,93$ кВ, $\Delta U=0,13$)

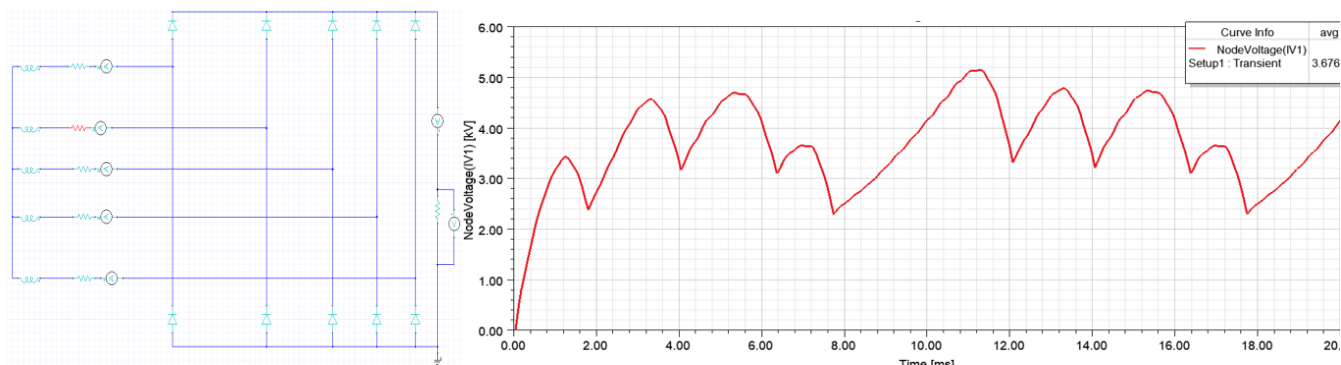


Рис.3.5.4. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы ($U_{ср}=3,0$ кВ, $\Delta U=0,5$)

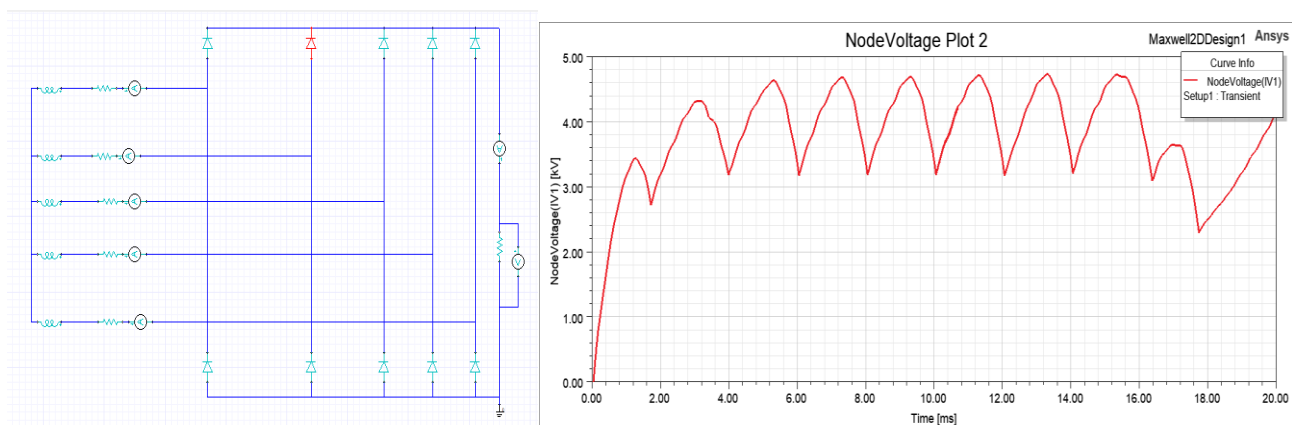


Рис.3.5.5. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода
($U_{ср}=3,35$ кВ, $\Delta U=0,65$)

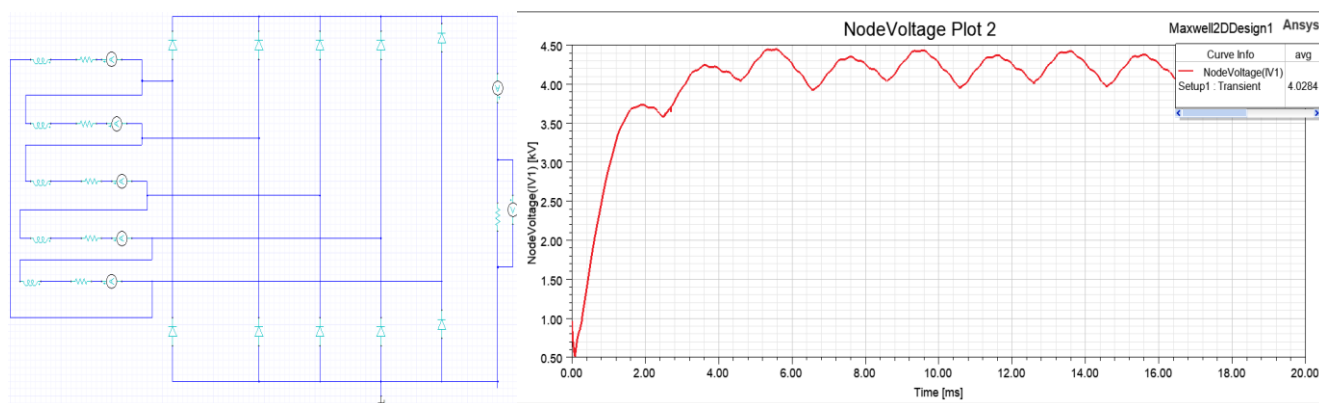


Рис.3.5.6. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{ср}=3,6$ кВ, $\Delta U=0,1$)

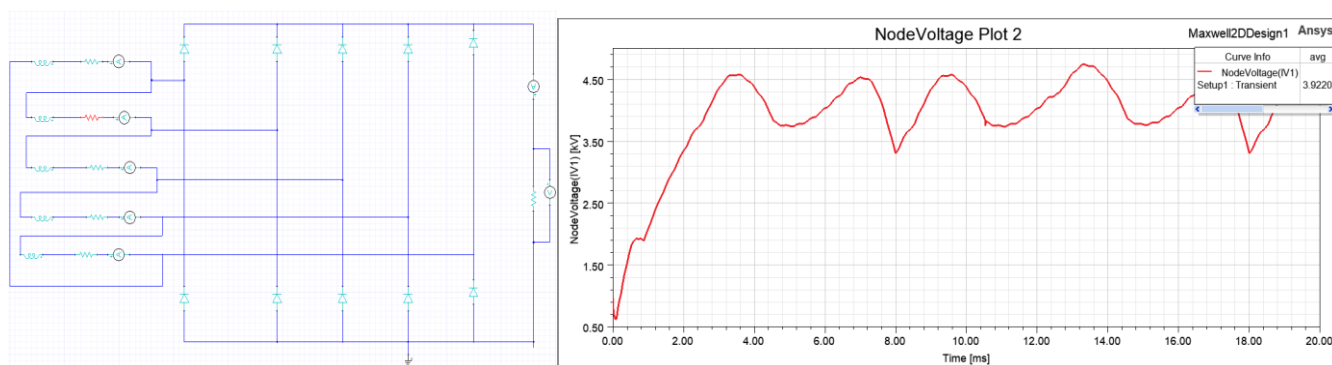


Рис.3.5.7. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{ср}=3,5$ кВ, $\Delta U=0,4$)

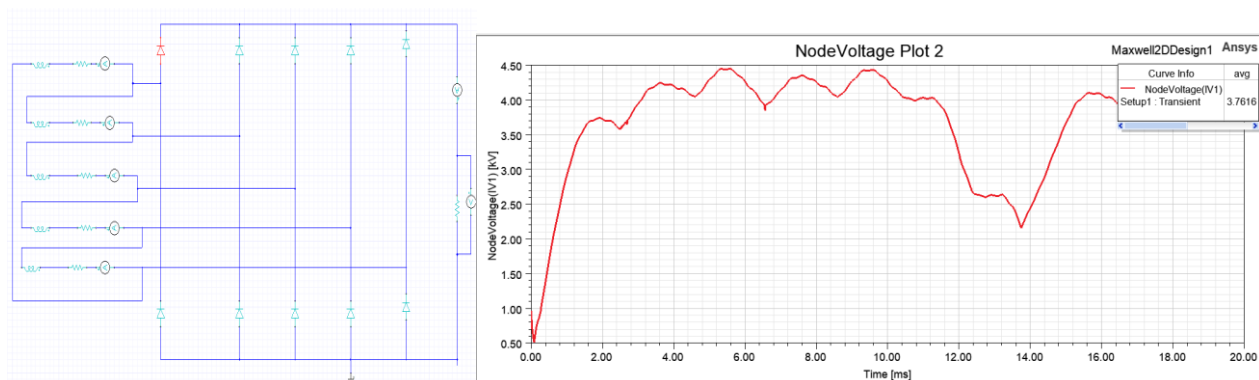


Рис.3.5.8. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{ср}=3,75\text{кВ}$, $\Delta U=0,5$)

3.5.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель.

Номинальный и аварийный режимы работы

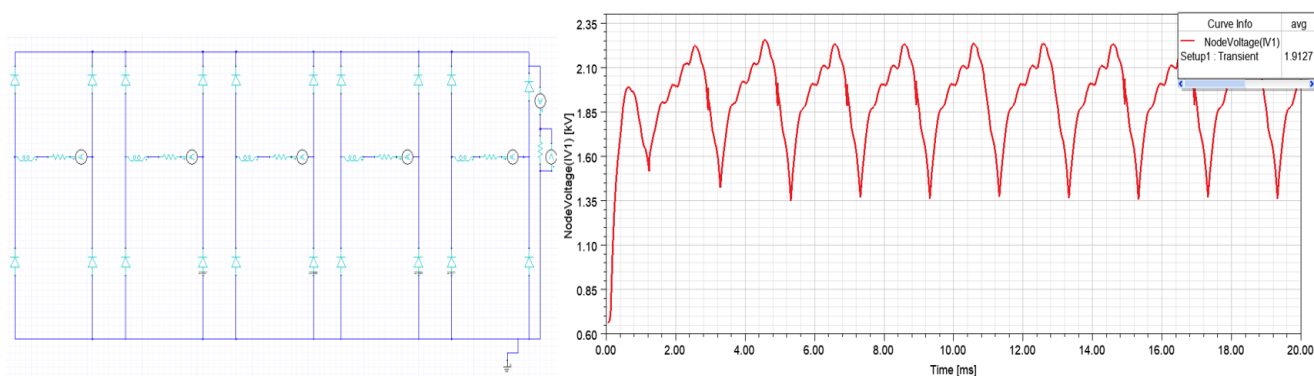


Рис.3.5.9. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{ср}=2,1\text{ кВ}$, $\Delta U=0,3$)

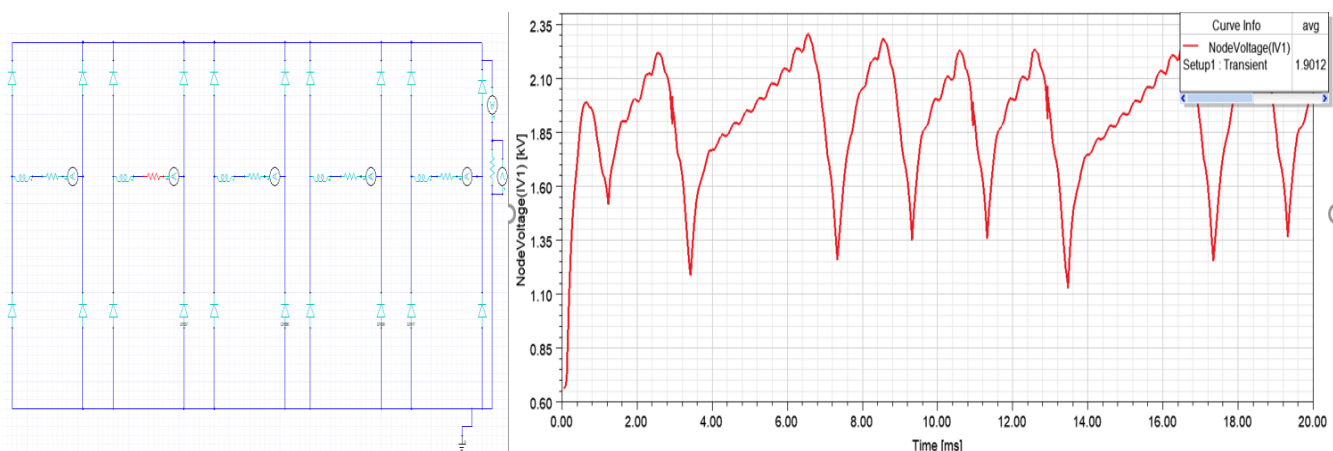


Рис.3.5.10. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{ср}=1,90\text{ кВ}$, $\Delta U=0,34$)

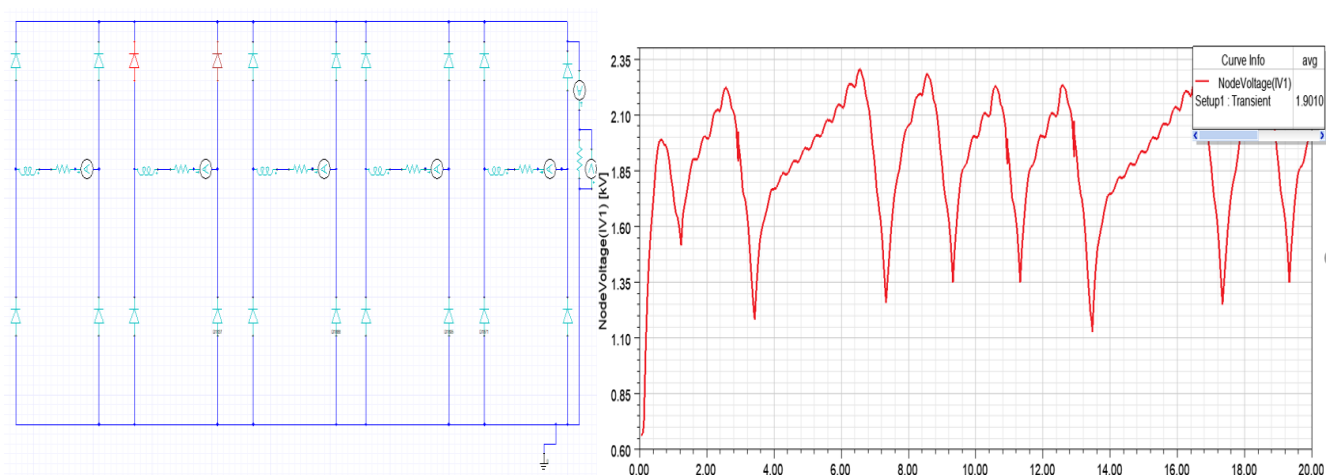


Рис.3.5.11. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{ср}=1,90$ кВ, $\Delta U=0,38$)

3.5.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно. Номинальный и аварийный режимы работы

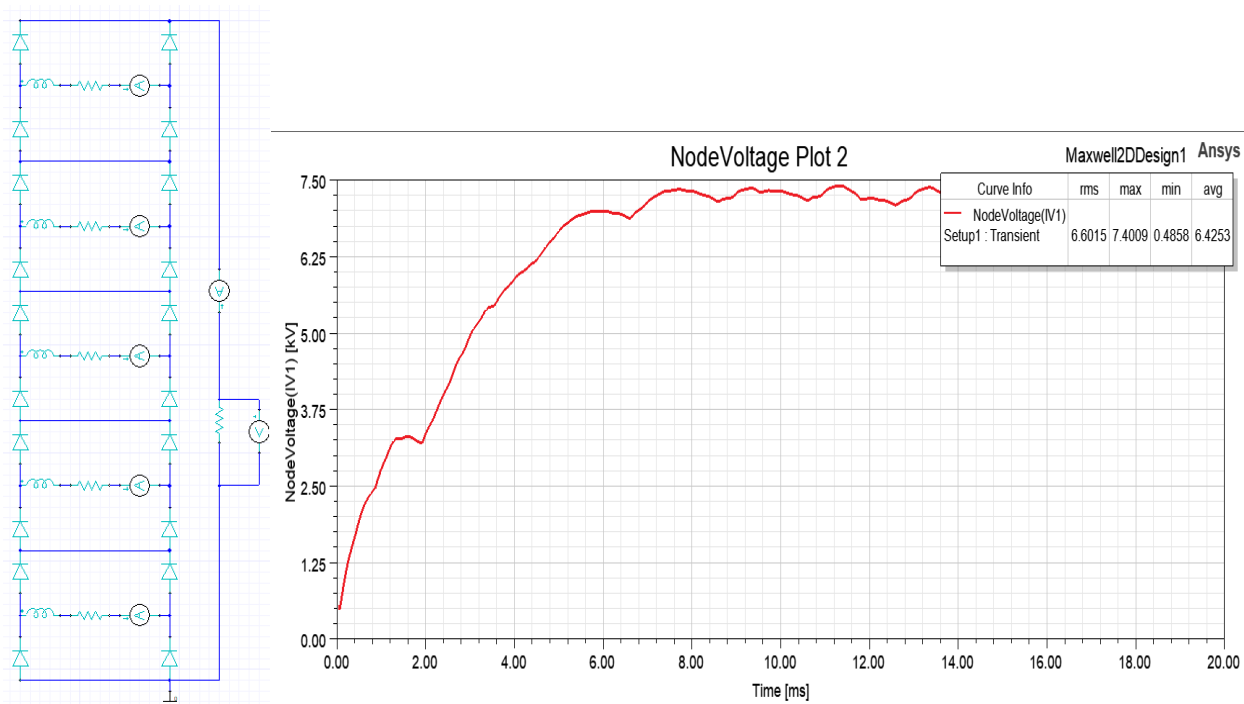


Рис.3.5.12. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно на холостом ходу
($U_{ср}=6,06$ кВ, $\Delta U=0,072$)

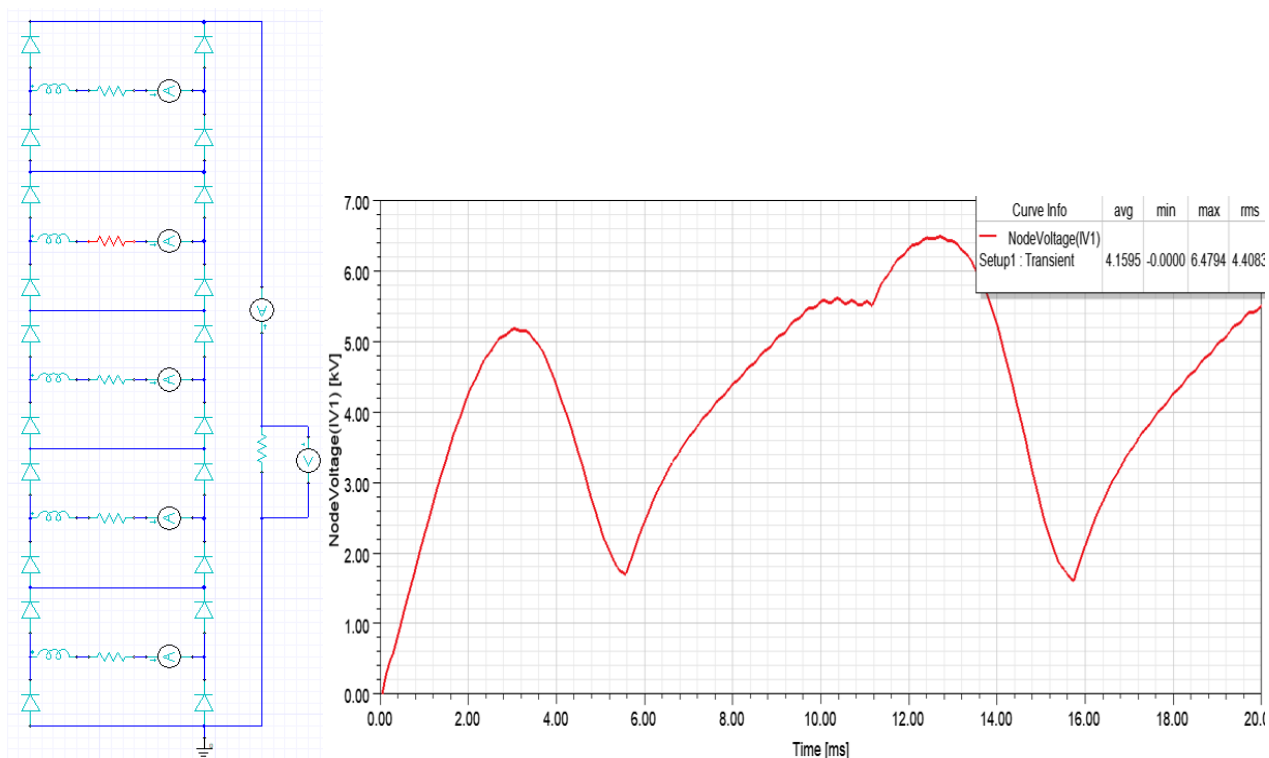


Рис.3.5.13. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы ($U_{ср}=5,02$ кВ, $\Delta U=0,25$)

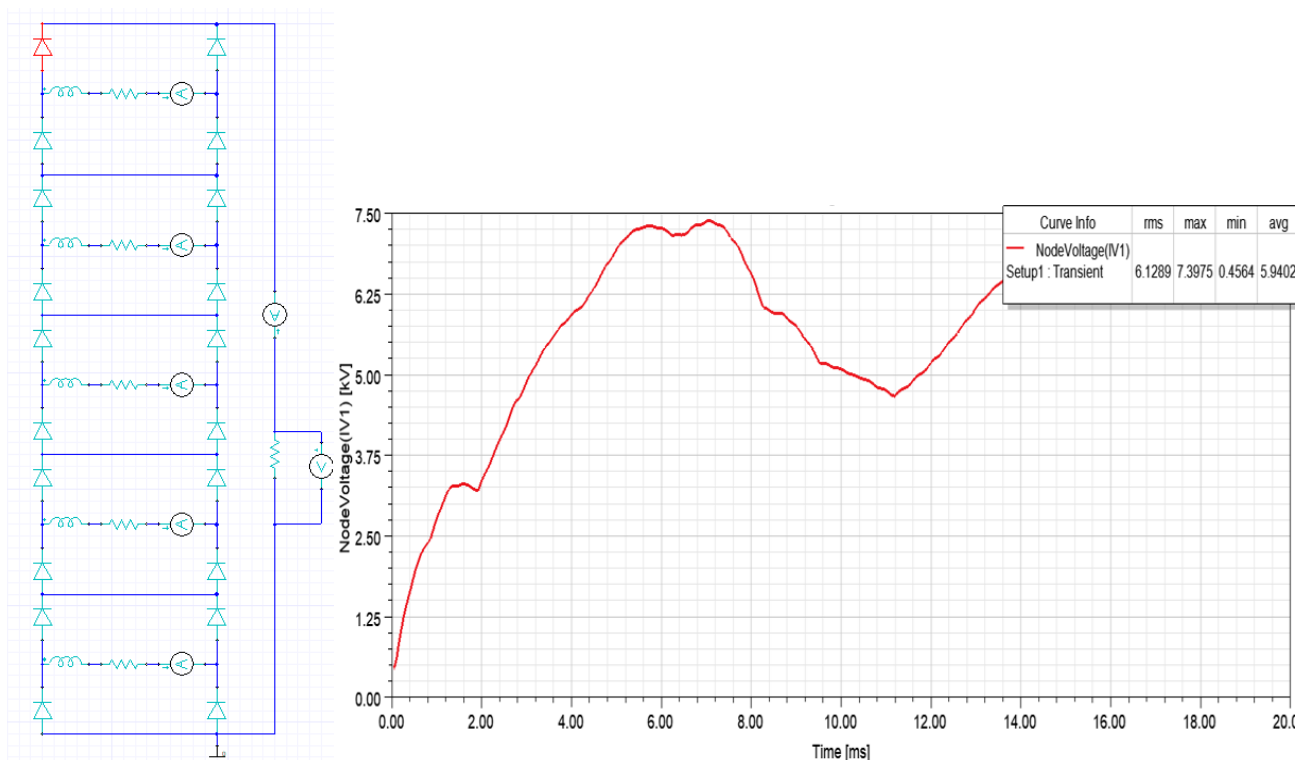


Рис.3.5.14. Схема и выпрямленное напряжение пятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода ($U_{ср}=5,5$ кВ, $\Delta U=0,3$)

3.6. Исследование шестифазного генератора и выпрямителя

3.6.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

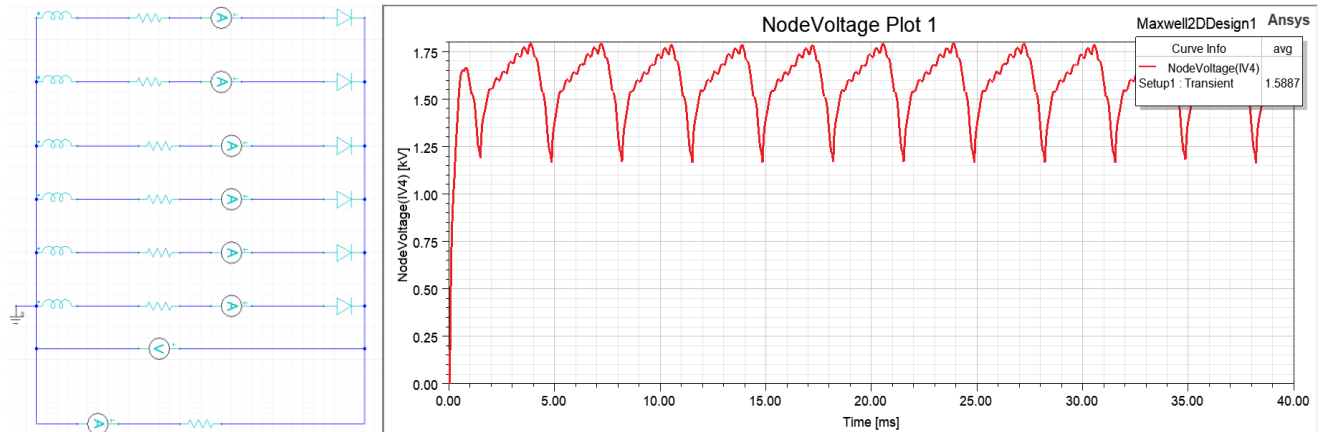


Рис.3.6.1. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного однополупериодного выпрямления при работе на холостом ходу ($U_{ср}=1,58$ кВ, $\Delta U=0,3$)

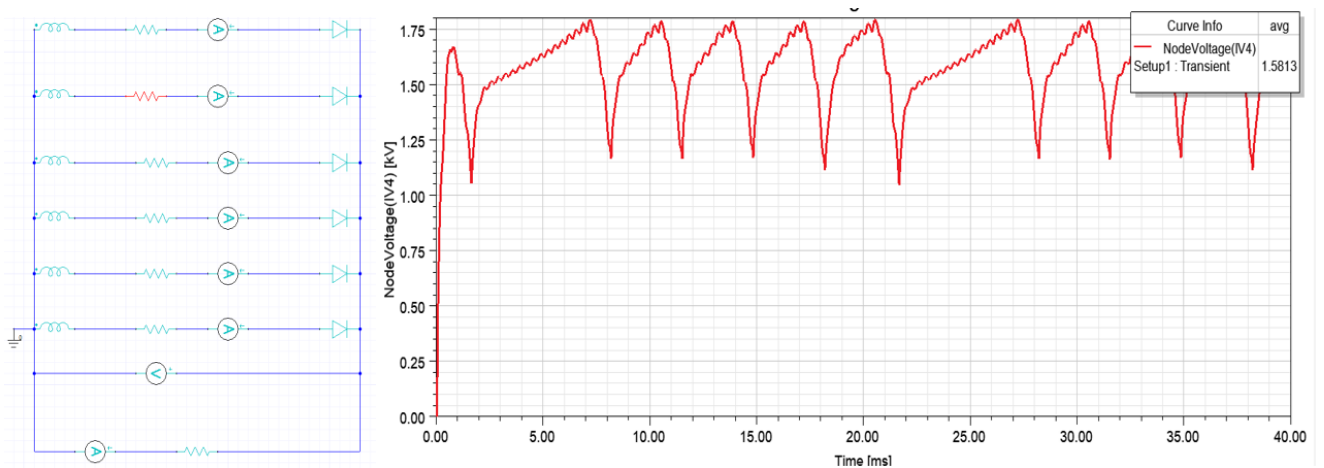


Рис.3.6.2. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки ($U_{ср}=1,58$ кВ, $\Delta U=0,09$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.6.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

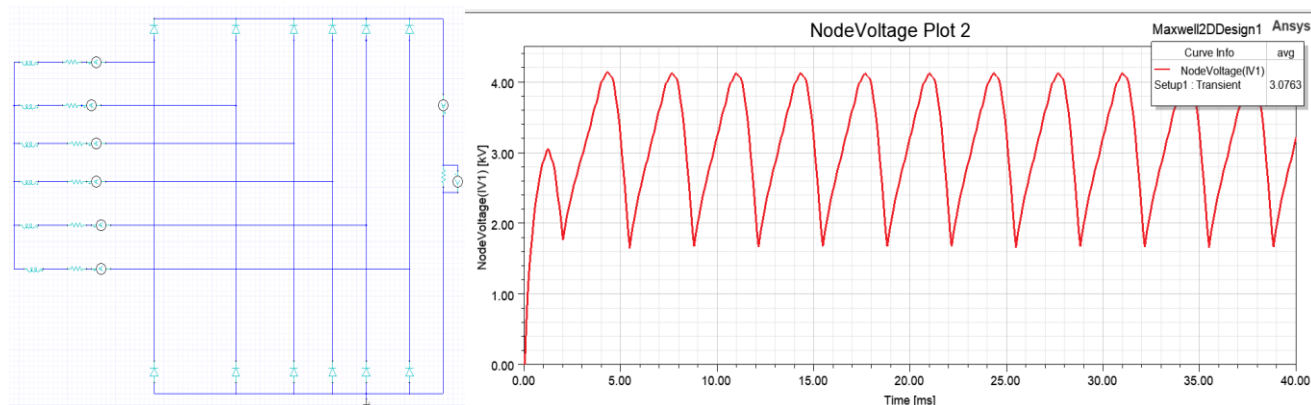


Рис.3.6.3. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе
($U_{ср}=3,07$ кВ, $\Delta U=0, 13$)

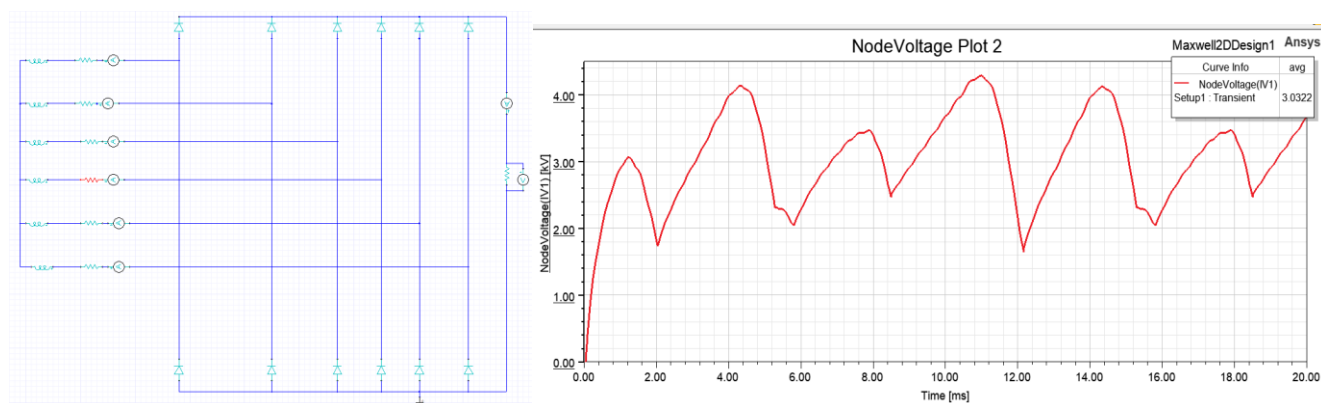


Рис.3.6.4. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы
($U_{ср}=2,5$ кВ, $\Delta U=0, 44$)

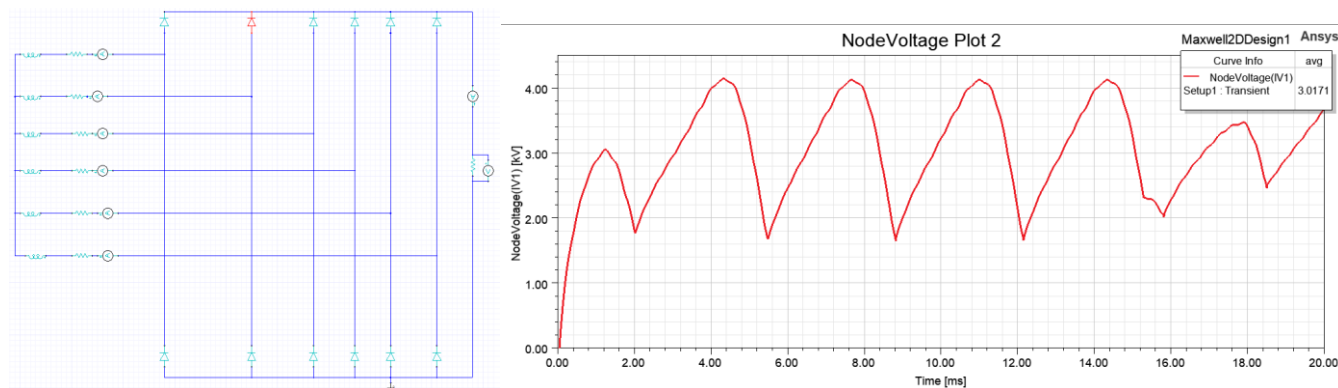


Рис.3.6.5. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода
($U_{ср}=3,07$ кВ, $\Delta U=0, 56$)

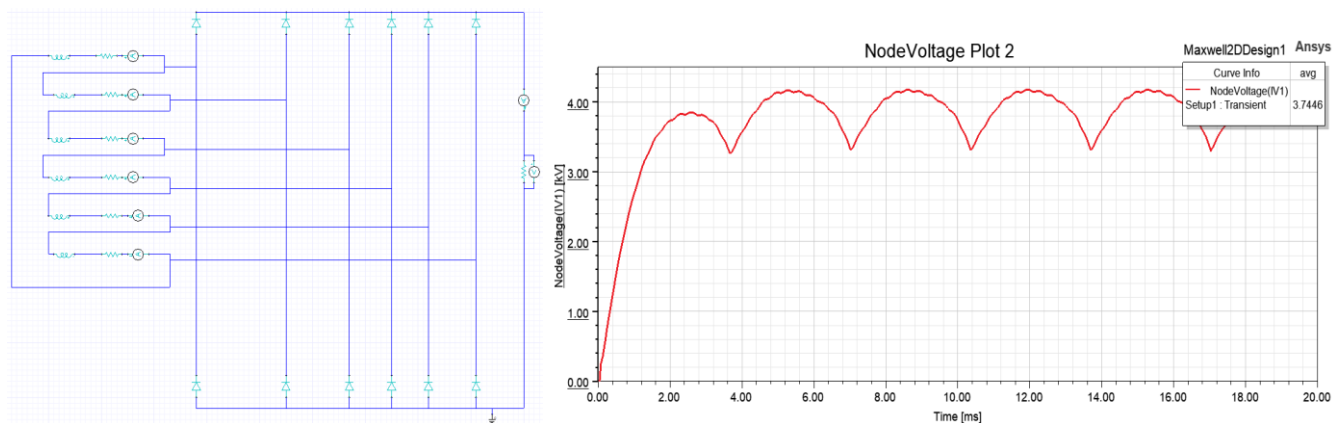


Рис.3.6.6. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{cp}=3,67$ кВ, $\Delta U=0,08$)

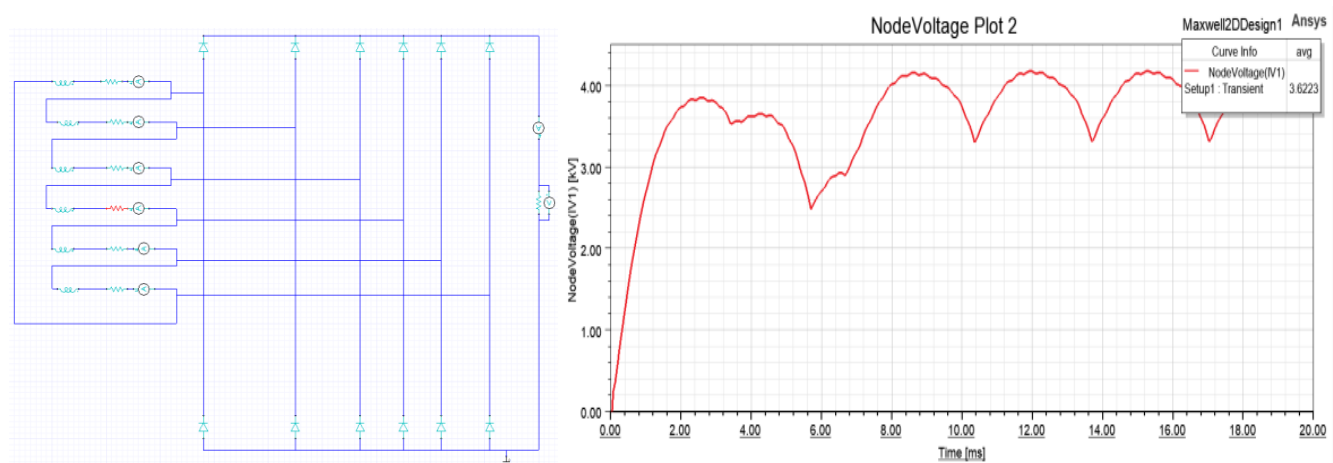


Рис.3.6.7. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{cp}=3,62$ кВ, $\Delta U=0,3$)

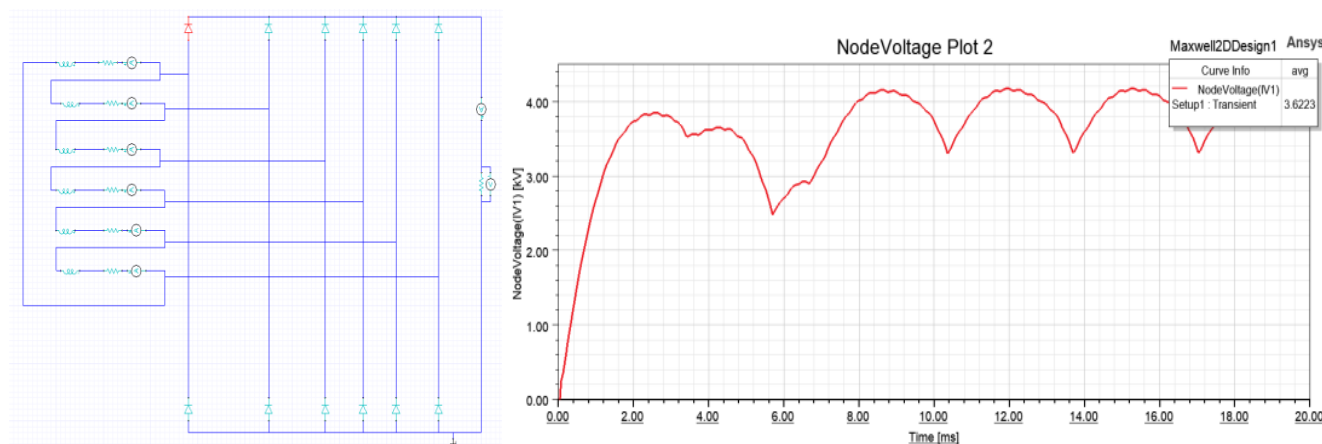


Рис.3.6.8. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{cp}=3,62$ кВ, $\Delta U=0,3$)

3.6.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель. Номинальный и аварийный режимы работы

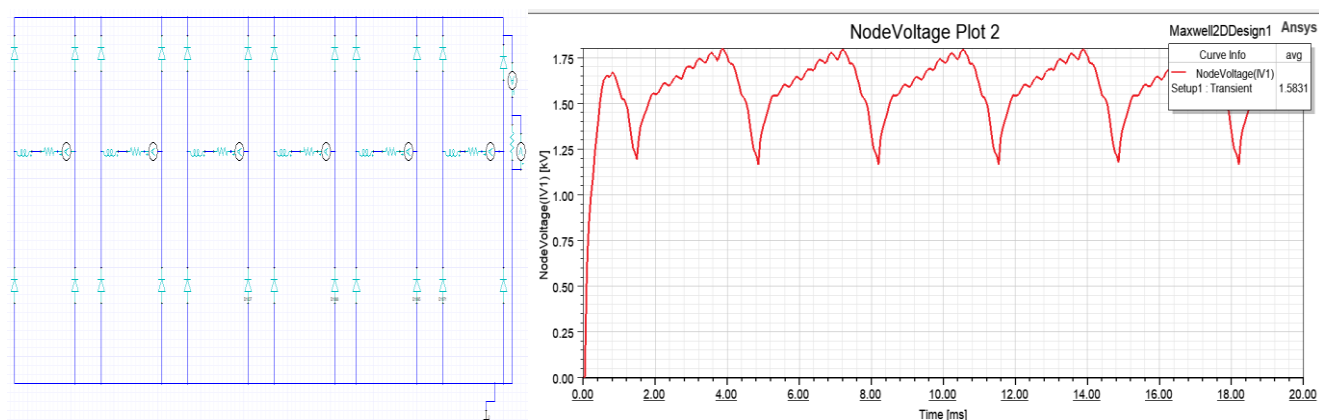


Рис.3.6.9. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{ср}=1,7\text{кВ}$, $\Delta U=0,27$)

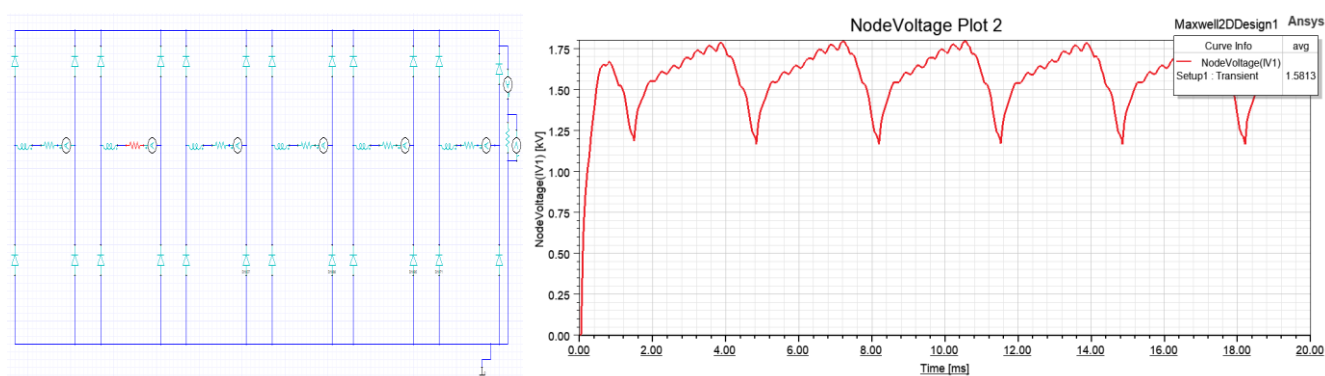


Рис.3.6.10. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{ср}=1.59\text{ кВ}$, $\Delta U=0,25$)

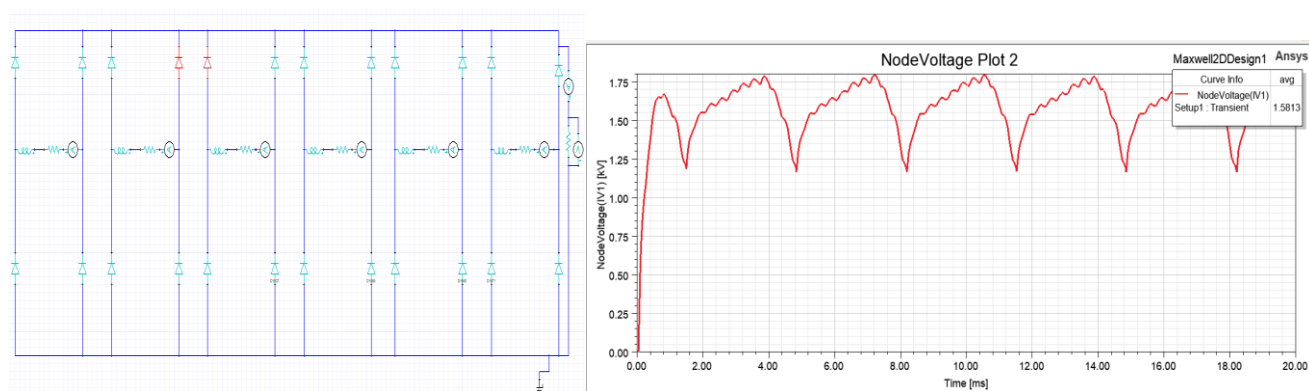


Рис.3.6.11. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{ср}=1.59\text{ кВ}$, $\Delta U=0,3$)

3.6.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно.

Номинальный и аварийный режимы работы

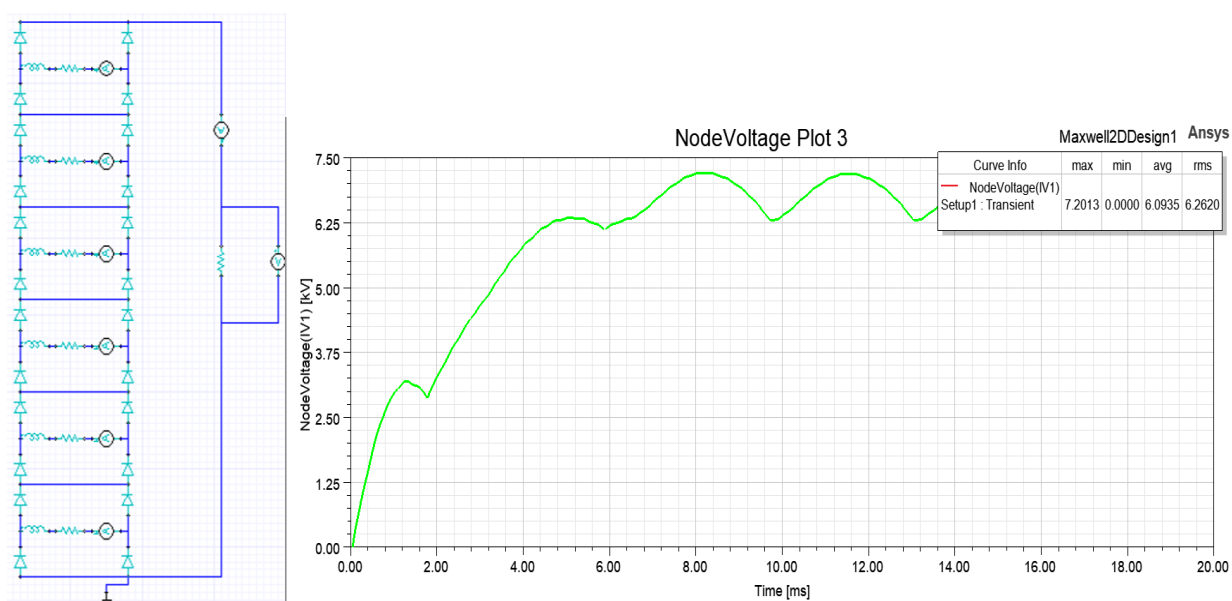


Рис.3.6.12. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно на холостом ходу
($U_{ср}=6.3$ кВ, $\Delta U=0, 02$)

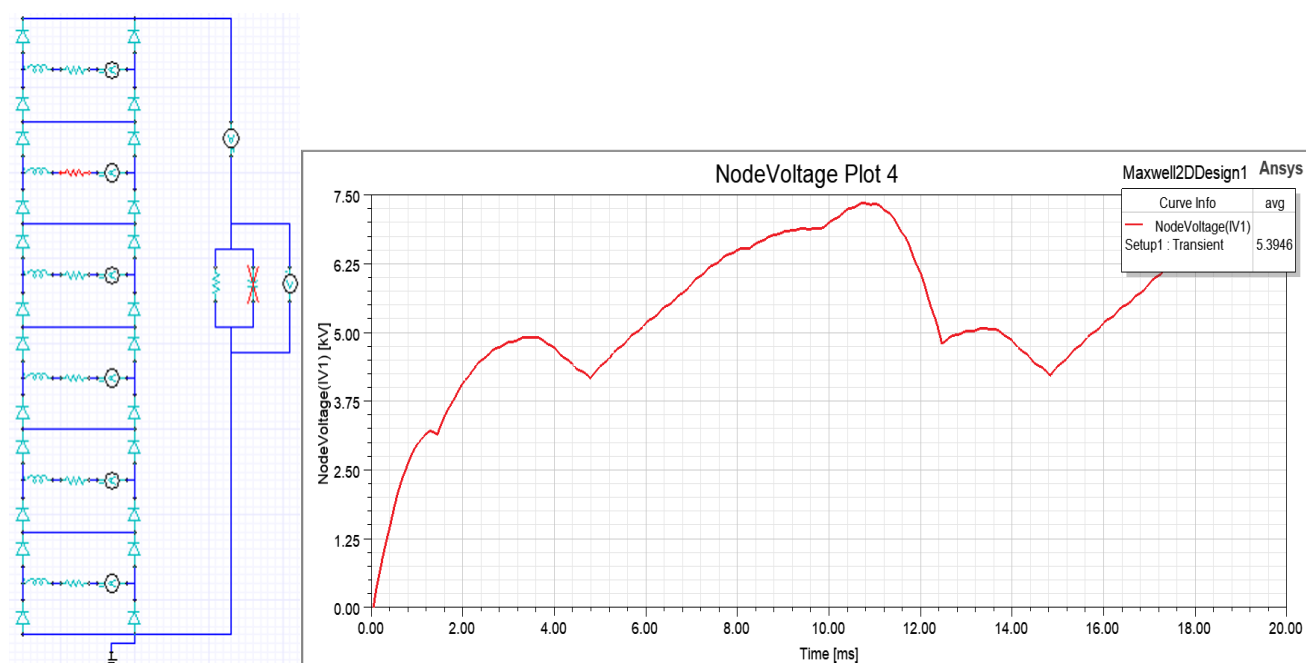


Рис.3.6.13. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы
($U_{ср}=5,39$ кВ, $\Delta U=0, 23$)

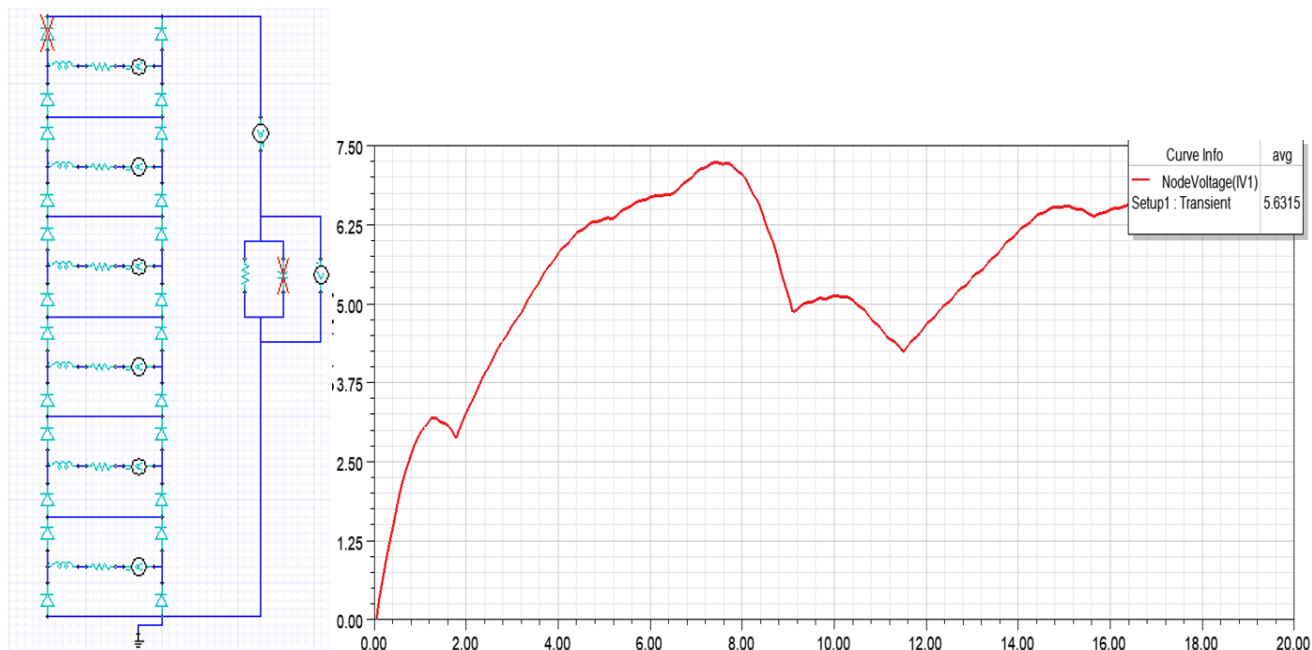


Рис.3.6.14. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода
($U_{ср}=5,63$ кВ, $\Delta U=0, 26$)

3.7. Исследование семифазного генератора и выпрямителя

3.7.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

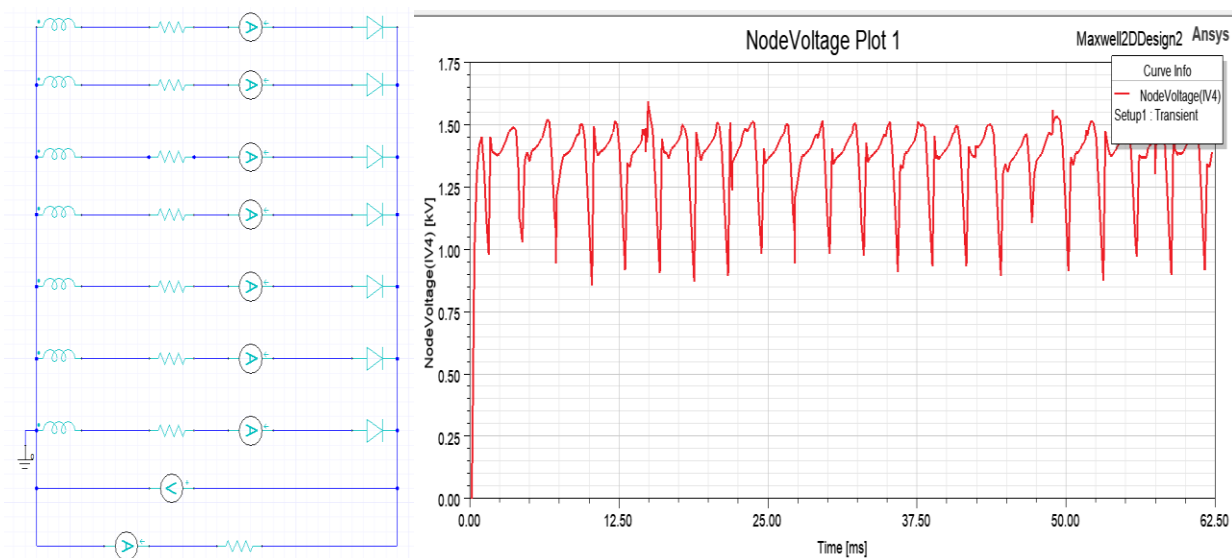


Рис.3.7.1. Схема и выпрямленное напряжение семифазного однополупериодного выпрямления при работе на холостом ходу
($U_{ср}=1,25$ кВ, $\Delta U=0, 27$)

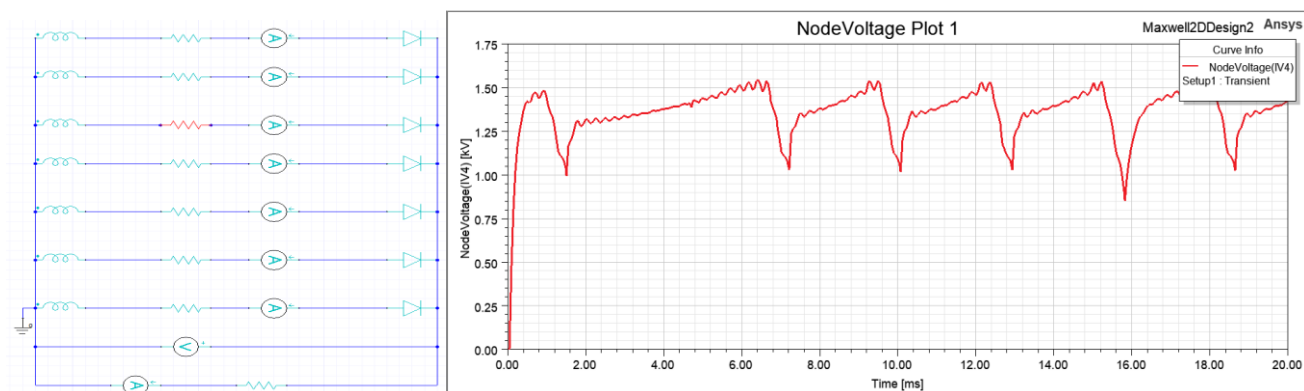


Рис.3.7.2. Схема и выпрямленное напряжение семифазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки
($U_{ср}=1.3$ кВ, $\Delta U=0.4$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.7.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы. Результаты цифрового тестирования представлены на рис.

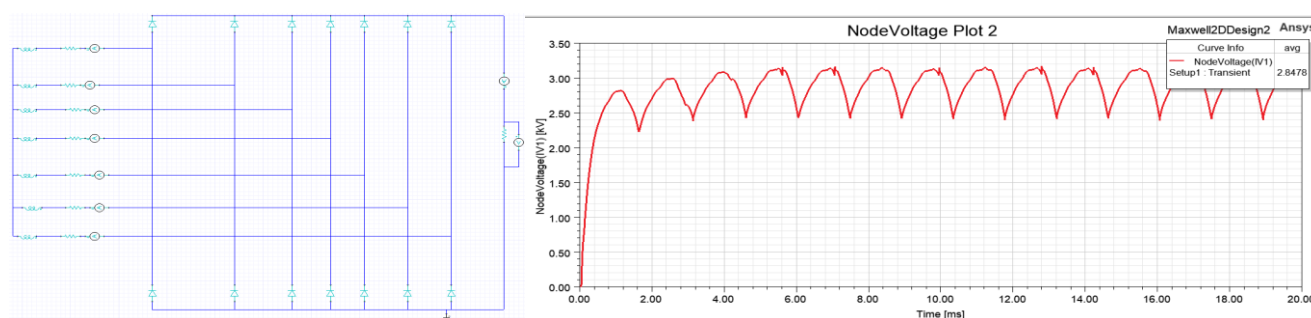


Рис.3.7.3. Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе
($U_{ср}=2,5$ кВ, $\Delta U=0,12$)

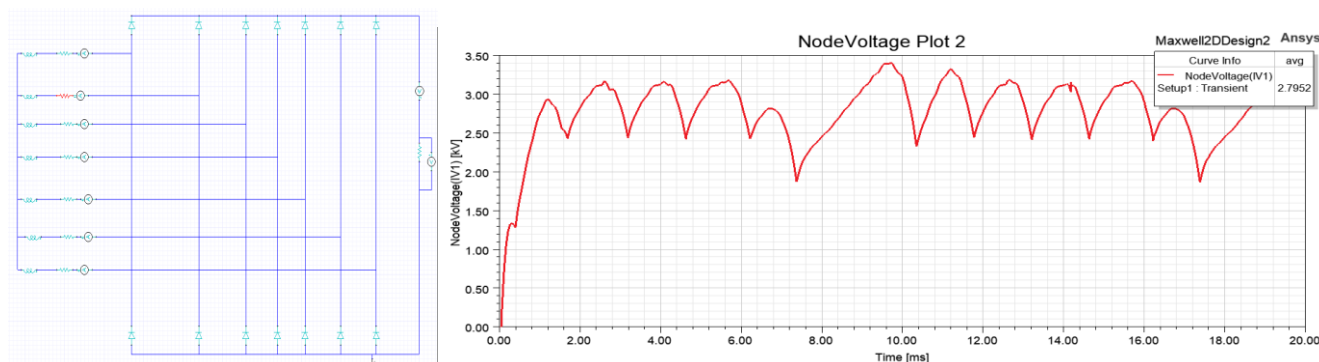


Рис.3.7.4. Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы
($U_{ср}=2,1$ кВ, $\Delta U=0,4$)

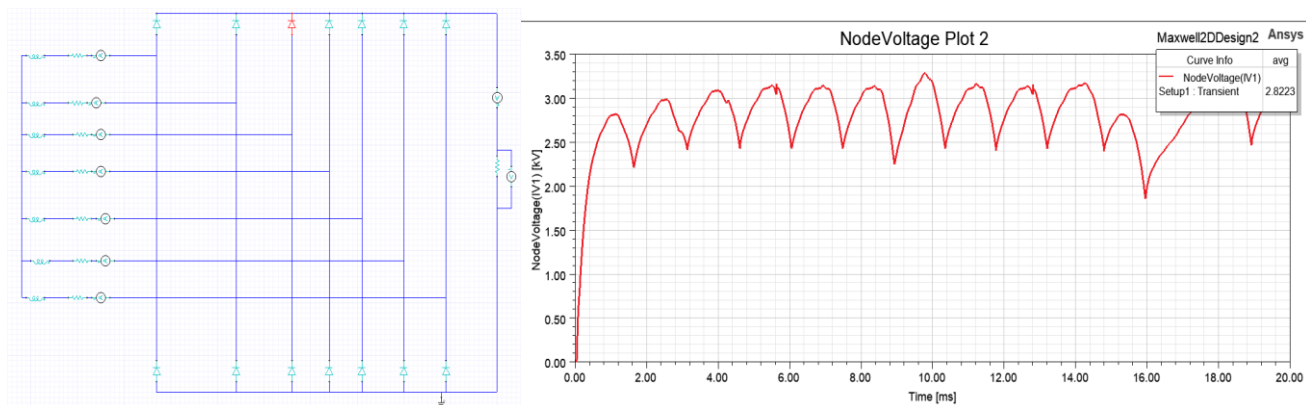


Рис.3.7.5. Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода
($U_{cp}=2,82$ кВ, $\Delta U=0,5$)

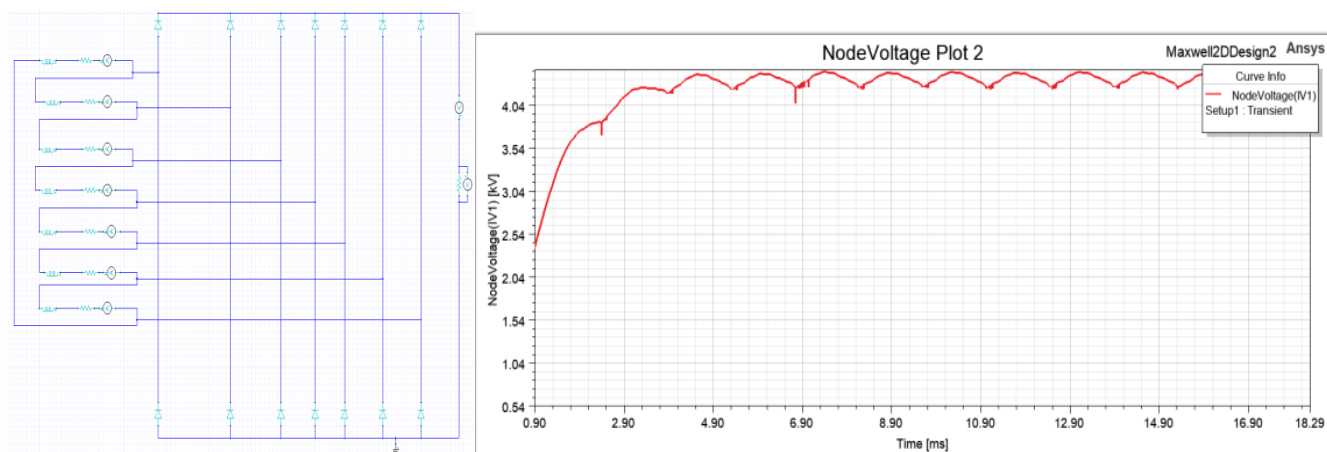


Рис.3.7.6. Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{cp}=3,8$ кВ, $\Delta U=0,05$)

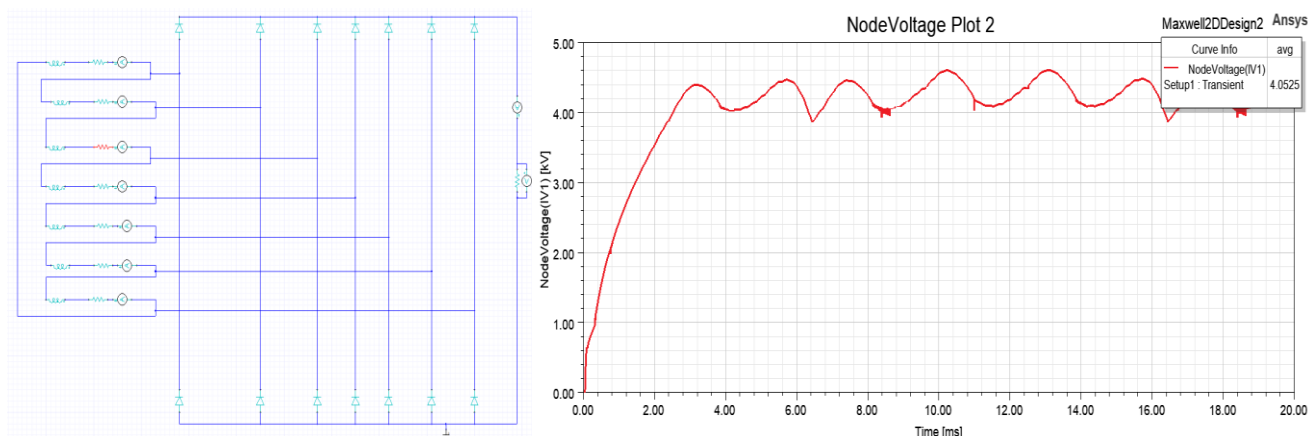


Рис.3.7.7. Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{cp}=3.7$ кВ, $\Delta U=0,25$)

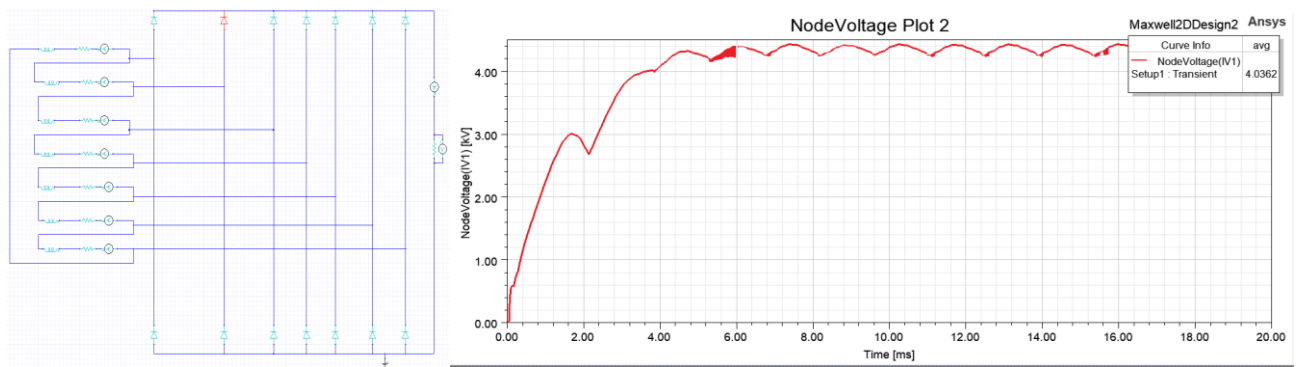


Рис.3.7.8 Схема и выпрямленное напряжение семифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{cp}=4,03$ кВ, $\Delta U=0,21$)

3.7.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель.
Номинальный и аварийный режимы работы

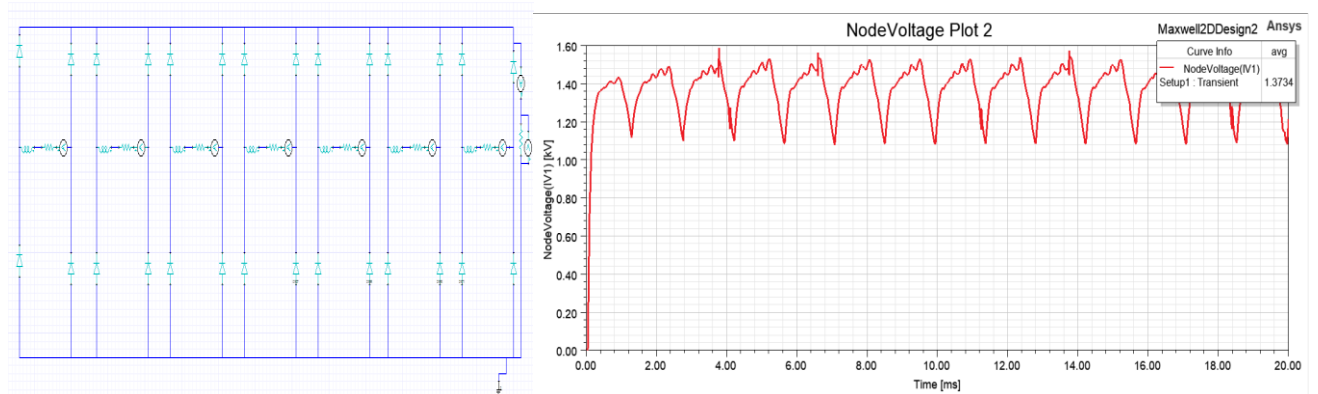


Рис.3.7.9. Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{cp}=1.4$ кВ, $\Delta U=0,23$)

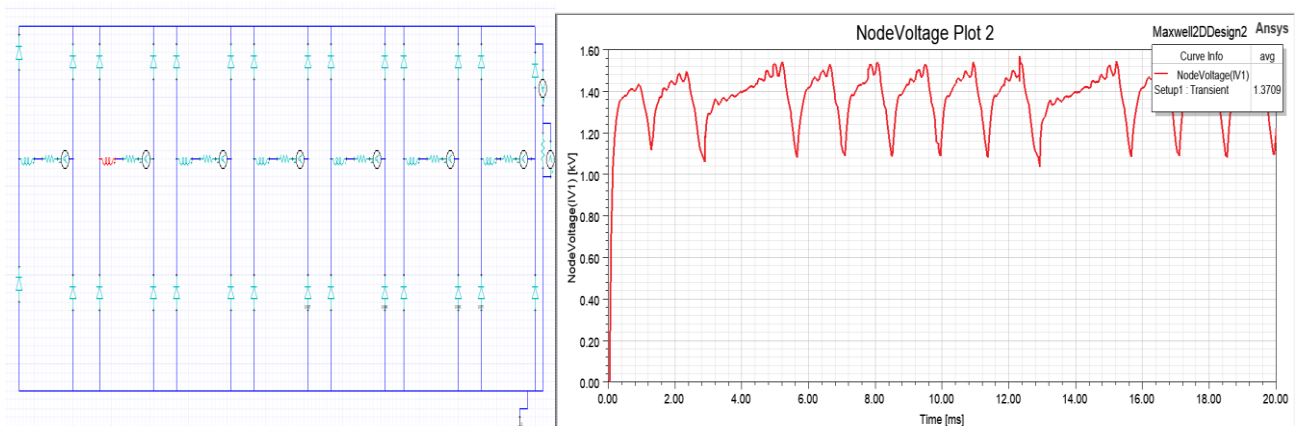


Рис.3.7.10. Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{cp}=1,37$ кВ, $\Delta U=0,23$)

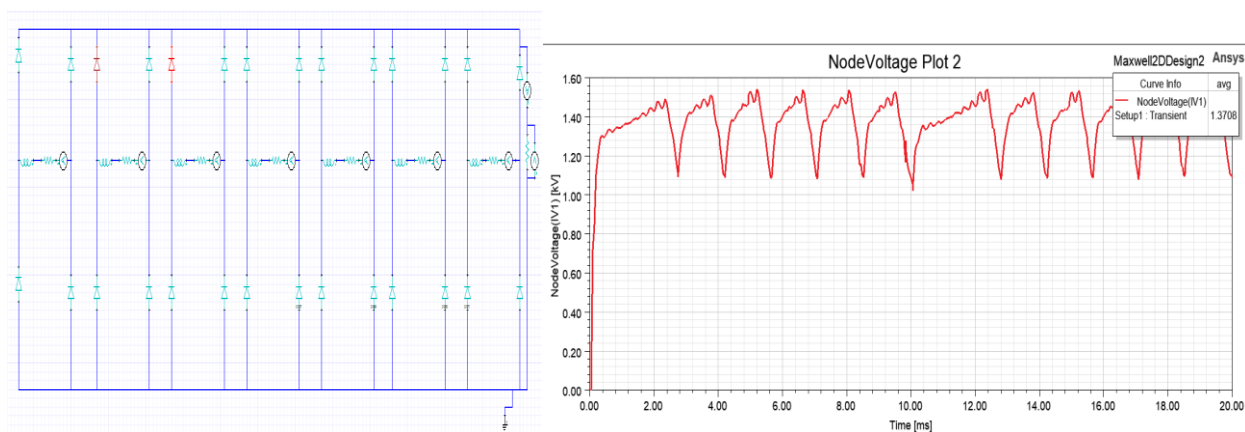


Рис.3.7.11. Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{cp}=1,37\text{кВ}$, $\Delta U=0,25$)

3.7.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно. Номинальный и аварийный режимы работы

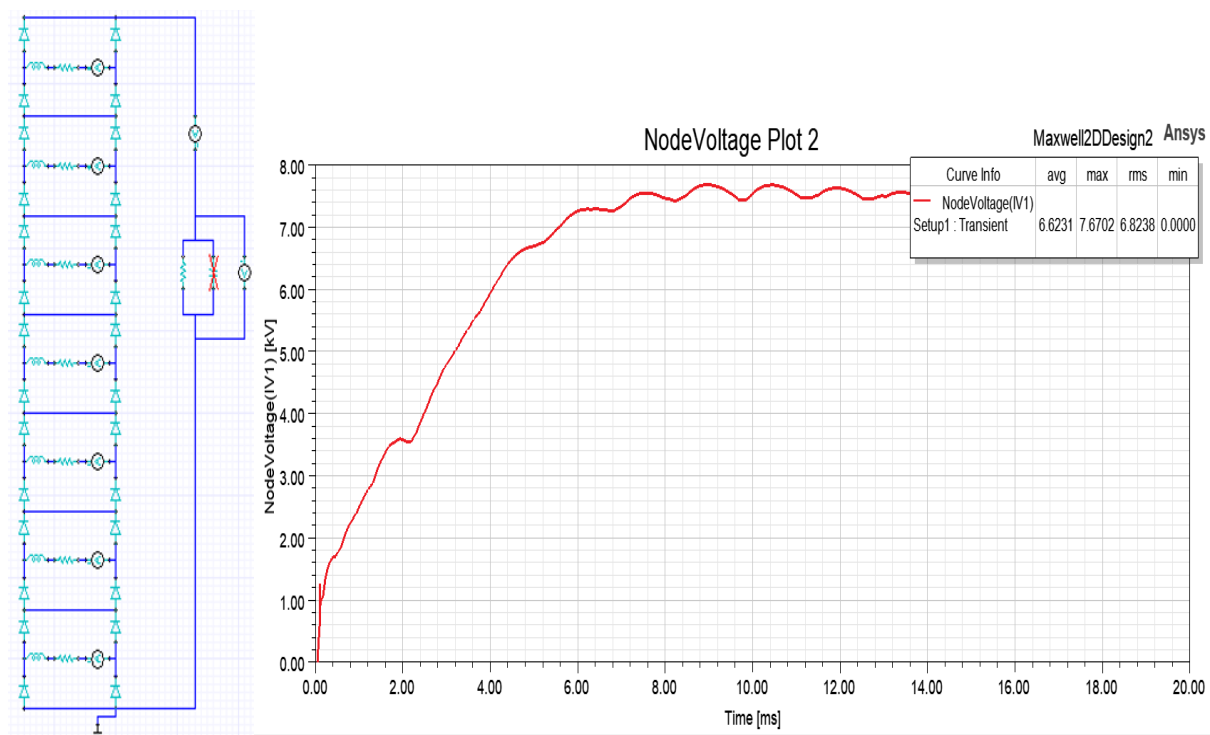


Рис.3.7.12 Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно на холостом ходу
($U_{cp}=6,4\text{кВ}$, $\Delta U=0,017$)

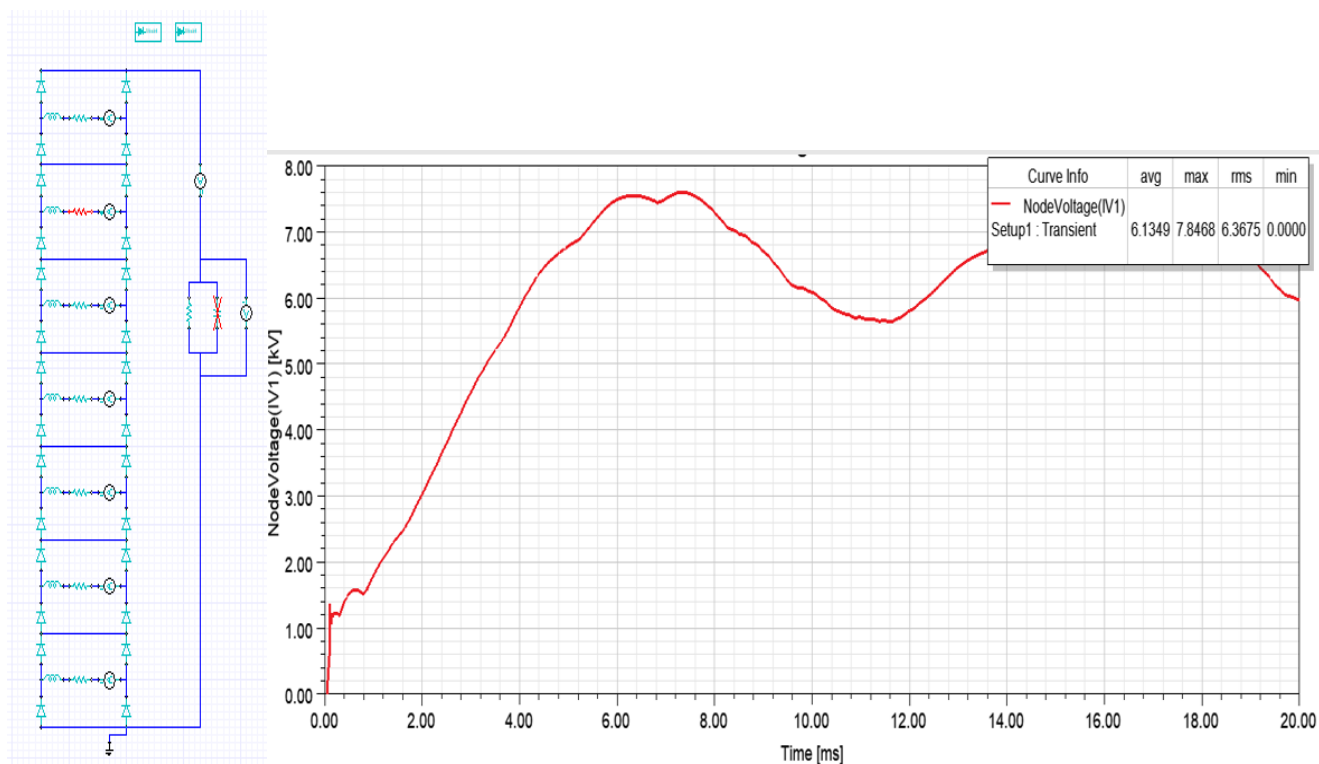


Рис.3.7.13. Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы ($U_{ср}=5,5$ кВ, $\Delta U=0,2$)

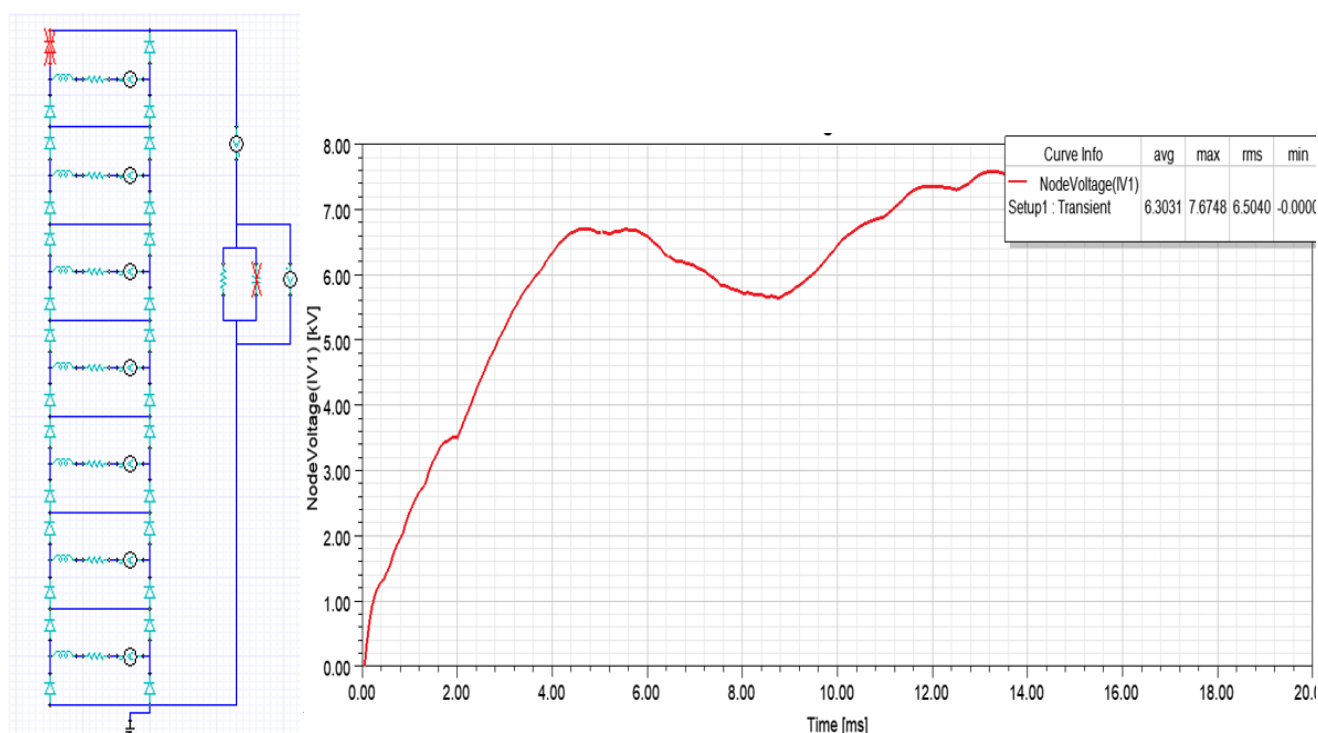


Рис.3.7.14. Схема и выпрямленное напряжение семифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода ($U_{ср}=6,0$ кВ, $\Delta U=0,18$)

3.8. Исследование восьмифазного генератора и выпрямителя

3.8.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

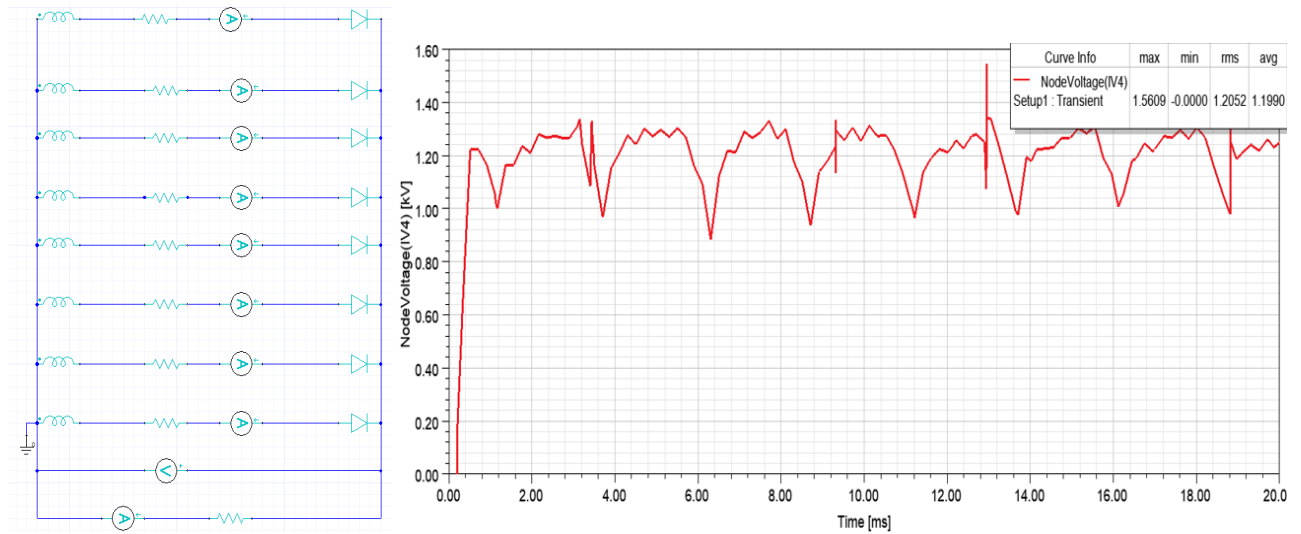


Рис.3.8.1. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного однополупериодного выпрямления при работе на холостом ходу
(основные показатели: $U_{ср}=1,19$ кВ, $\Delta U=0,23$)

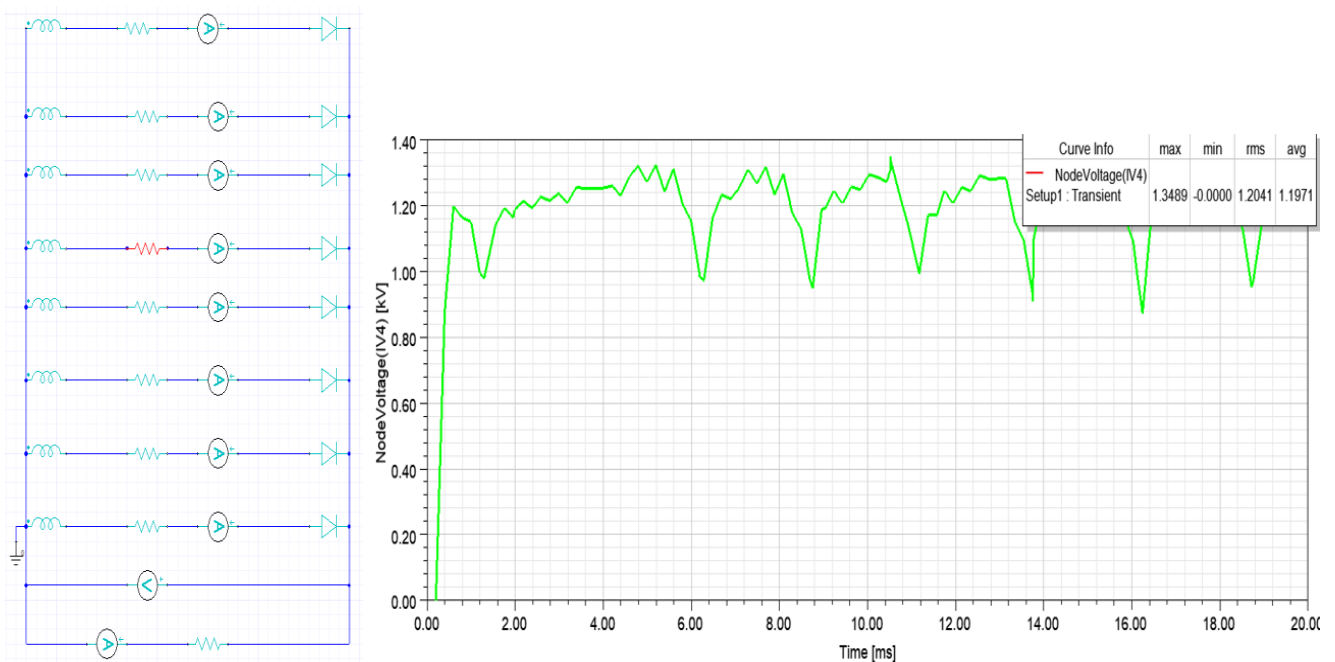


Рис.3.8.2. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки
($U_{ср}=1,19$ кВ, $\Delta U=0,3$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.8.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

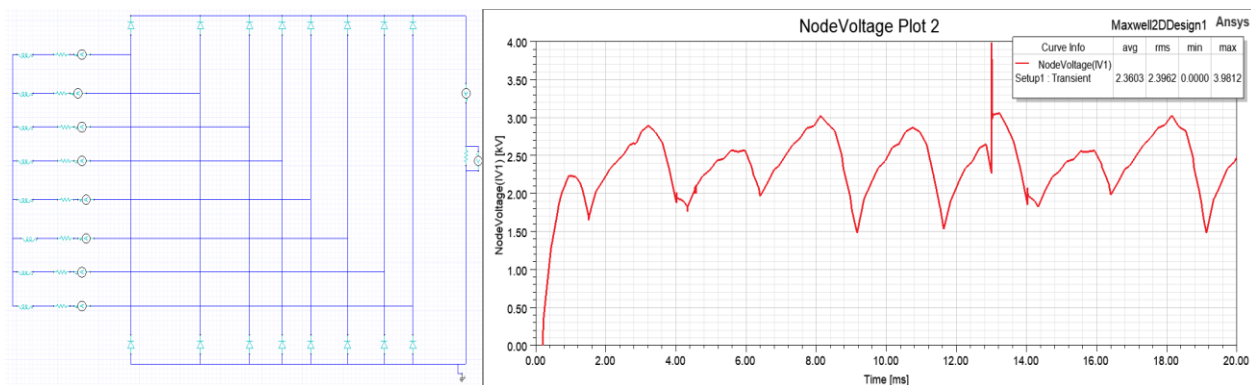


Рис.3.8.3. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе ($U_{ср}=2,0$ кВ, $\Delta U=0,12$)

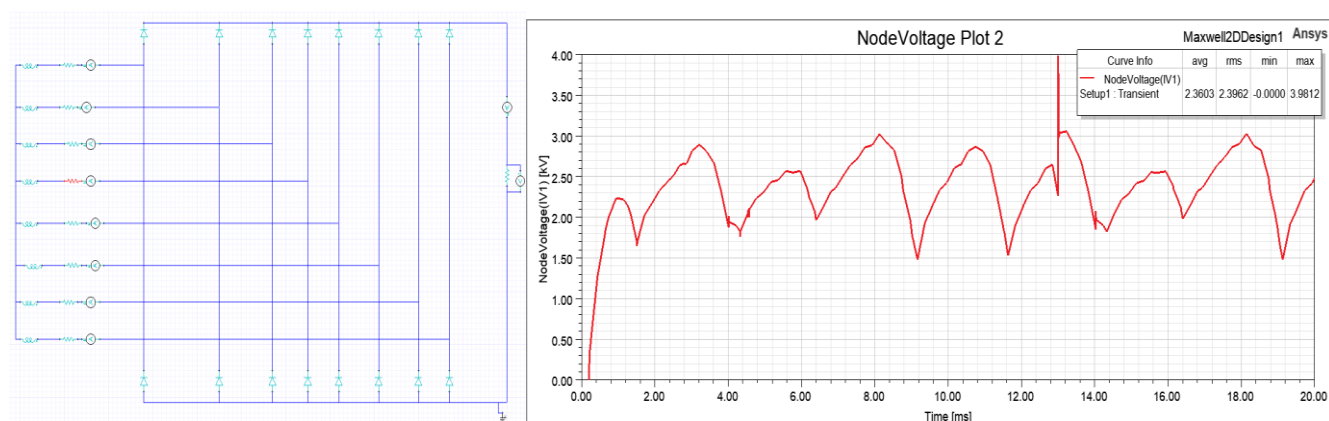


Рис.3.8.4. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы ($U_{ср}=1,5$ кВ, $\Delta U=0,3$)

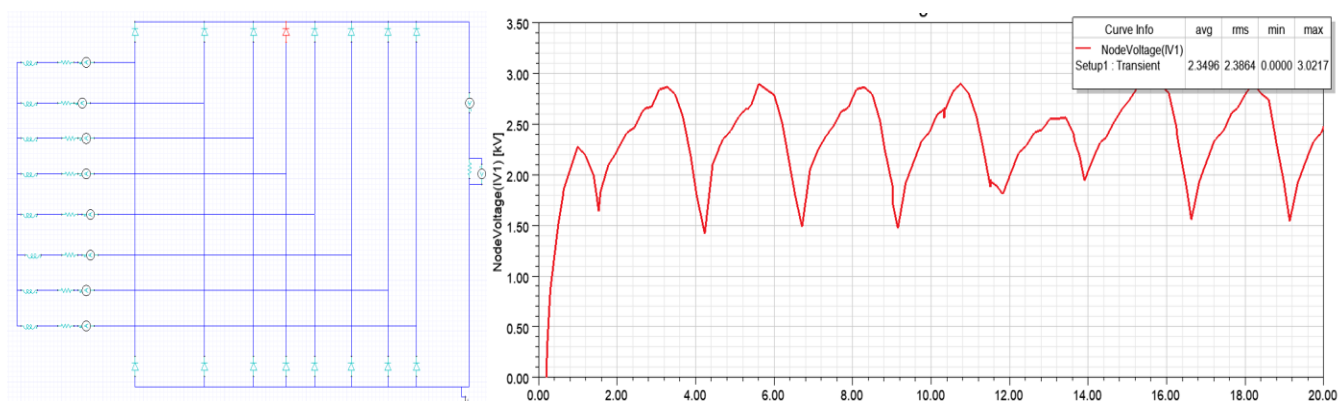


Рис.3.8.5. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода ($U_{ср}=2,34$ кВ, $\Delta U=0,34$)

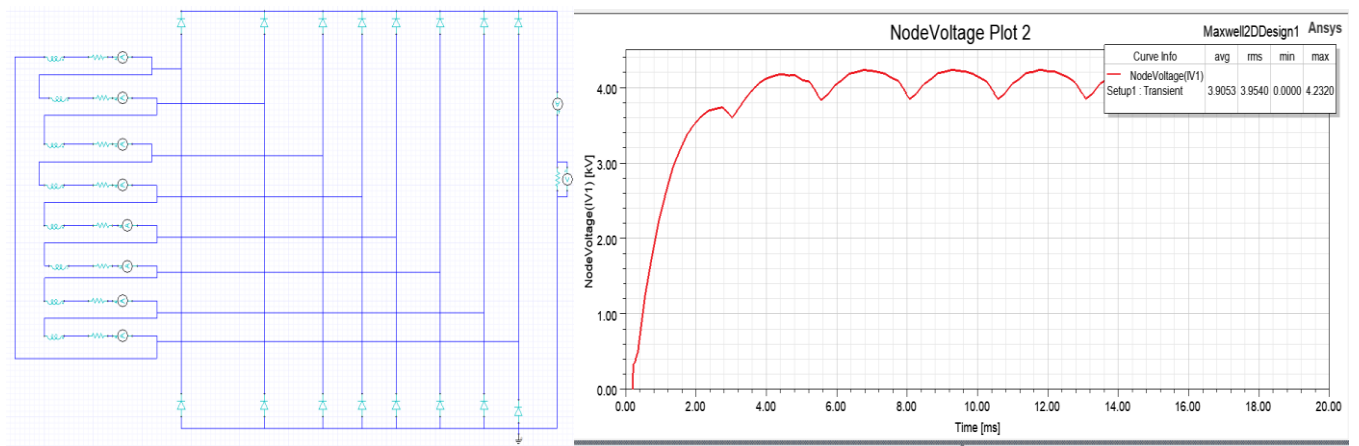


Рис.3.8.6. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{ср}=3,9$ кВ, $\Delta U=0,05$)

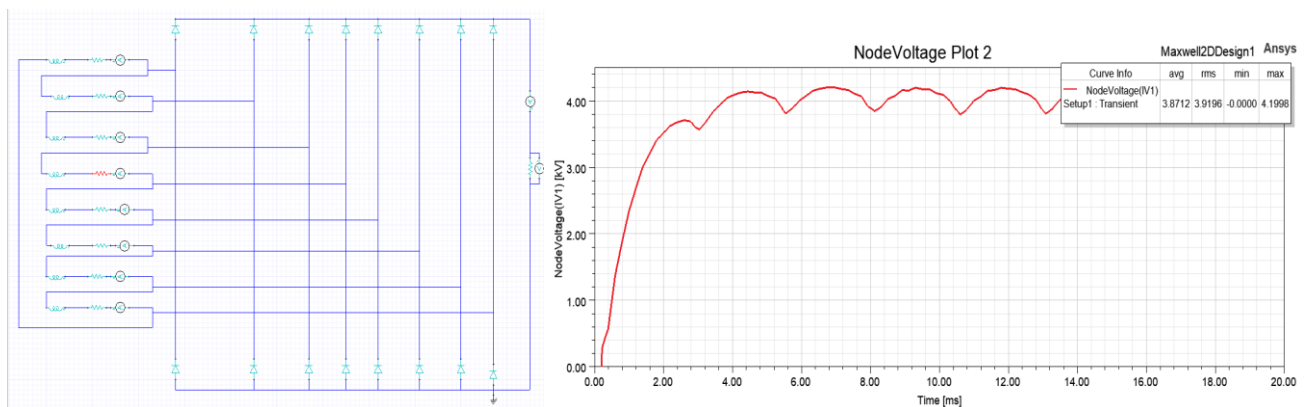


Рис.3.8.7. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{ср}=3,87$ кВ, $\Delta U=0,23$)

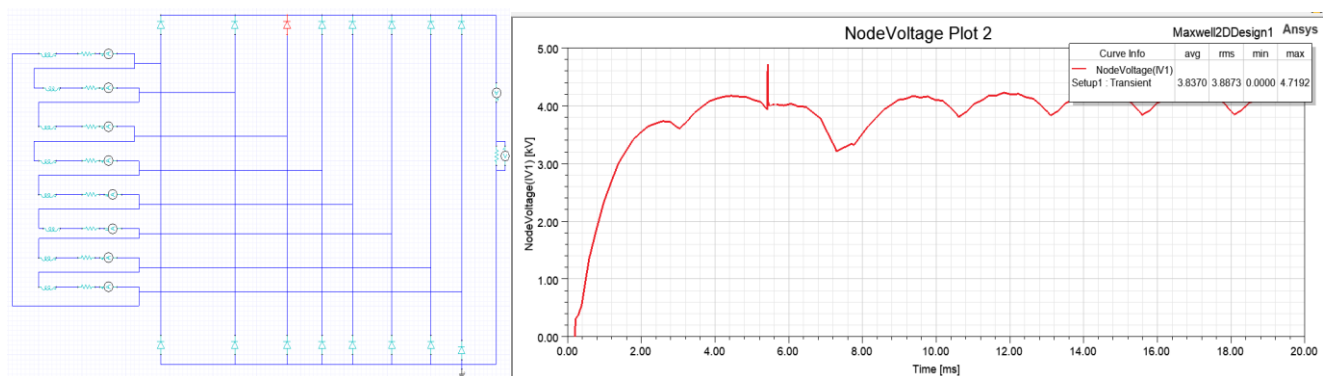


Рис.3.8.8. Схема и выпрямленное напряжение шестифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{ср}=3,83$ кВ, $\Delta U=0,2$)

3.8.9. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель.

Номинальный и аварийный режимы работы

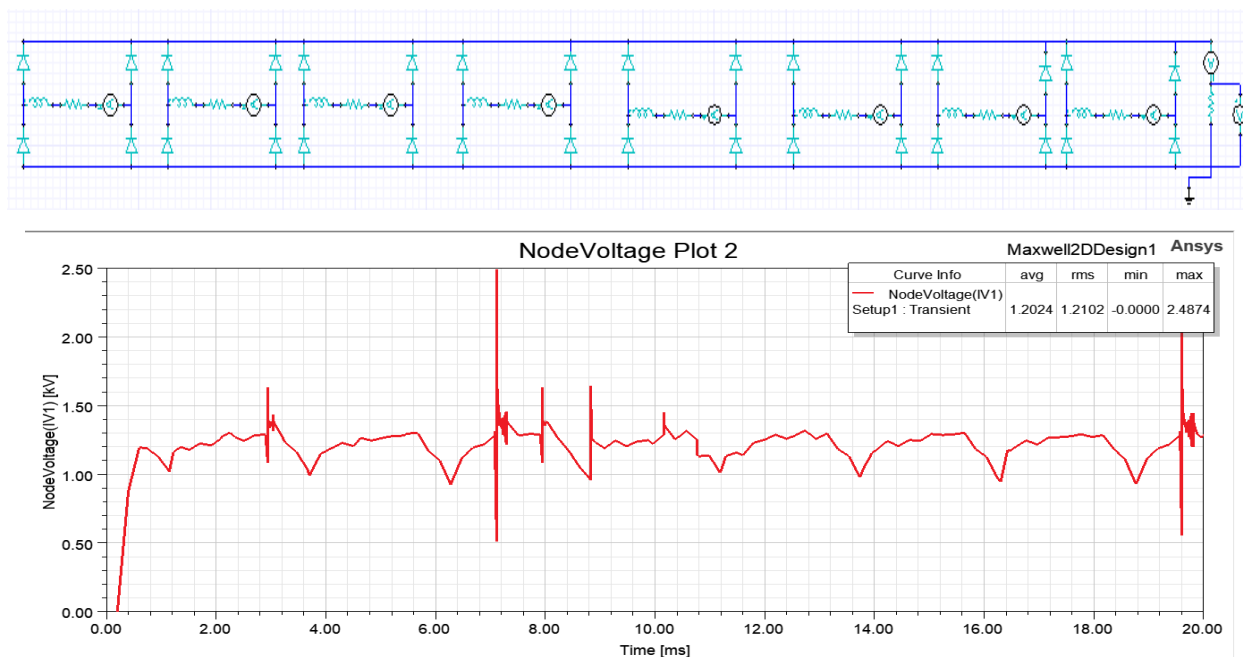


Рис.3.8.9. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу ($U_{ср}=1,3\text{кВ}$, $\Delta U=0,2$)

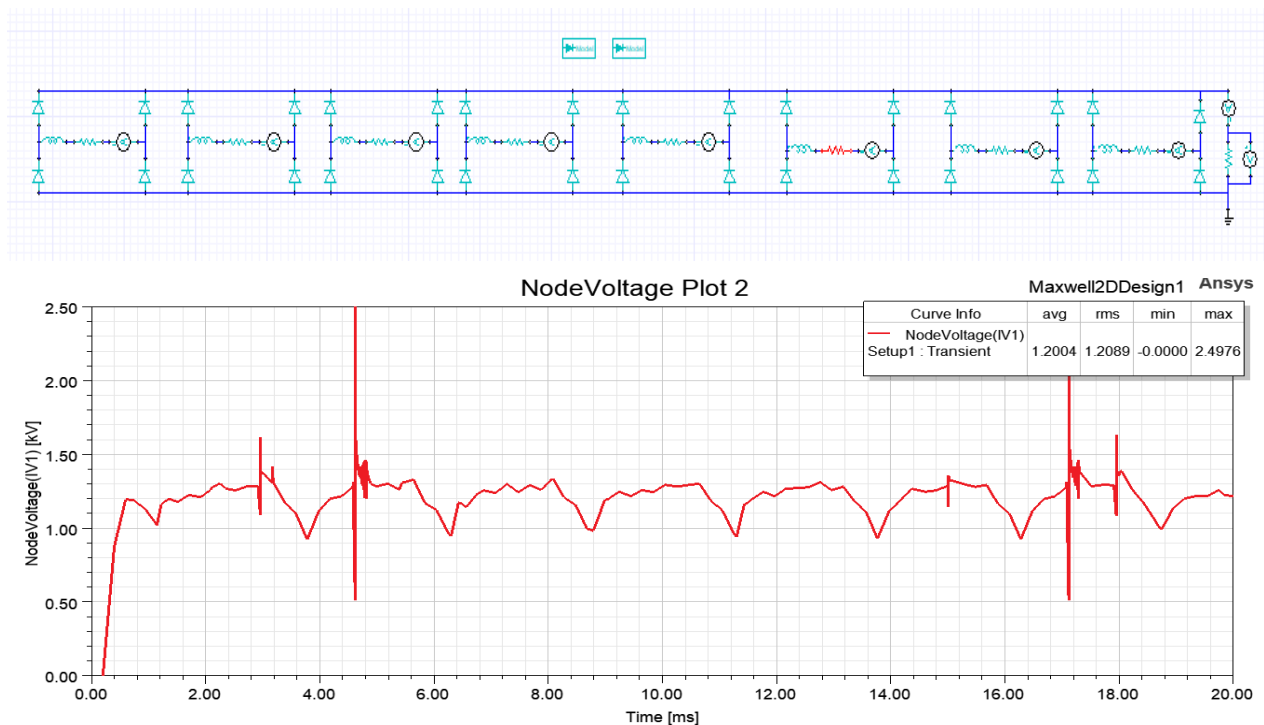


Рис.3.8.10. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы ($U_{ср}=1,2\text{ кВ}$, $\Delta U=0,22$)

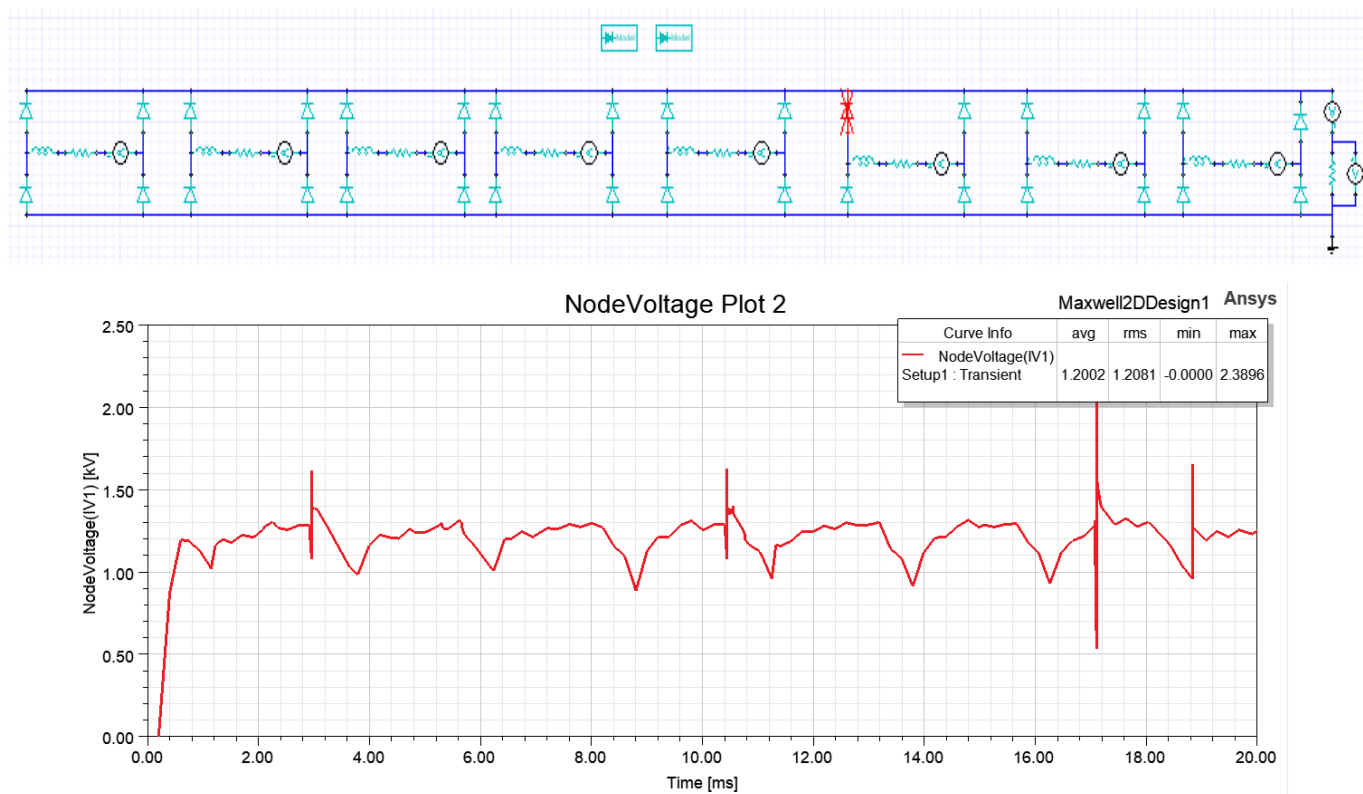


Рис.3.8.11. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода ($U_{cp}=1,2\text{кВ}$, $\Delta U=0,2$)

3.8.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно. Номинальный и аварийный режимы работы

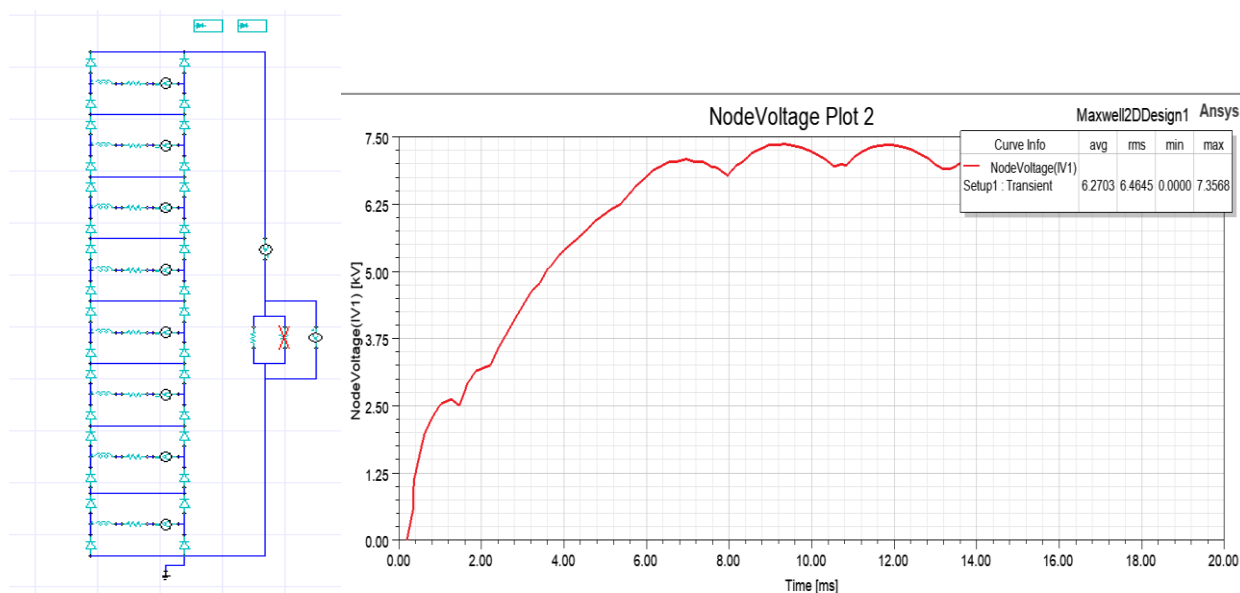


Рис.3.8.12. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно на холостом ходу ($U_{cp}=6,5\text{кВ}$. $\Delta U=0,015$)

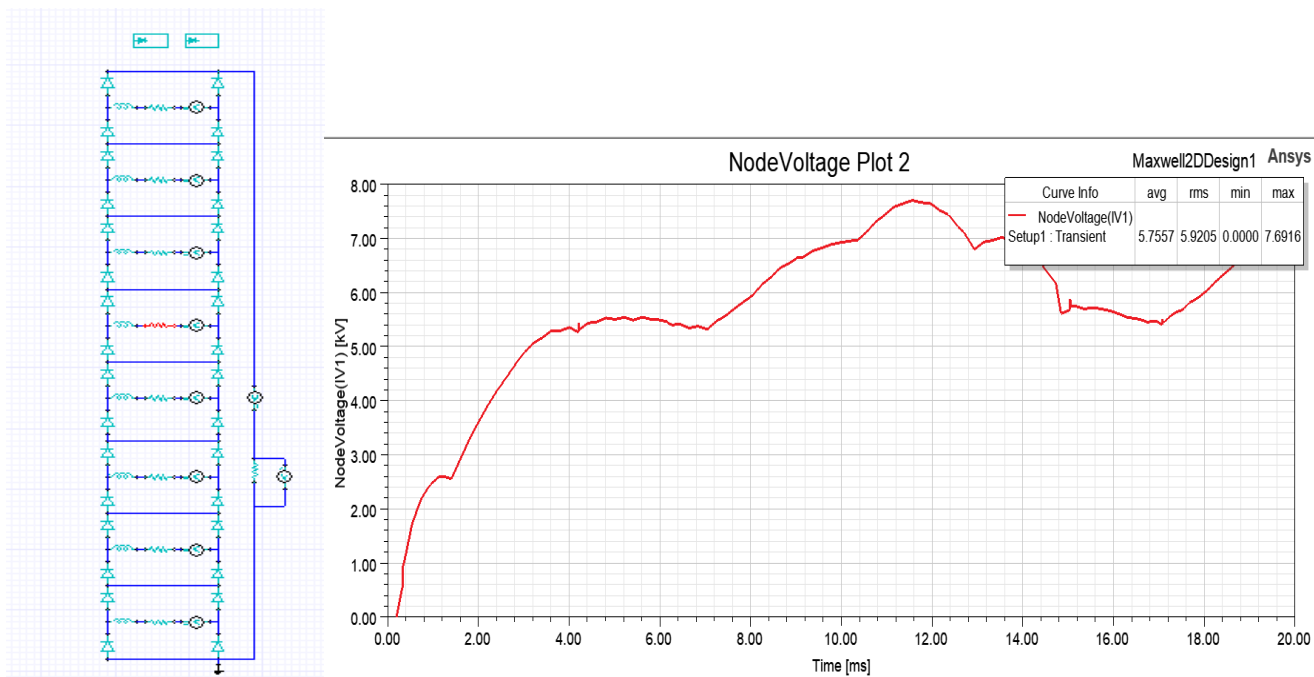


Рис.3.8.13. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы
($U_{ср}=5,75$ кВ, $\Delta U=0,17$)

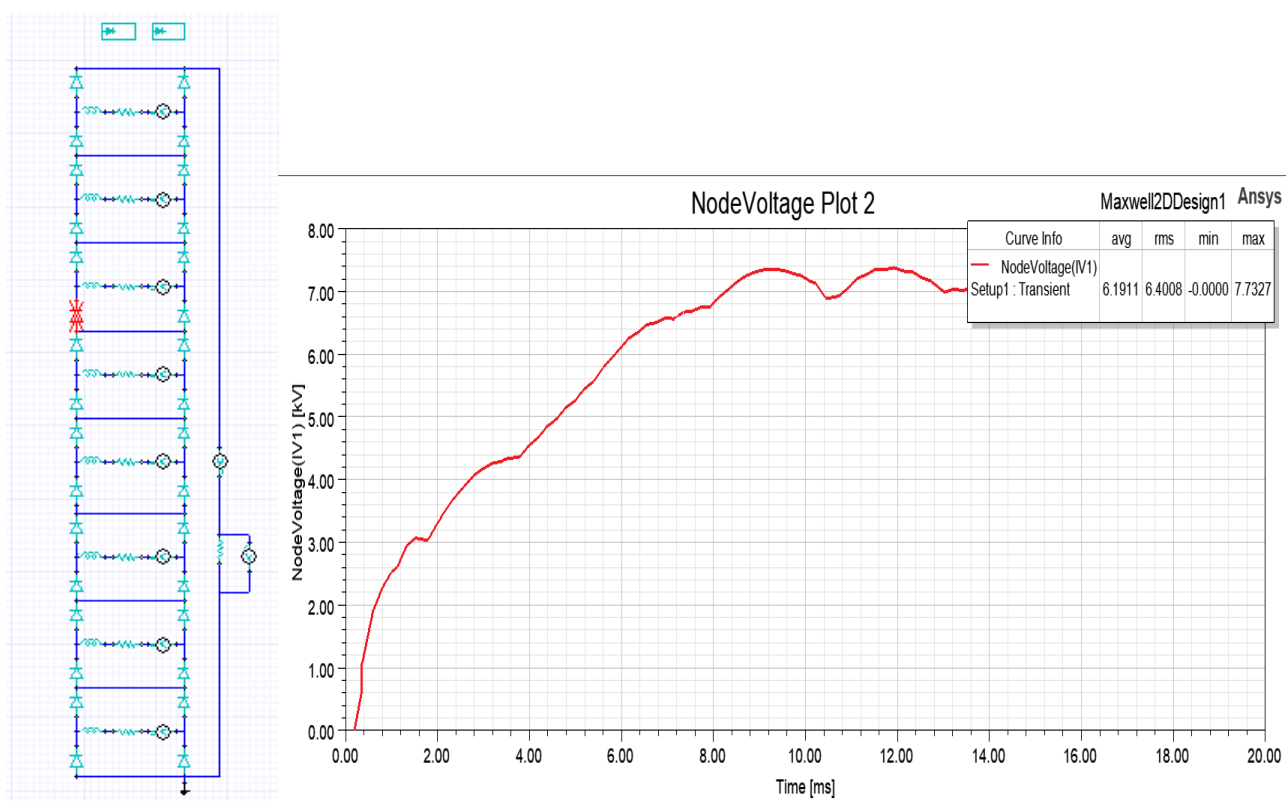


Рис.3.8.14. Схема и выпрямленное напряжение восьмифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода
($U_{ср}=6,19$ кВ, $\Delta U=0,1$)

3.9. Исследование девятифазного генератора и выпрямителя

3.9.1. Однополупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

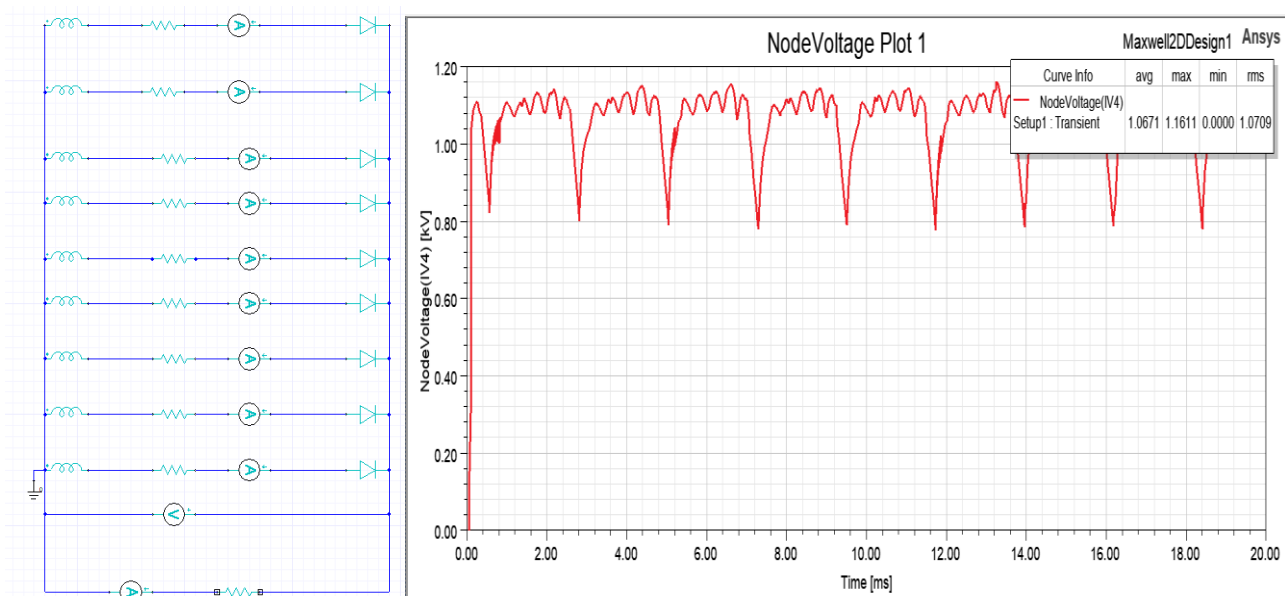


Рис.3.9.1. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного однополупериодного выпрямления при работе на холостом ходу (основные показатели: $U_{ср}=1,06$ кВ, $\Delta U=0,19$)

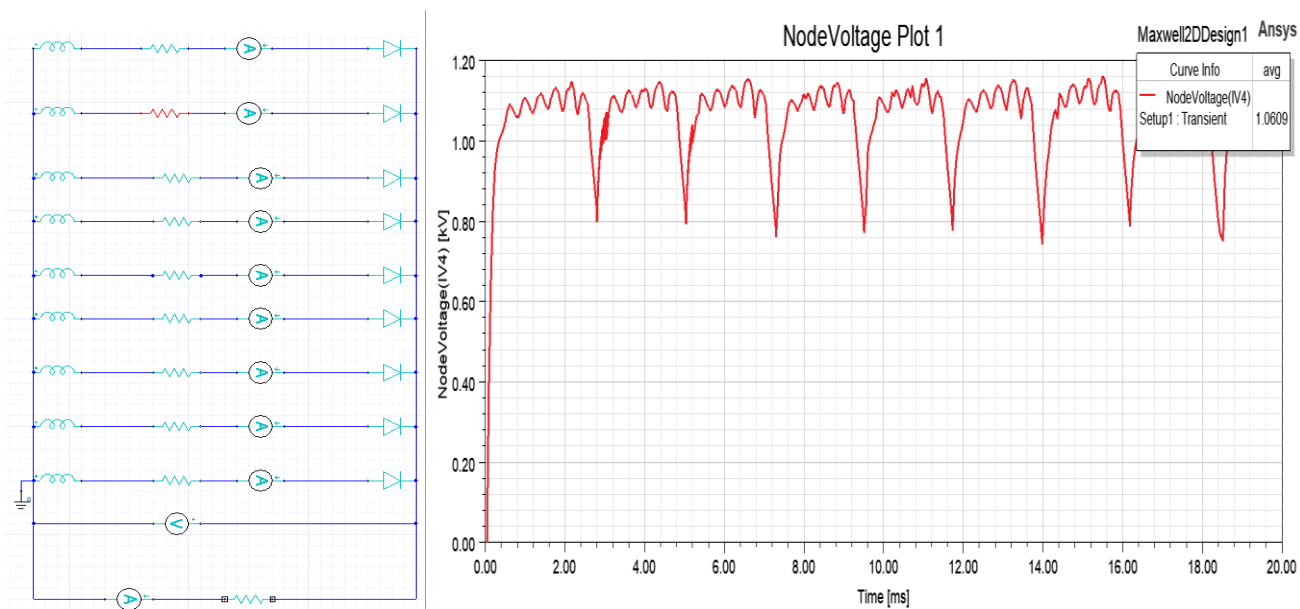


Рис.3.9.2. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного однополупериодного выпрямления при обрыве одной фазы обмотки ($U_{ср}=1,06$ кВ, $\Delta U=0,22$)

Очевидно, что для этой схемы при обрыве диода мы получим аналогичные кривые.

3.9.2. Двухполупериодное выпрямление. Номинальный и аварийный режимы работы

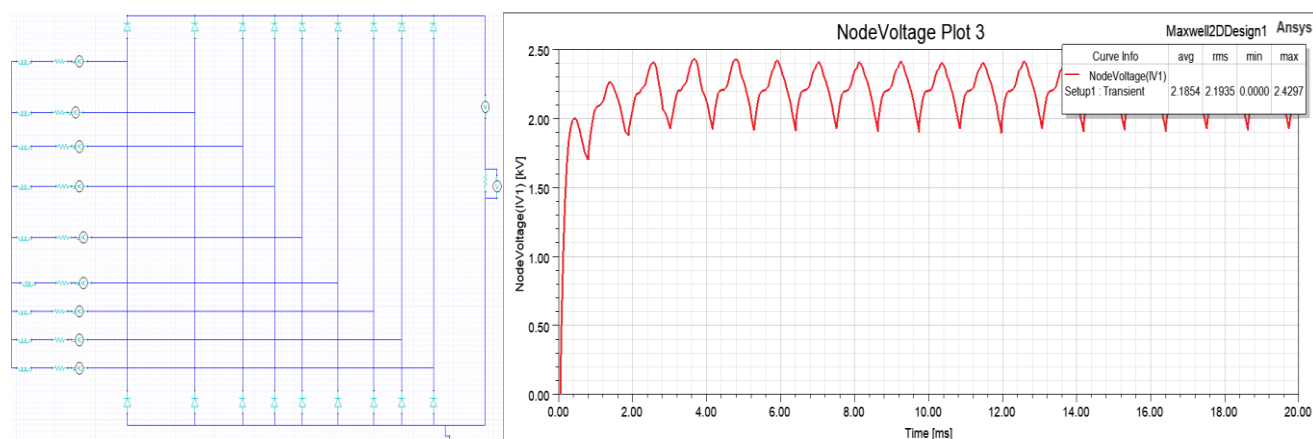


Рис.3.9.3. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и холостом ходе (**1.18 кВ, $\Delta U=0,12$**)

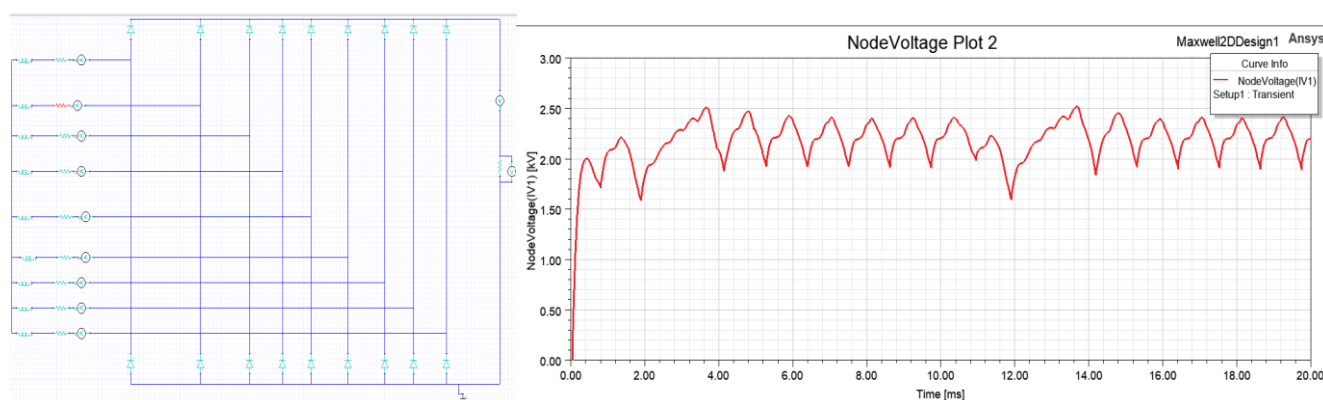


Рис.3.9.4. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве одной фазы (**$U_{ср}=1,15$ кВ, $\Delta U=0, 22$**)

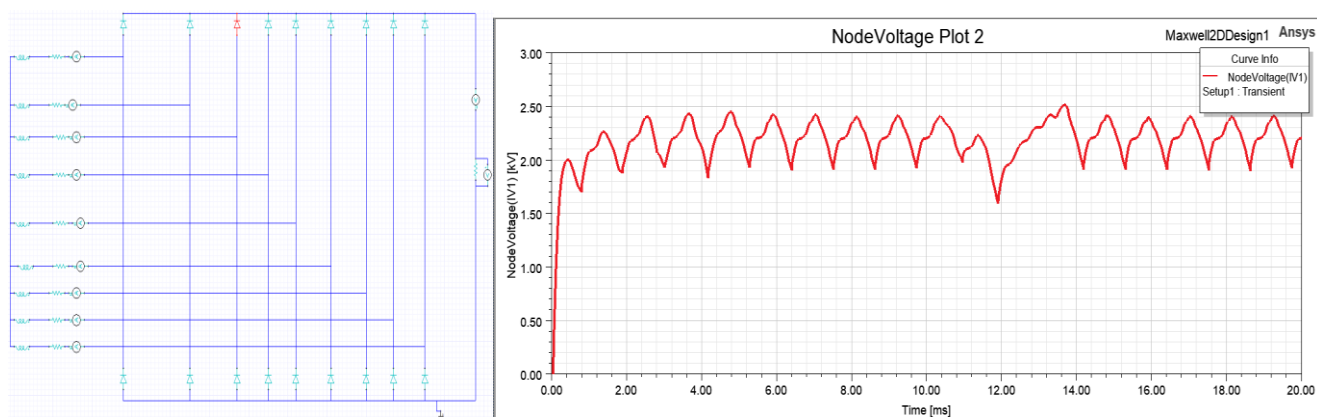


Рис.3.9.5. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в звезду и обрыве диода (**$U_{ср}=2,06$ кВ. $\Delta U=0, 22$**)

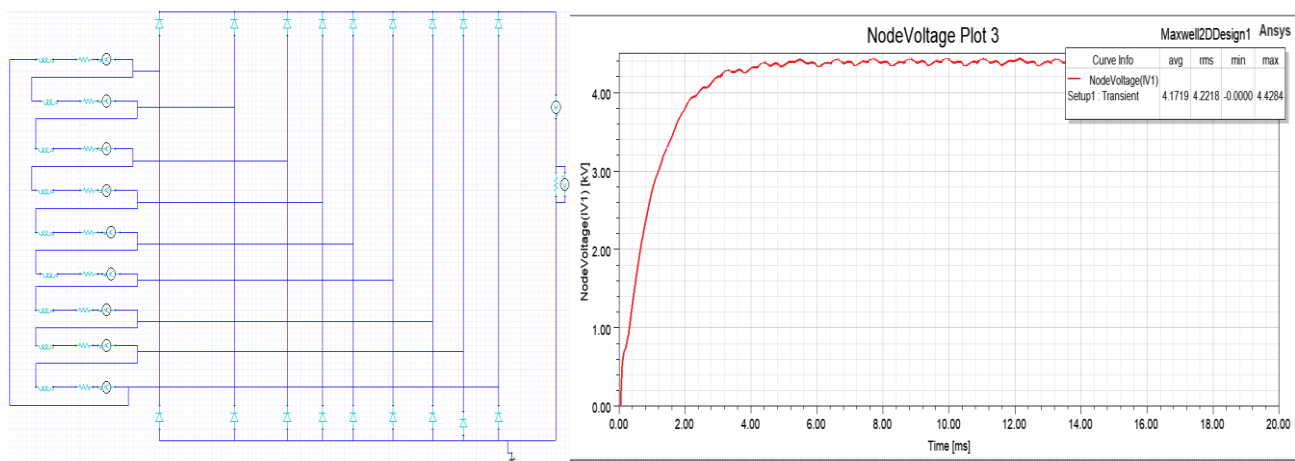


Рис.3.9.6. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и холостом ходе
($U_{ср}=4,17$ кВ, $\Delta U=0,03$)

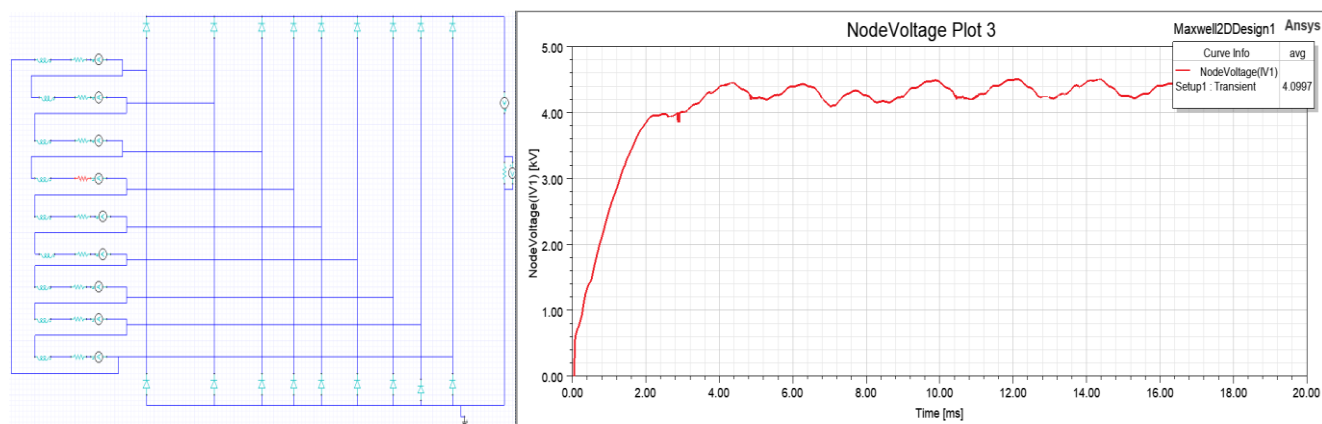


Рис.3.9.7. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве одной фазы
($U_{ср}=4,09$ кВ, $\Delta U=0,2$)

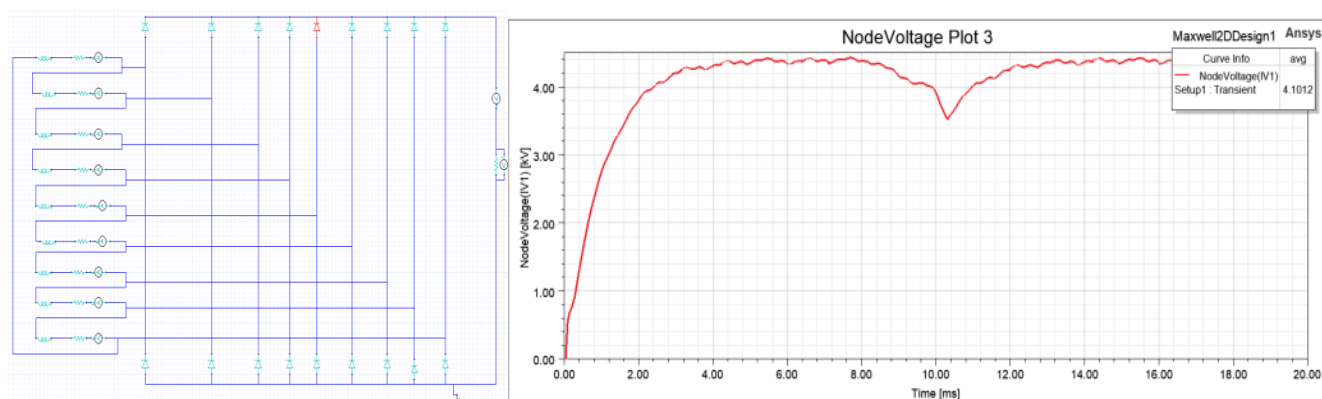


Рис.3.9.8. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного двухполупериодного выпрямления при соединении фаз в кольцо и обрыве диода
($U_{ср}=4,1$ кВ, $\Delta U=0,2$)

3.9.3. Полномостовое выпрямление при соединении мостов в параллель.

Номинальный и аварийный режимы работы

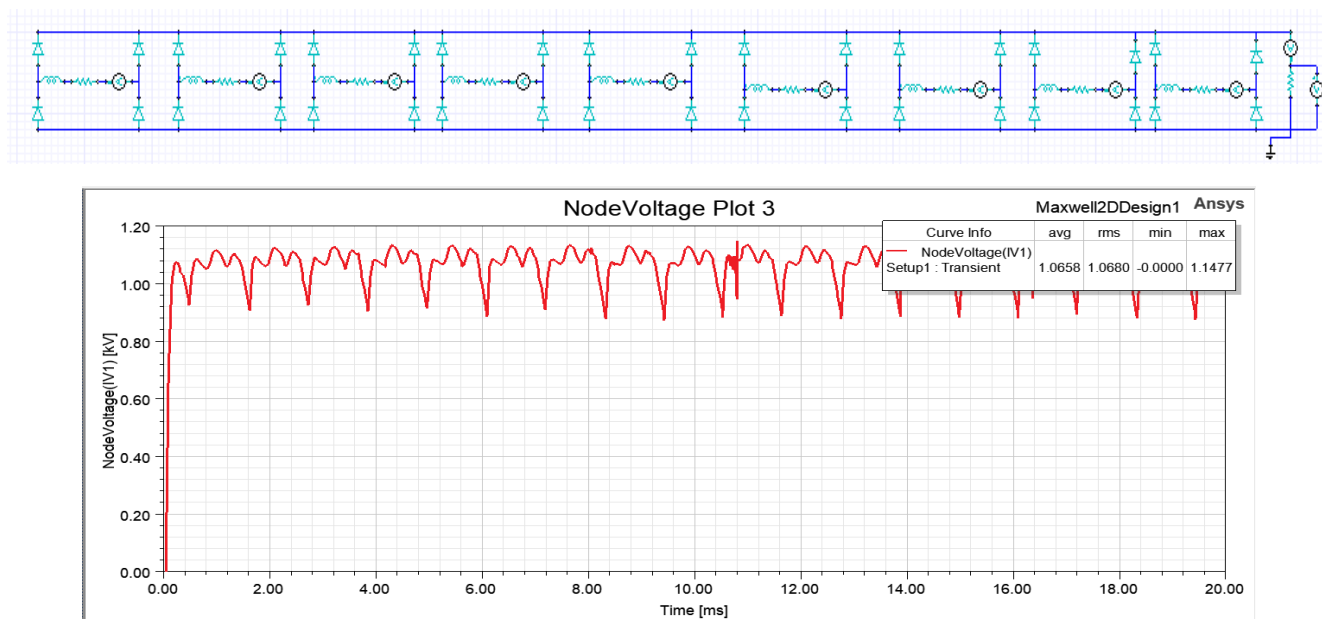


Рис.3.9.9. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель на холостом ходу
($U_{ср}=1,1\text{кВ}$, $\Delta U=0,17$)

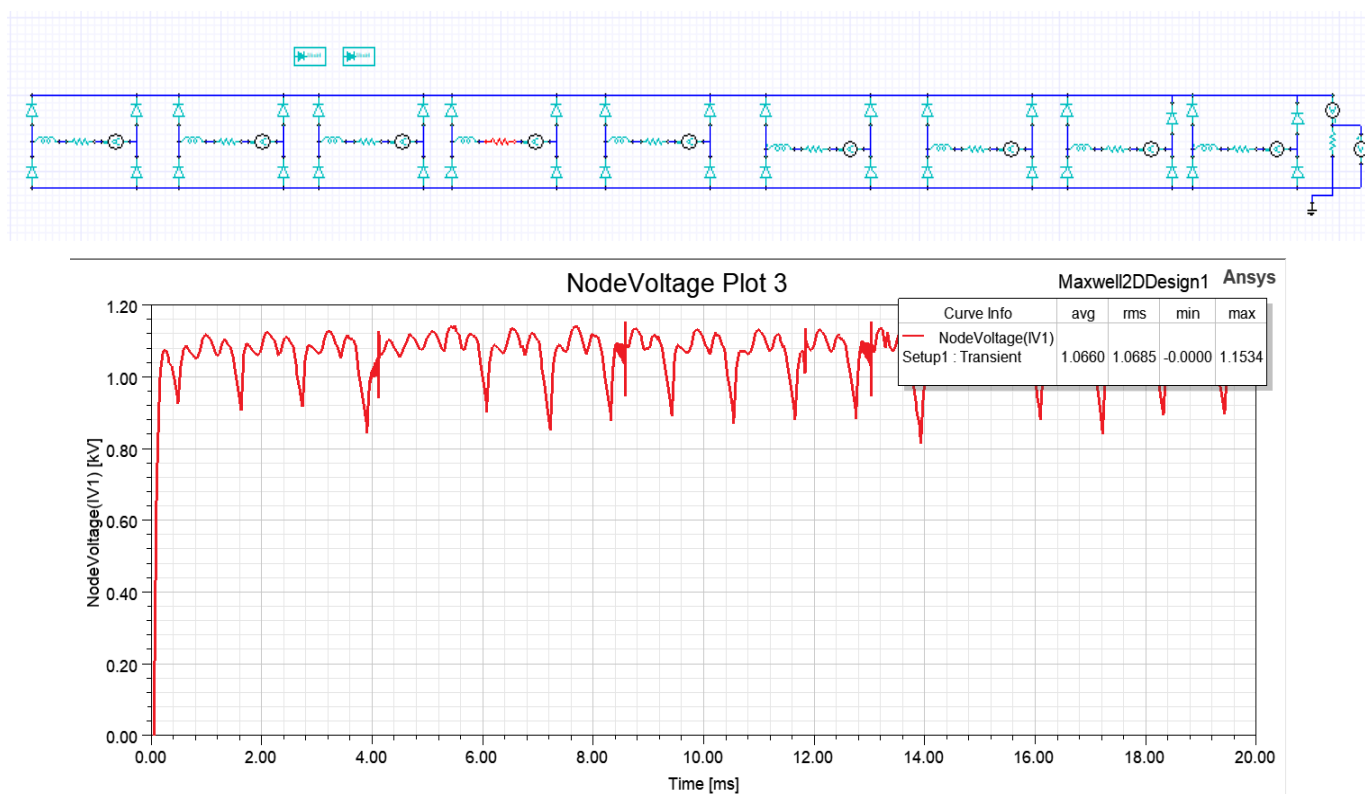


Рис.3.9.10. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве одной фазы
($U_{ср}=1,066\text{кВ}$, $\Delta U=0,2$)



Рис.3.9.11. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов в параллель при обрыве диода
($U_{cp}=1,065\text{кВ}$, $\Delta U=0, 2$)

3.9.4. Полномостовое выпрямление при соединении мостов последовательно.
Номинальный и аварийный режимы работы

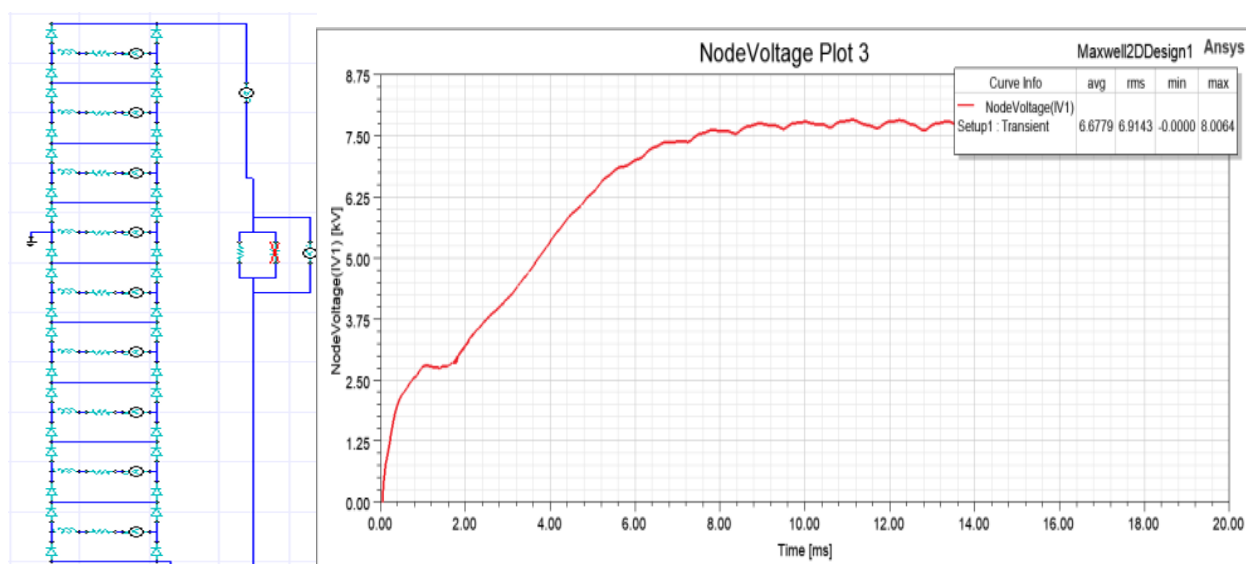


Рис.3.9.12. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно на холостом ходу
($U_{cp}=6,67\text{кВ}$. $\Delta U=0,1$)

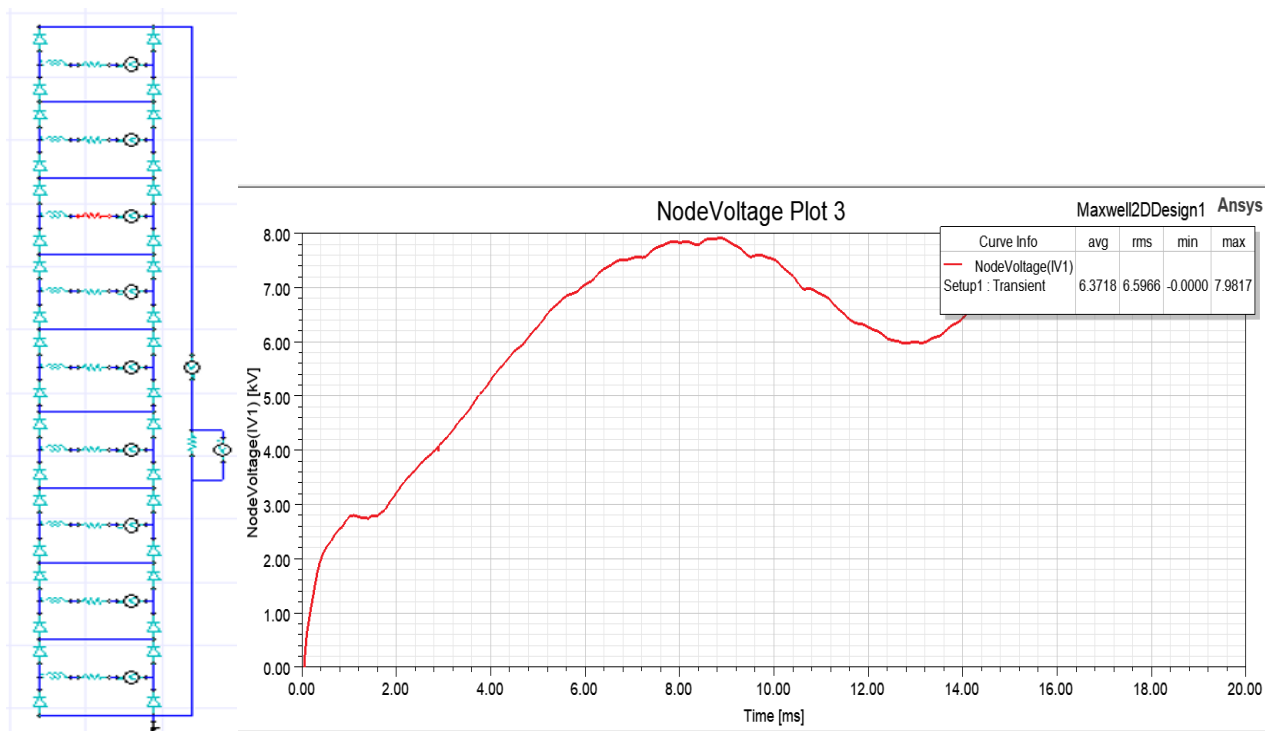


Рис.3.9.13. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве одной фазы
($U_{ср}=6,37$ кВ. $\Delta U=0,14$)

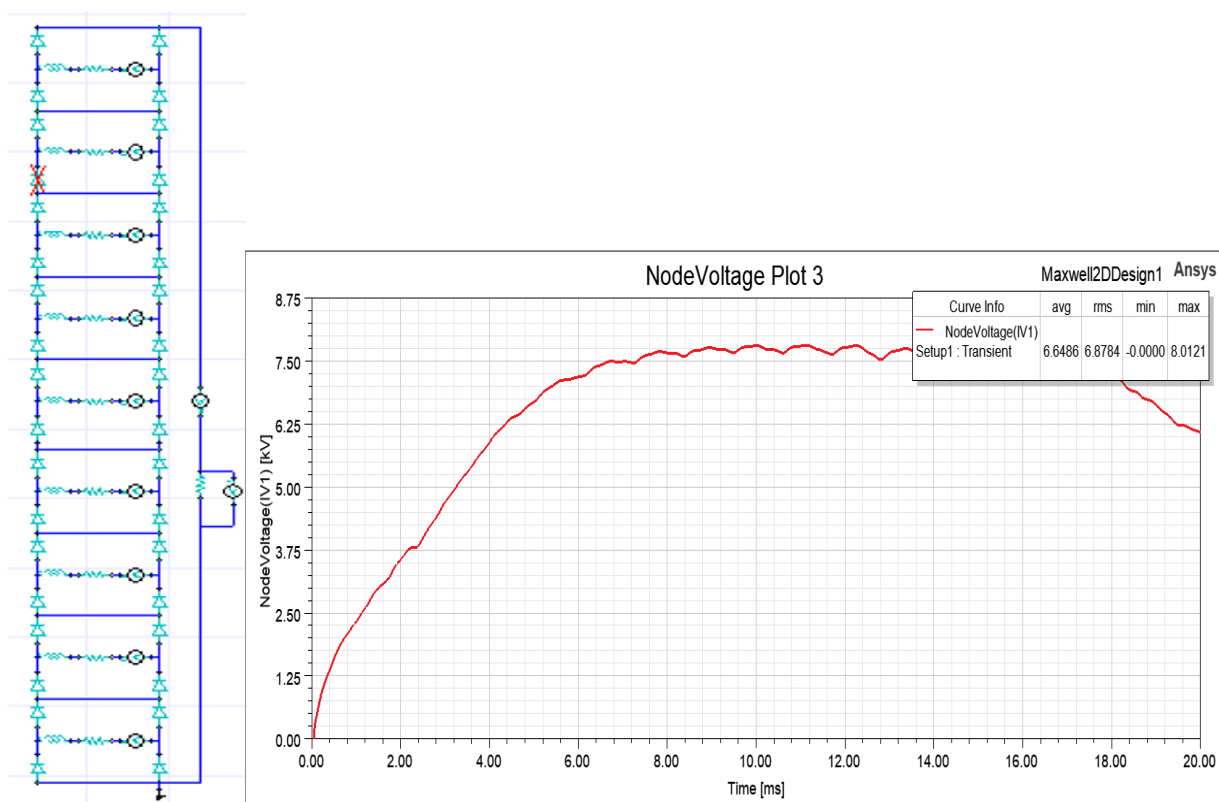


Рис.3.9.14. Схема и выпрямленное напряжение девятифазного полномостового выпрямление при соединении мостов последовательно при обрыве диода
($U_{ср}=6,3$ кВ, $\Delta U=0,06$)

3.10. Анализ вариантов выпрямления напряжения для различного количества фаз и различных схем выпрямителя для нормального режима и аварийных режимов

Отметим, что проведенные численные эксперименты позволяют выявить преимущество одного варианта перед другими, поскольку они были выполнены для генератора одного габарита, основных размеров (диаметр расточки, активная длина железа якоря) при одном и том же количестве проводников в пазах и на холостом ходу. В качестве критериев сравнения выберем среднее выпрямленное напряжение и уровень пульсаций. Для удобства анализа результаты проведенных численных экспериментов сведем в табл.3.1-3.3.

Графики среднего выпрямленного напряжения и уровня пульсаций представлены соответственно на рис.3.10.1-3.10.6.

Таблица 3.10.1. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при нормальном режиме работы на холостом ходу для различного числа фаз

Нормальный режим	Однополупериодная схема		Двухполупериодная схема				Мостовая схема			
			звезда		кольцо		в параллель		послед.	
Количество фаз	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	ΔU	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	ΔU	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	ΔU	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	ΔU	$U_{\text{ср}}$ (кВ)	ΔU
3 фазы	2.96	0.55	5.33	0.15	3.5	0.12	3.2	0.4	6.06	0.072
4 фазы	2.26	0.4	4.5	0.14	3.58	0.1	2.5	0.34	6.1	0.04
5 фаз	1.88	0.34	3.93	0.13	3.6	0.1	2.1	0.3	6.2	0.03
6 фаз	1.58	0.3	3.07	0.13	3.67	0.08	1.7	0.27	6.3	0.02
7 фаз	1.25	0.27	2.5	0.12	3.8	0.05	1.4	0.23	6.4	0.017
8 фаз	1.19	0.23	2.0	0.12	3.9	0.05	1.3	0.2	6.5	0.015
9 фаз	1.06	0.19	1.18	0.12	4.17	0.03	1.1	0.17	6.67	0.1

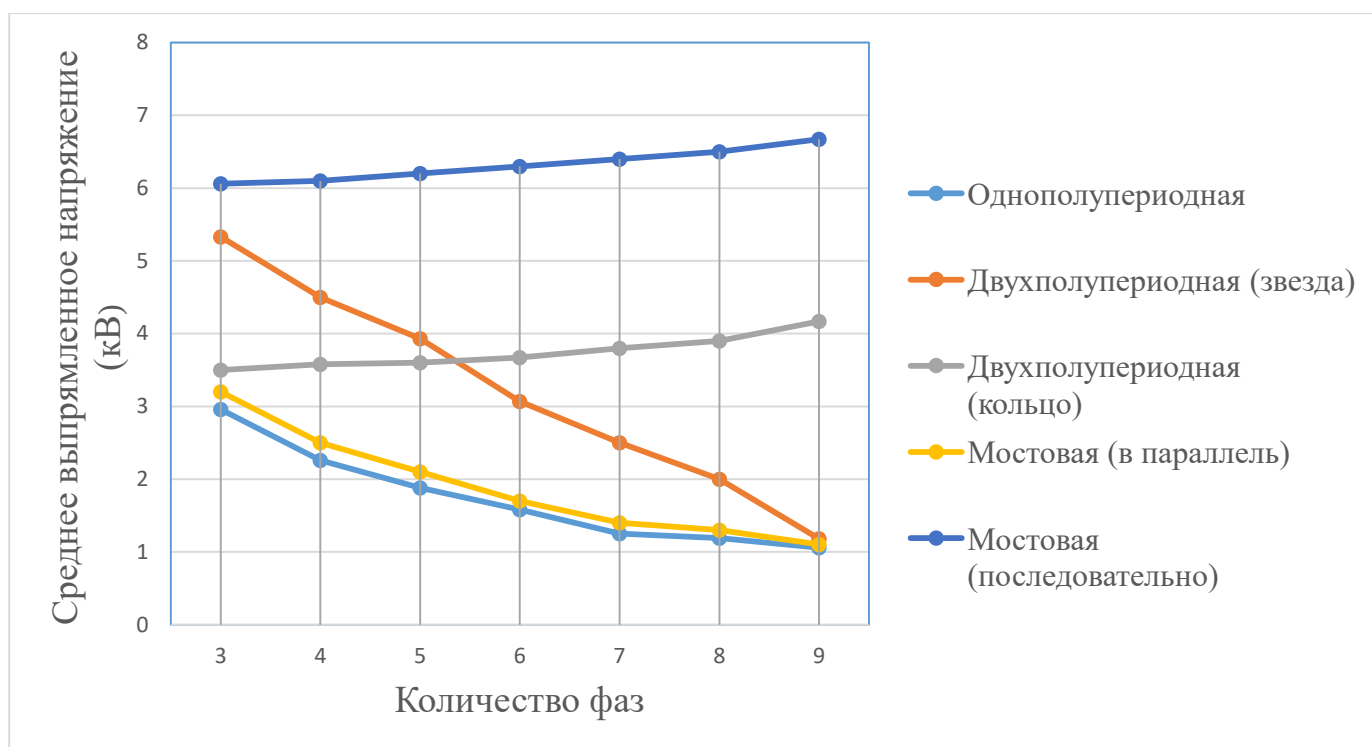


Рис.3.10.1. Среднее выпрямленное напряжение для различных схем при нормальном режиме на холостом ходу

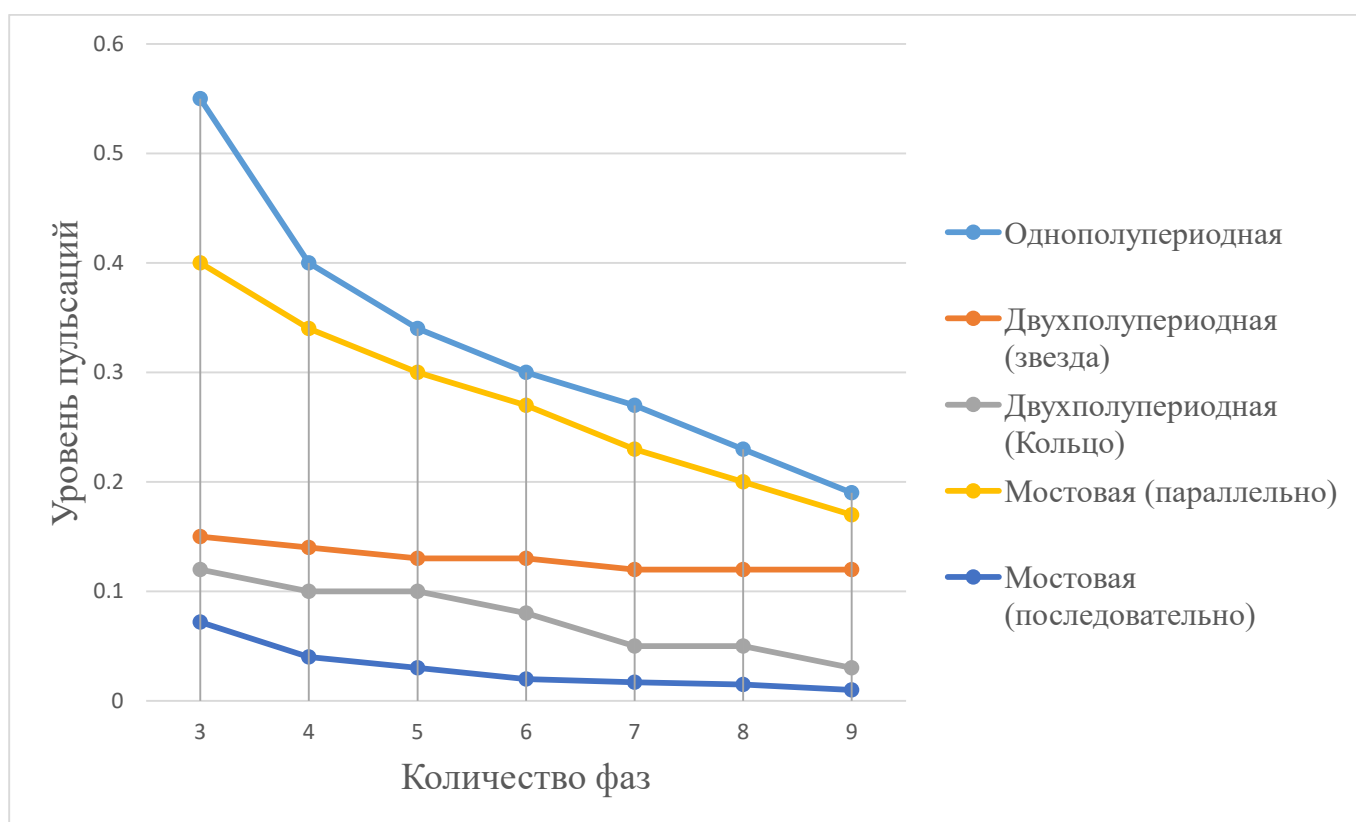


Рис.3.10.2. Уровень пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем при нормальном режиме на холостом ходу

Таблица 3.10.2. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при обрыве одной фазы и работе на холостом ходу для различного числа фаз

Обрыв одной фазы	Однополупериодная схема		Двухполупериодная схема				Мостовая схема			
			звезда		кольцо		в параллель		послед.	
Количество фаз	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU
3 фазы	2.19	1.0	3.8	0.61	3.32	0.71	3.02	0.58	4.34	0.3
4 фазы	1.99	0.66	3.2	0.58	3.31	0.5	2.26	0.45	4.7	0.28
5 фаз	1.88	0.57	3.0	0.5	3.5	0.4	1.9	0.34	5.02	0.25
6 фаз	1.58	0.5	2.5	0.44	3.62	0.3	1.59	0.25	5.39	0.23
7 фаз	1.3	0.4	2.1	0.4	3.7	0.25	1.37	0.23	5.5	0.2
8 фаз	1.19	0.3	1.5	0.3	3.87	0.23	1.2	0.22	5.75	0.17
9 фаз	1.06	0.22	1.15	0.22	4.09	0.2	1.06	0.2	6.37	0.14

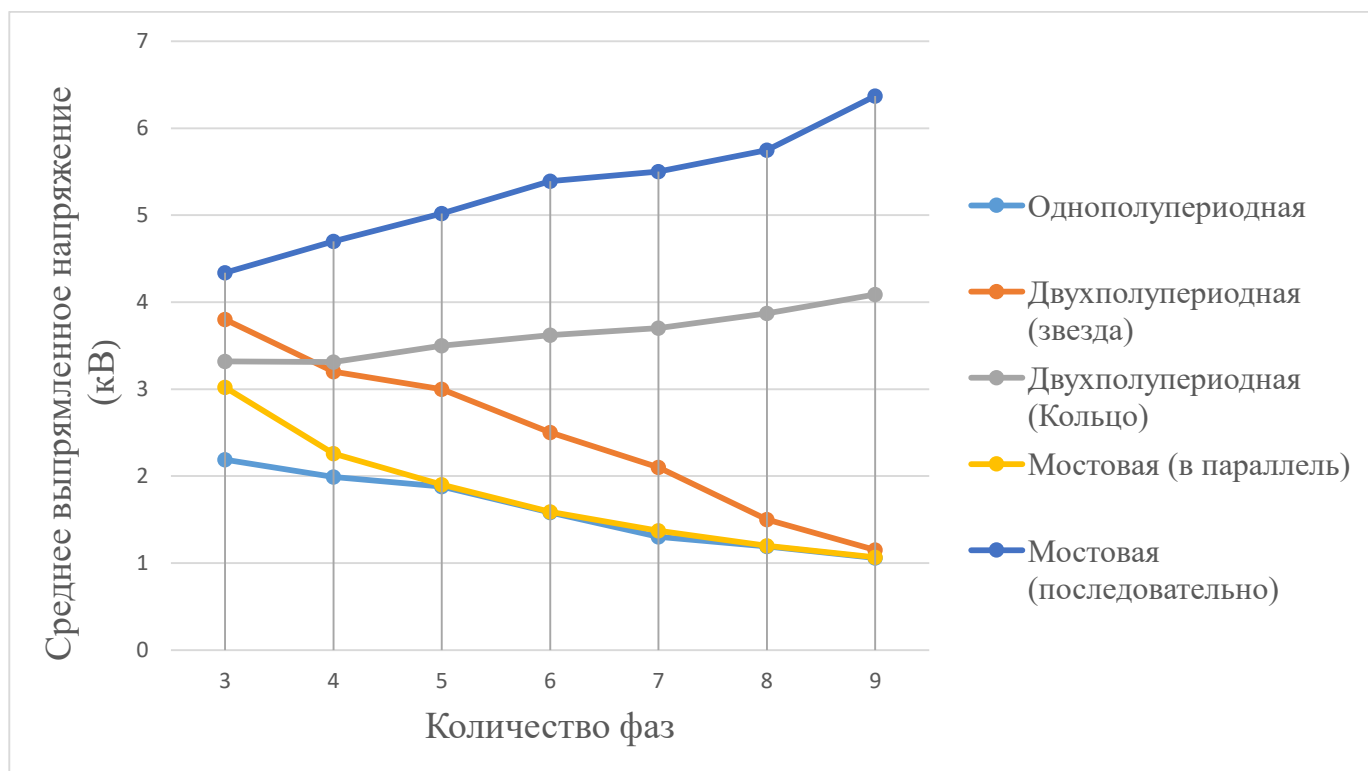


Рис.3.10.3. Среднее выпрямленное напряжение для различных схем при обрыве одной фазы на холостом ходу

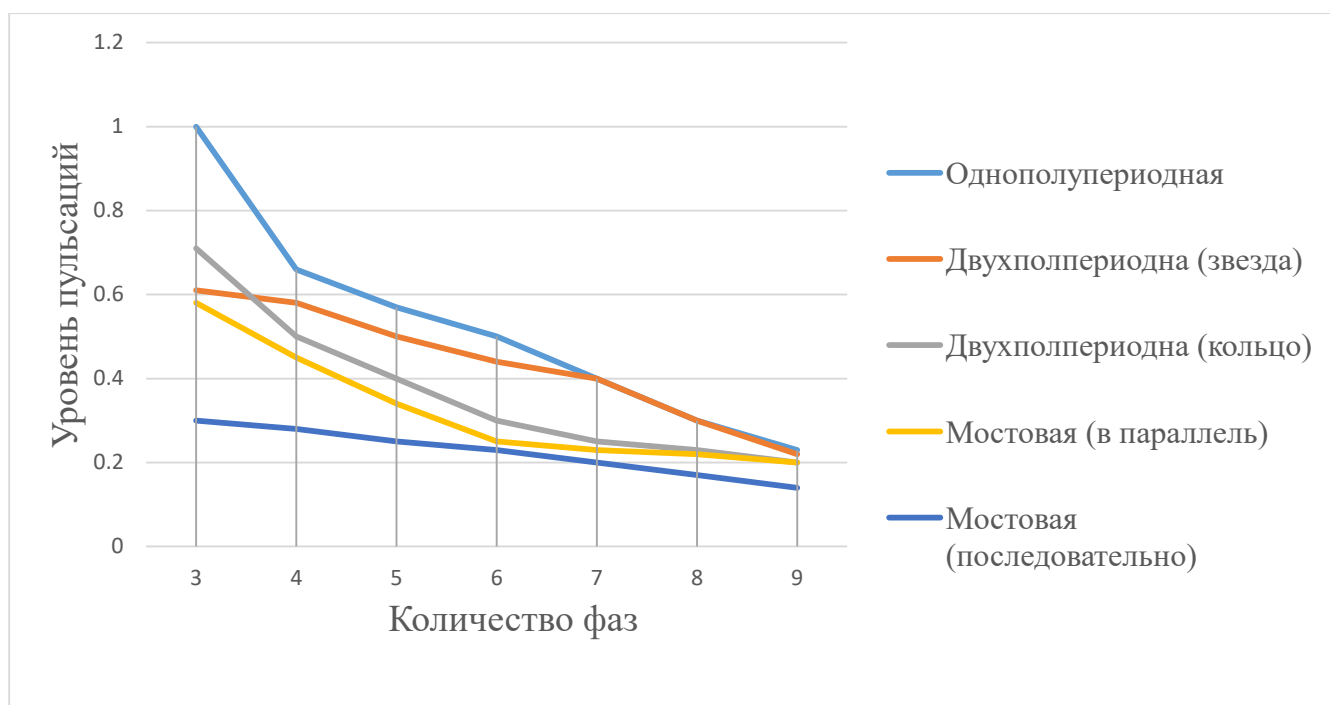


Рис.3.10.4. Уровень пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем при обрыве фазы на холостом ходу

Таблица 3.10.3. Выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения при обрыве диода и работе на холостом ходу для различного числа фаз

Обрыв одного диода	Однополупериодная схема		Двухполупериодная схема				Мостовая схема			
			звезда		кольцо		в параллель		послед.	
Количество фаз	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU	U_{cp} (кВ)	ΔU
3 фазы	2.19	0.75	4.29	1.0	3.16	1.0	2.98	0.6	5.01	0.5
4 фазы	1.99	0.66	3.76	0.8	3.76	0.7	2.26	0.5	5.19	0.38
5 фаз	1.88	0.57	3.35	0.65	3.75	0.5	1.9	0.38	5.5	0.3
6 фаз	1.58	0.5	3.07	0.56	3.62	0.3	1.59	0.3	5.63	0.26
7 фаз	1.3	0.4	2.82	0.5	4.03	0.21	1.37	0.25	6.0	0.18
8 фаз	1.19	0.3	2.34	0.34	3.83	0.2	1.2	0.2	6.19	0.1
9 фаз	1.06	0.22	2.06	0.22	4.1	0.2	1.06	0.2	6.3	0.06

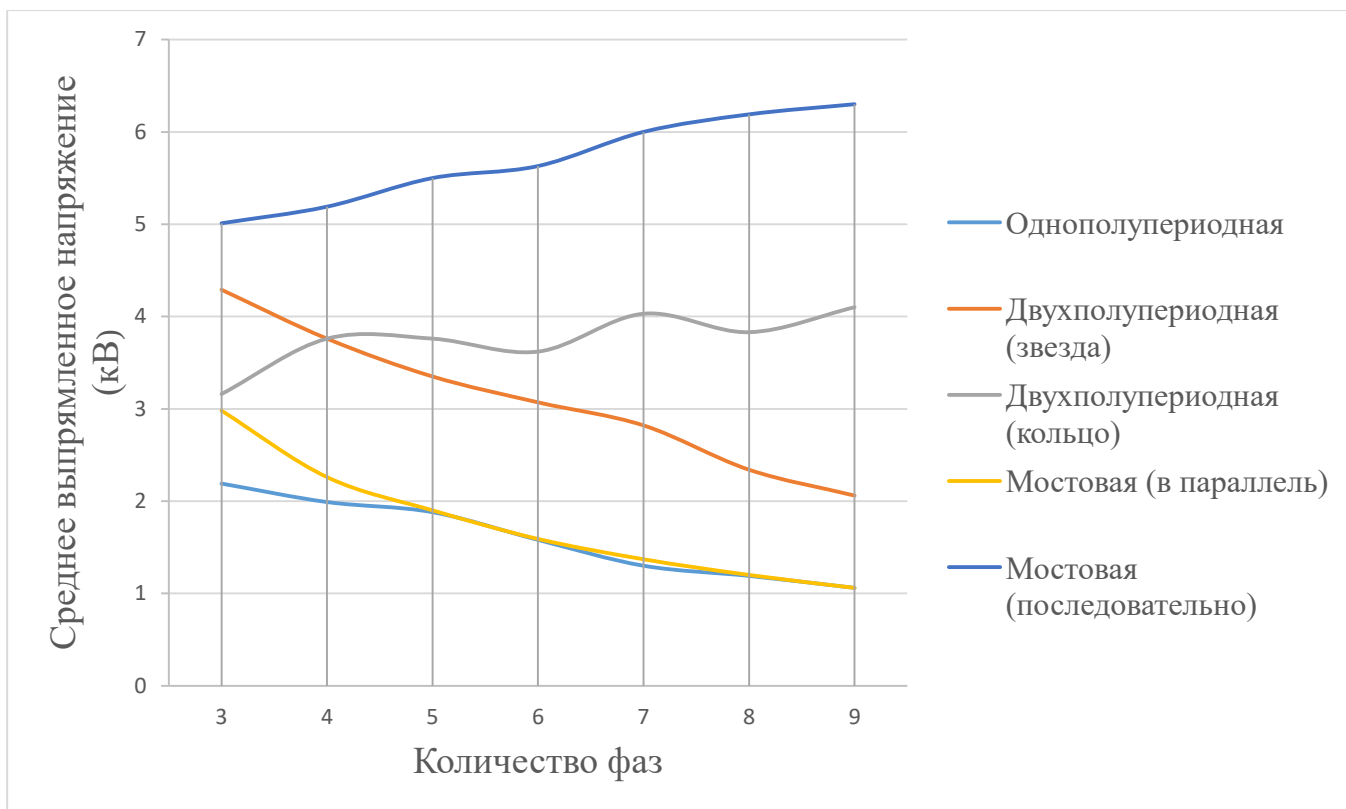


Рис.3.10.5. Среднее выпрямленное напряжение для различных схем при обрыве диода на холостом ходу

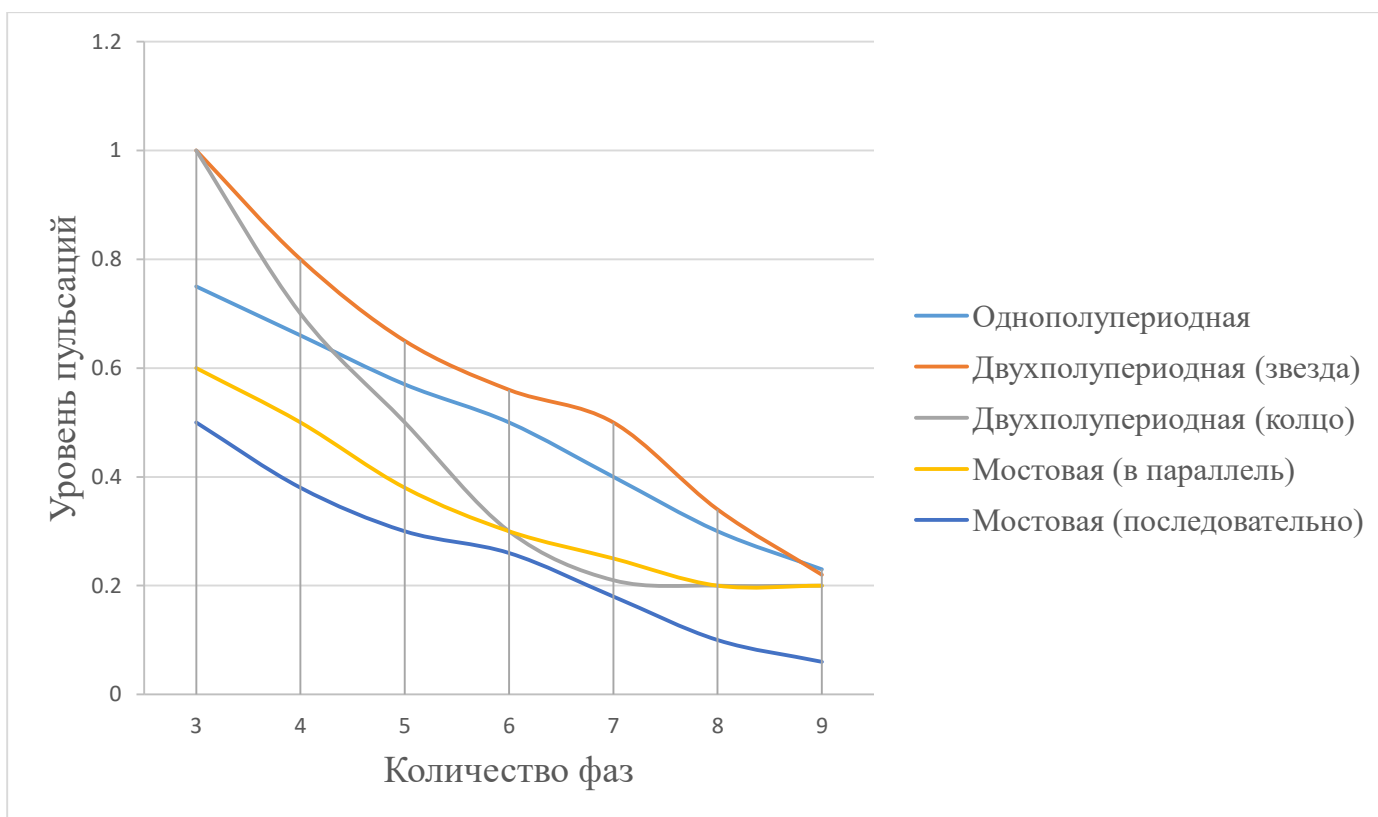


Рис.3.10.6. Уровень пульсаций выпрямленного напряжения для различных схем при обрыве диода на холостом ходу

Графики, полученные в результате тестирования цифровой модели, соответствуют теоретическим закономерностям, приведенным в главе 2, но они более точны, так как учитывают обмоточный коэффициент (распределение, укорочение и скос) и коэффициент использования обмотки, работающей на выпрямитель.

Анализ приведенных кривых показывает, что однополупериодная схема по величине выпрямленного напряжения уступает всем рассмотренным схемам, причем с увеличением количества фаз ее эффективность по этому показателю снижается. Эта схема также уступает и по второму показателю - уровню пульсаций напряжения, как в нормальном режиме, так и в нештатном режиме обрыва одной фазы или выхода из строя одного диода. Данный вывод объясняется особенностью работы якорной обмотки на выпрямитель, который в единицу времени подключает только одну фазу. При увеличении числа фаз при одном и том же общем количестве активных проводников число витков в фазе уменьшается, что и приводит к снижению величины выпрямленного напряжения и увеличению уровня пульсаций во всех режимах работы. По названным причинам исключим эту схему из дальнейшего анализа.

Аналогичные недостатки имеет и полномостовая схема при соединении мостов в параллель, хотя она несколько лучше по обоим критериям.

Двухполупериодные схемы показали лучшую эффективность по выбранным показателям. При этом варианты при соединении фаз в звезду имеют преимущество перед соединением фаз в кольцо от 3-до 5 фаз. При дальнейшем увеличении числа фаз преимущество получает обмотка, соединенная в кольцо при одном и том же выпрямителе. Эту тенденцию можно объяснить влиянием обмоточного коэффициента и коэффициента использования обмотки. Обмотка, соединенная в кольцо, так же имеет преимущество по уровню пульсаций напряжения, как в нормальном режиме работы, так и в нештатных режимах работы при обрывах. При увеличении числа фаз это преимущество увеличивается. Эта схема имеет в два раза больше диодов по сравнению с однополупериодной схемой, но при этом, в два раза меньше диодов по сравнению с полномостовыми схемами.

Полномостовая схема при последовательном соединении мостов имеет преимущество по обоим критериям как в нормальном режиме работы, так и в нештатных режимах работы. При увеличении числа фаз это преимущество увеличивается. Это объясняется эффективной работой активных проводников на выпрямленное напряжение.

Однако при этом возникает техническое противоречие, связанное с увеличением стоимости комплекса за счет электронных компонентов, усложнения технологии изготовления генератора и самой конструкции. При увеличении числа фаз достаточно сложно обеспечить токоподвод к электрической машине, так как каждая фаза требует 4-х проводников. Единственно приемлемым вариантом является встраивание выпрямителя в корпус генератора, что требует дополнительно конструктивной проработки и не всегда возможно по условиям эксплуатации.

Таким образом, возникает задача выбора оптимального количества фаз с точки зрения эффективности работы и параметров надежности.

Выводы по главе 3

1. Для анализа эффективности выпрямительных схем при увеличении числа фаз была построена цифровая модель генератора и выпрямителя. Эта необходимость была обусловлена влиянием на показатели качества обмоточного коэффициента и коэффициента использования обмотки, работающей на выпрямитель. При этом для всех вариантов исследовался генератор, имеющий одинаковые габариты и основные размеры (диаметр расточки и активную длину). Общее число проводников для всех вариантов принималось одним и тем же.

2. Проведены цифровые испытания однополупериодной схемы, двухполупериодной схемы при соединении фаз в звезду и кольцо и полные мостовые схемы при соединении мостов параллельно и последовательно. Тестирование проводилось для нормального режима и нештатного режима обрыва фазы или обрыва диода. В качестве показателей эффективности схем были приняты среднее выпрямленное напряжение и уровень пульсаций напряжения.

3. Проведенный сравнительный анализ показал, что по среднему выпрямленному напряжению и уровню пульсаций как в нормальном режиме, так и в нештатных режимах обрыва фазы или диода преимущество имеет полномостовая схема с последовательным соединением мостов. Это преимущество увеличивается при увеличении числа фаз. Далее по этим критериям следует двухполупериодная схема и однополупериодная схема. Отмечено, что для полномостовой схемы при увеличении числа фаз обостряется противоречие, связанное с удорожанием за счет комплектующих элементов и усложнением технологии изготовления и самой конструкции генератора за счет токоподвода. Сделан вывод о необходимости оптимизации числа фаз как с точки зрения себестоимости, так и по показателям надежности.

4. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕУПРАВЛЯЕМЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

Вводные замечания.

Как было отмечено в предыдущих главах, одним из путей повышения надежности мини-ГЭС является увеличение числа фаз более трех традиционных. При этом отказ одной фазы не приводит к выходу системы из строя, а происходит только ухудшение выходных характеристик. Соответственно, необходимо установить порог, до которого допустимо это ухудшение.

С одной стороны, при увеличении числа фаз и нештатных ситуаций обрывов параметры системы ухудшаются в меньшей степени. С другой стороны, при увеличении числа фаз и соответствующих им электронных компонентов повышается вероятность их отказов. Возникает техническое противоречие: число фаз надо увеличивать для сохранения характеристик при отказах и число фаз не следует увеличивать, уменьшая вероятность отказов. Разрешить это противоречие можно с использованием методов теории вероятности и математической статистики.

Требования по надёжности, модели надёжности и расчёт надёжности электротехнических устройств в основном отражены в ГОСТ 27.003, ГОСТ 27.301 и ГОСТ 27.005 [7,8,9]. Для таких устройств в режиме эксплуатации обычно нормируются следующие показатели надёжности:

- $P(t_{\delta,p})$ – вероятность безотказной работы при наработке $t_{\delta,p}$;
- $t_{\delta,p}$ – наработка, в пределах которой вероятность безотказной работы не ниже заданной;
- T_{cp} – средняя наработка до отказа;
- λ – интенсивность отказов;
- $T_{c,cp}$ – средний ресурс.

При этом значение $t_{\delta,p}$ устанавливают исходя из принятой модели эксплуатации изделия и принимают равным заданному значению непрерывной наработки изделия (длительности выполнения одной типовой операции,

длительности решения одной типовой задачи, объему типового задания и т.п.). Для невосстанавливаемых простых высоконадежных элементов (деталей, узлов) допускается вместо средней наработки до отказа T_{cp} задавать интенсивность отказов λ .

При расчёте надёжности сборного комплексного изделия обычно предполагают, что модель надёжности в виде лямбда-характеристики имеет классический вид (см. рис 4.1).

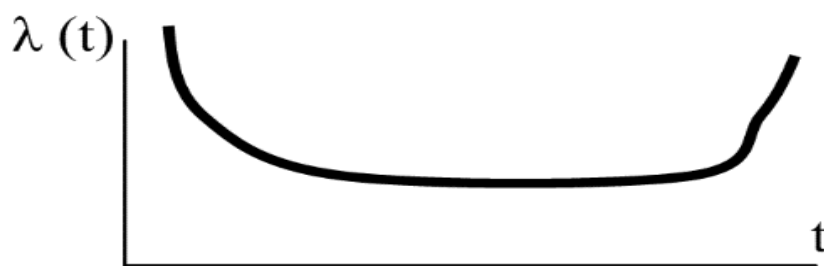


Рис. 4.1. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации для электромеханических систем.

У этой характеристики наблюдается выраженный участок наработки, в пределах которого величина интенсивности отказа $\lambda(t)$ минимальна и постоянна. Этот участок принято называть периодом нормальной эксплуатации. Обычно именно в пределах периода нормальной эксплуатации назначается технический ресурс объектов, а «всплеск» значений $\lambda(t)$ в начале и в конце наработки t , который объясняется повышенным числом отказов из-за неприработанности деталей на новых объектах и высоким износом деталей на старых объектах, стараются исключить из пределов назначенного и межремонтного ресурса объекта.

Для оценки показателей надёжности электротехнических устройств в большинстве случаев используются два метода: коэффициентный метод и метод оценки по π -факторам. Обе методики в своей основе повторяют друг друга. Отличие в том, что первый подход ориентирован на отечественную элементную базу, второй – на иностранную.

Расчёт эксплуатационной интенсивности отказа элемента (узла, блока) коэффициентным методом сводится к следующему соотношению:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_6 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7, \quad (4.1)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов элемента при номинальных условиях эксплуатации;

$k_1 \dots k_7$ – поправочные коэффициенты, учитывающие механические и электрические перегрузки, изменения температуры, влажности, давления и т.д. Значения базовой интенсивности отказов и поправочных коэффициентов можно найти в отечественных справочниках по надёжности [64, 65].

Метод π -факторов опирается на американский стандарт MIL-HDBK-217F [66]. Это справочник по надёжности, разработанный Министерством обороны США. Стандарт был разработан для прогнозирования надёжности военных комплектующих, затем был распространён на невоенные области и в настоящее время является наиболее используемым методом прогнозирования надёжности.

В методе π -факторов используется следующая модель интенсивности отказов

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_6 \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E, \quad (4.2)$$

где π_T – коэффициент температуры;

π_A – коэффициент нагрузки;

π_R – коэффициент мощности;

π_S – коэффициент напряжения питания;

π_C – коэффициент конструкции;

π_Q – коэффициент качества;

π_E – коэффициент окружающей среды.

4.1. Расчёт показателей надёжности многофазного вентильного генератора мини-ГЭС

Воспользуемся коэффициентным методом расчёта. В справочнике [64] приведена следующая модель интенсивности отказов для силовых диодов и диодных сборок

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б.с.г}} k_p k_{\text{д.н}} k_{\text{ф}} k_s k_{\text{э}} k_{\text{пр}}, \quad (4.3)$$

где $\lambda_{б.с.г}$ – базовая средне-групповая интенсивность отказов элемента при номинальных условиях эксплуатации;

k_p – коэффициент режима;

$k_{д.н}$ – коэффициент допустимой нагрузки;

k_ϕ – коэффициент функционального назначения;

k_s – коэффициент нагрузки по напряжению;

k_ε – коэффициент эксплуатации;

$k_{пр}$ – коэффициент приёмки.

Модель (3) используется для расчёта эксплуатационной интенсивности отказов тех типов полупроводниковых приборов, для которых из-за недостаточности информации не приведены значения интенсивности отказов λ_ϕ . Кроме этого, эта модель используется для оценки уровня интенсивности отказов групп приборов в целом.

Для выпрямительных диодов [4] $\lambda_{б.с.г} = 0,091 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, $k_p = 0,5467$ (при $k_{эл} = I_{раб}/I_{макс} = 0,8$ и $t = 40^\circ C$), $k_{пр} = 1$, $k_{д.н} = 5$ (при максимально допустимом по ТУ среднем выпрямленном токе больше 20 А), $k_\varepsilon = 2$, $k_s = 1$ (при нагрузке по напряжению от 90 до 100%), $k_\phi = 1,5$. Распределение по отказам: обрыв – 14%, короткое замыкание – 6%, постепенные (параметрические) отказы – 80%.

Тогда эксплуатационная интенсивность отказа выпрямительного диода будет:

$$\lambda_\varepsilon = 0,091 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5467 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \quad (4.4)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы (надёжность) p и вероятность отказа q диода при допущении о постоянстве эксплуатационной интенсивности отказа для наработки $T=10000$ ч из периода нормальной эксплуатации диода. При принятых допущениях

$$p(T) = e^{-\lambda_\varepsilon T}, \quad q(T) = 1 - p(T) = 1 - e^{-\lambda_\varepsilon T}. \quad (4.5)$$

Используя разложение экспоненты в ряд

$$e^x = 1 + x + x^2/2! + x^3/3! + \dots, \quad (4.6)$$

при малых значениях x можно получить более простое приближённое выражение для расчёта p и q :

$$p(T) \cong 1 - \lambda_3 T, \quad q(T) \cong \lambda_3 T. \quad (4.7)$$

Выражение (6) при малых значениях $\lambda_3 T$ обеспечивает необходимую точность вычислений. При принятых значениях λ_3 и T

$$p \cong 0,9925, \quad q \cong 0,0075. \quad (4.8)$$

Далее эти значения будут использоваться при расчёте надёжности неуправляемого выпрямителя.

Для электрических машин в [64] приведена следующая модель эксплуатационной интенсивности отказов

$$\lambda_3 = (\lambda_{б.с.г.эл} k_t + \lambda_{б.с.г.м} k_{T.n.t}) k_3, \quad (4.9)$$

где $\lambda_{б.с.г.эл}$ – базовая средне-групповая интенсивность электрических отказов для температуры $t = 25^\circ C$ на время минимальной наработки $T_{н.м}$ на электрическую машину;

$\lambda_{б.с.г.м}$ – базовая средне-групповая интенсивность механических отказов на время наработки $T=3000$ ч для бесколлекторных машин при частоте вращения $n=2000$ об/мин и температуре окружающей среды $t = 25^\circ C$;

$\lambda_{с.г.м}$ – интенсивность механических отказов;

$k_{T.n.t}$ – отношение $\lambda_{с.г.м}/\lambda_{б.с.г.м}$ при различных значениях T, n, t (это отношение равно единице при $T=3000$ ч для бесколлекторных машин при частоте вращения $n=2000$ об/мин и температуре окружающей среды $t = 25^\circ C$);

k_t – температурный коэффициент изоляции;

k_3 – коэффициент жёсткости условий эксплуатации для электрических машин.

В [64] для бесконтактных электрических машин $\lambda_{б.с.г.эл} = 0,12 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; $\lambda_{б.с.г.м} = 0,00003 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при $T_{н.м}=10000$ ч, $n=4000$ об/мин, $t = 50^\circ C$ и классе нагревостойкости изоляции Г; $k_t=4,04$ при температуре нагрева изоляции $t_{и} = 50 + 40 + 10 = 100^\circ C$

здесь первое слагаемое равно t , второе слагаемое учитывает перегрев корпуса машины относительно t , третье слагаемое учитывает перегрев обмотки (относительно корпуса);

$k_{T.n.t} = 66,28$ при $T_{н.м}=10000$ ч, $n=4000$ об/мин и $t = 50^{\circ}C$; $k_3 = 7$.

Тогда эксплуатационная интенсивность отказа машины будет:

$$\lambda_3 = (0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 4,04 + 0,3 \cdot 10^{-10} \cdot 66,28) \cdot 7 = 3,4 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}. \quad (4.10)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы (надёжность) p и вероятность отказа q генератора для наработки $T=10000$ ч. Расчёт проведём по выражениям (5) и (6).

Значения надёжности и вероятности отказа синхронной машины будут

$$p \cong 0,967, \quad q \cong 0,033. \quad (4.11)$$

Далее эти значения будут использоваться при расчёте надёжности многофазного синхронного генератора.

4.2. Модель надёжности многофазного синхронного генератора

Рассмотрим синхронный генератор с кольцевой многофазной обмоткой с возбуждением от постоянных магнитов. Общие точки каждой пары фаз соединены со стойками неуправляемого диодного выпрямителя.

Рассматриваются следующие отказы, оказывающие влияние на работоспособность генератора:

- 1) обрыв одного диода в одной из стоек выпрямителя;
- 2) обрыв двух диодов в одной из стоек выпрямителя;
- 3) обрыв двух диодов в двух соседних стойках выпрямителя;
- 4) обрыв двух диодов в двух несмежных через одну стойку выпрямителя;
- 5) обрыв двух диодов в двух несмежных через две стойки выпрямителя;
- 6) разрыв обмотки в одной из фаз генератора;
- 7) разрыв обмоток в двух соседних фазах генератора;
- 8) разрыв обмоток в двух несмежных через одну фазу генератора;
- 9) разрыв обмоток в двух несмежных через две фазы генератора.

Здесь приведён перечень «некритических» отказов, которые не приводят к полному отказу генератора. При перечисленных отказах ухудшается качество работы генератора, растут пульсации напряжения и электрические потери, но работоспособность генератора не нарушается, если пульсации напряжения не превышают заданное предельное значение.

При допущении о независимости отказов случаи 2, 3, 4 и 5 (отказ двух диодов) для конкретной конструкции генератора будут равновероятны. Аналогично, такой же вывод можно сделать для случаев 7, 8 и 9 (отказ двух обмоток). Но, с точки зрения энергетики или величины пульсаций напряжения эти варианты отказов при обрыве двух диодов или разрыве двух обмоток в зависимости от места этих отказов существенно отличаются.

Таким образом, необходимо рассчитать вероятности отказа не более двух диодов из $2N$ и отказа не более двух обмоток генератора из N , где N количество фаз многофазного генератора. При этом в качестве критерия отказа генератора будем принимать превышение предельно допустимого уровня пульсаций напряжения.

При таком подходе оптимальной с точки зрения надёжности будет конструкция генератора, обеспечивающая максимальную вероятность безотказной работы при допустимом уровне пульсаций напряжения.

Очевидно, чем больше число фаз, тем меньше влияние отказа в каждой из них в отдельности на характеристики генератора. С другой стороны, увеличение числа фаз приводит к увеличению вероятности отказа в каждой из них. То же касается отказов диодов в стойках неуправляемого выпрямителя. Таким образом, необходимо решать компромиссную задачу, исходя из требований к выходным характеристикам и надёжности генератора.

Одним из определяющих параметров выходной характеристики генератора являются пульсации выходного напряжения. В таблицах 4.2.1 и 4.4.2. приведены пульсации напряжения при обрыве диодов в стойках неуправляемого выпрямителя и обрыве обмоток фаз генератора, рассчитанные ранее.

Таблица 4.2.1. Пульсации напряжения при обрыве диодов. %

N/k	3	4	5	6	7	8	9
0	12	11	10	8	5	4	3
1	100	70	50	30	21	18	14
2	90	73	61	39	37	28	27

Таблица 4.2.2. Пульсации напряжения при обрыве фаз, %

N/k	3	4	5	6	7	8	9
0	12	11	10	8	5	4	3
1	71	50	40	30	25	23	20
2	90	71	60	41	37	29	24

В таблицах параметр k – допустимое число отказов ($k = 0, 1, 2$) и N – число фаз генератора ($N = 3 \dots 9$).

Опираясь на эти данные, определим максимальную вероятность безотказной работы (далее, просто надёжность) генератора при допустимом уровне пульсаций напряжения.

Для этого необходимо определить вероятности наступления следующих событий: отсутствие отказов диодов в стойках неуправляемого выпрямителя (их $2 \cdot N$ штук для N -фазного генератора), отказ одного диода, отказ двух диодов, отсутствие обрывов обмоток N -фазного генератора, обрыв одной обмотки и обрыв двух обмоток. При этом считаем отказы независимыми и равновероятными с постоянной вероятностью отказа отдельного элемента q . Значения q для диодов и обмоток генератора рассчитаны ранее (см. 4.7 и 4.11).

При расчётах будем пользоваться следующим выражением

$$P(N, k, q) = \sum_{i=0}^k C_N^i \cdot (1 - q)^{N-i} \cdot q^i, \quad (4.12)$$

где $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$ – число сочетаний из N по i (количество вариантов безотказной работы при различных значениях k). При расчёте вероятности отказов диодов N в формуле необходимо заменить на $2 \cdot N$.

Таблица 4.2.4 – Вероятность отказа не более k из N обмоток генератора

$N \backslash k$	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,89800 0	0,86400 0	0,83000 0	0,79600 0	0,762000	0,72800 0	0,69400 0	0,660000
1	0,99653 2	0,99306 4	0,98844 0	0,98266 0	0,975724	0,96763 2	0,95838 4	0,947980
2	0,99996 1	0,99984 3	0,99960 7	0,99921 4	0,998624	0,99779 9	0,99669 8	0,995284

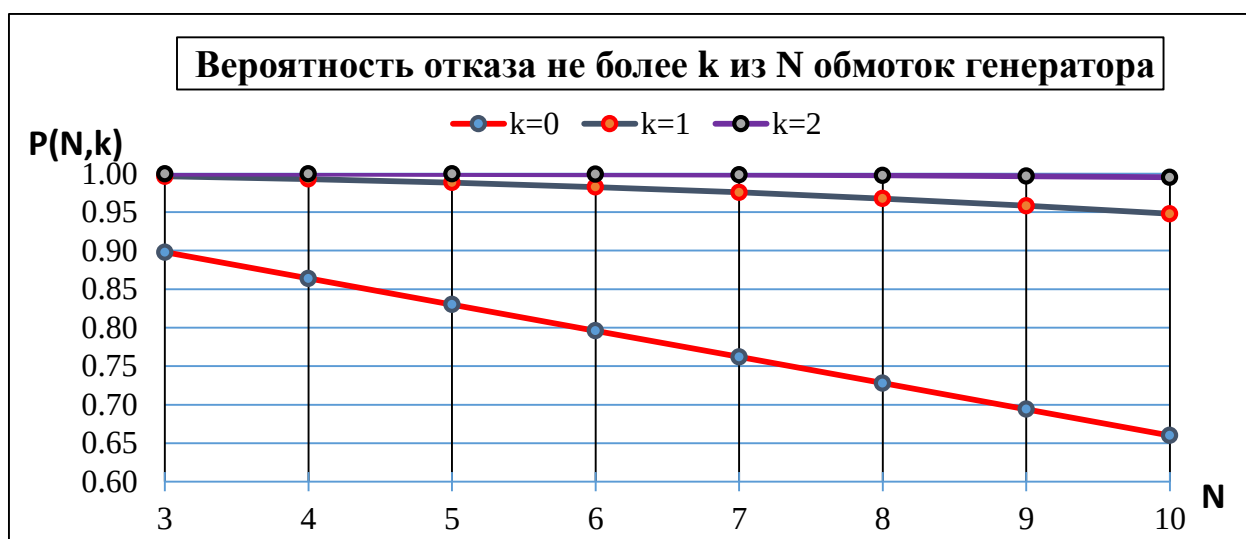


Рис.4.2.2. Вероятность отказа не более k из N обмоток генератора

На следующих трёх рисунках изображены детализированные графики вероятностей отказа диодов для случаев $k=0$, $k=1$ и $k=2$.

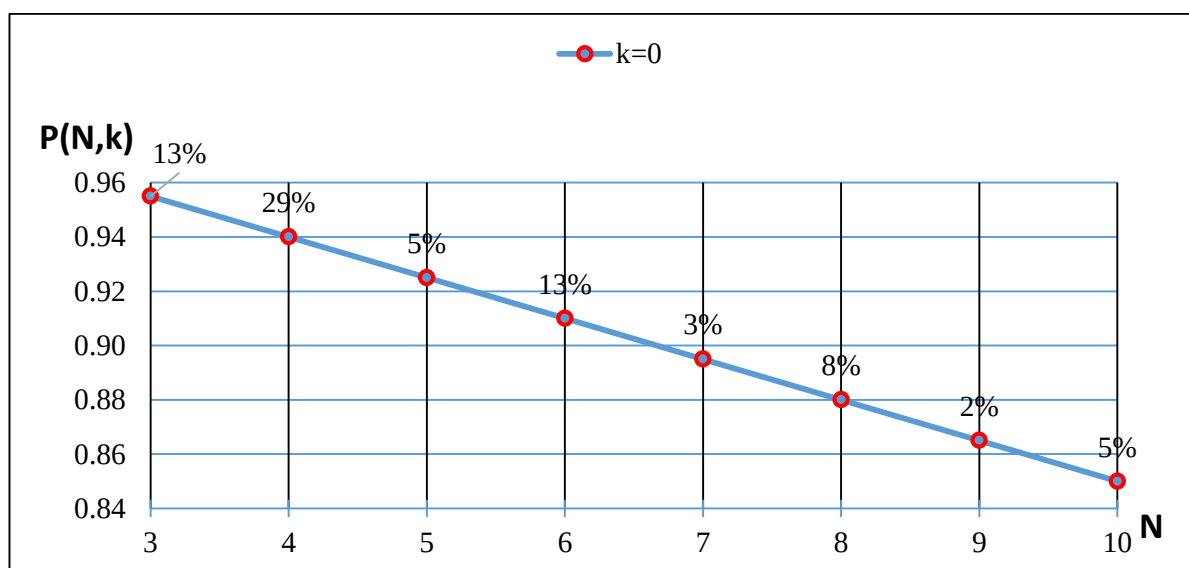


Рис.4.2.3. Вероятность отсутствия отказов диодов

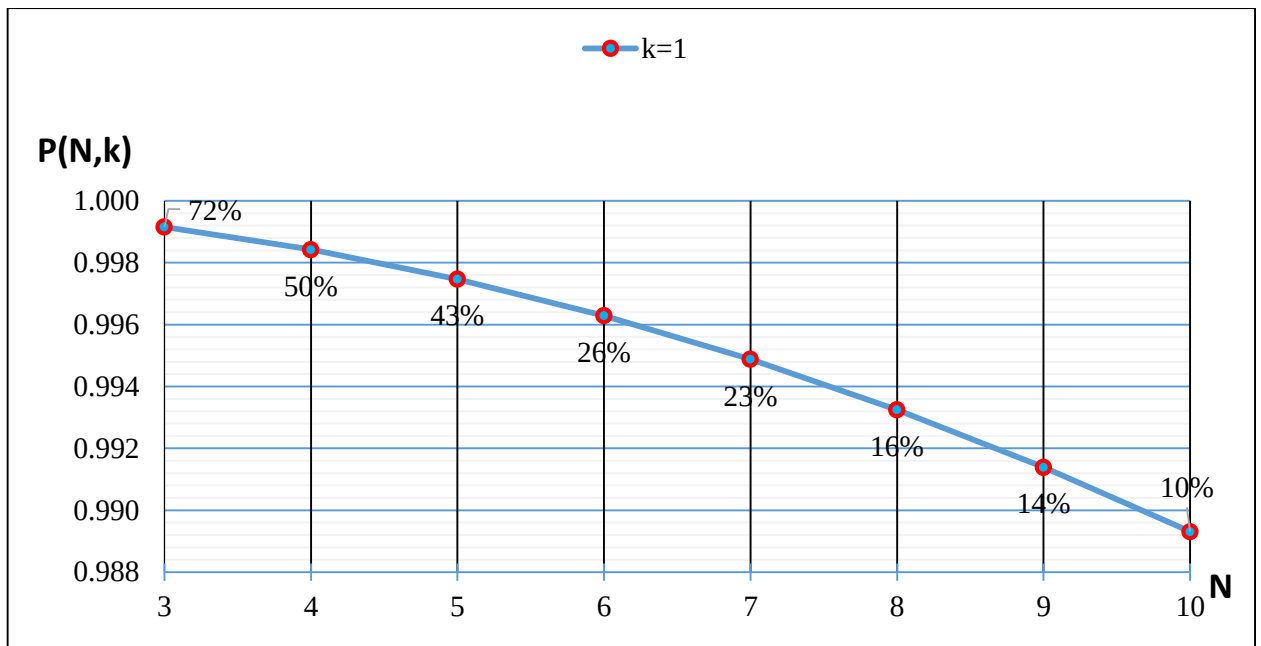


Рис.4.2.4. Вероятность не более одного отказа диода

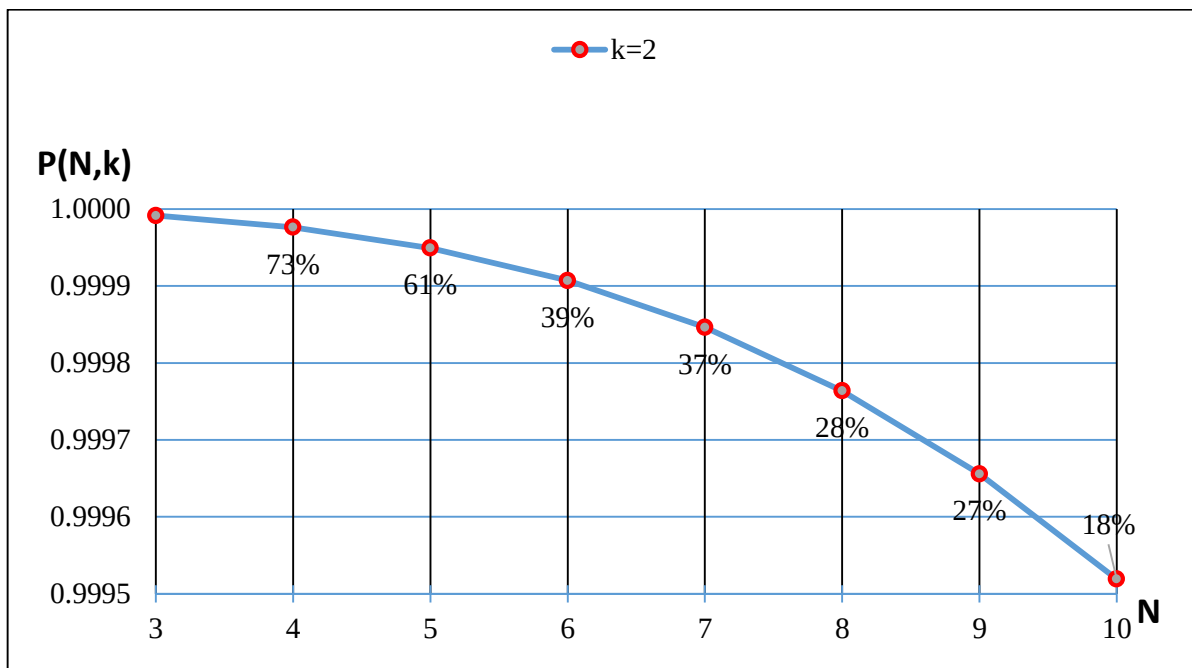


Рис.4.2.5. Вероятность не более двух отказов диодов

Рядом с кривыми вероятностей приведены величины пульсаций напряжения . Обобщая эти данные, в таблицах 4.2.5, 4.2.6 и 4.2.7 приведены значения вероятностей безотказной работы (надёжности) синхронного генератора при различных сочетаниях числа фаз N и допустимого числа отказов диодов k , обеспечивающих, соответственно, величину пульсаций напряжения не выше 10%, 20% и 30%.

Таблица 4.2.5. Надежность генератора при возможности отказов диодов и величине пульсаций напряжения не выше 10 %

N/k	5	7	8	9
0	0,925000	0,895000	0,880000	0,865000
1				0,989313

Таблица 4.2.6. Надежность генератора при возможности отказов диодов и величине пульсаций напряжения не выше 20 %

N k	3	4	5	6	7	8	9
0	0,955000	0,925000	0,910000	0,895000	0,880000	0,865000	0,850000
1					0,993250	0,991394	0,989313
2							0,999519

Таблица 4.2.7. Надёжность генератора при возможности отказов диодов и величине пульсаций напряжения не выше 30%

N k	3	4	5	6	7	8	9
0	0,955000	0,940000	0,925000	0,910000	0,89500	0,88000	0,86500
1				0,996288	0,99488	0,99325	0,99139
2						0,99976	0,99965

Цветом выделены варианты, обеспечивающие максимальную надёжность. Например, 9-фазный генератор с возможностью отказов 2 диодов демонстрирует максимальную надёжность 0,99965 при пульсациях напряжения не выше 20%.

Аналогично проведём анализ для случаев обрывов обмоток генератора. На следующих трёх рисунках изображены детализированные графики вероятностей обрывов обмоток для случаев $k=0$, $k=1$ и $k=2$.

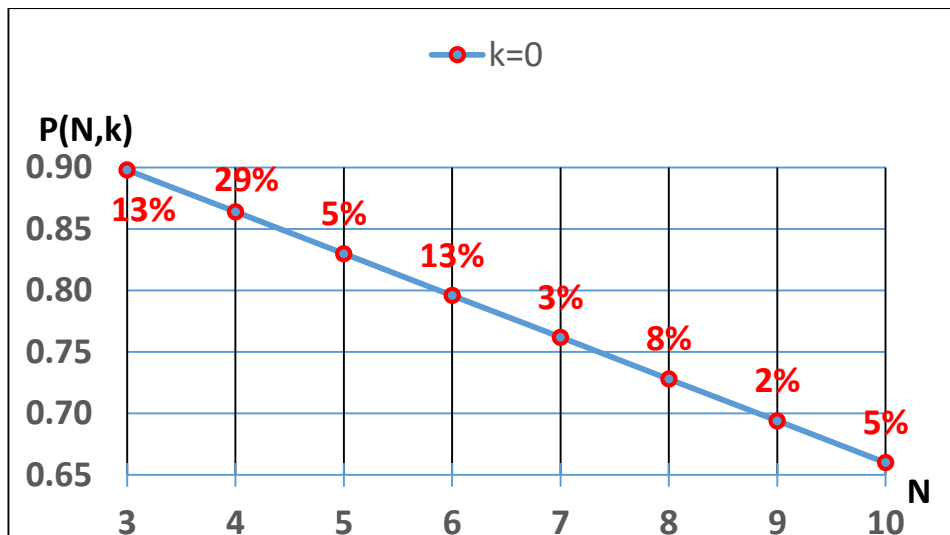


Рис.4.2.6 Вероятность отсутствия отказов обмоток

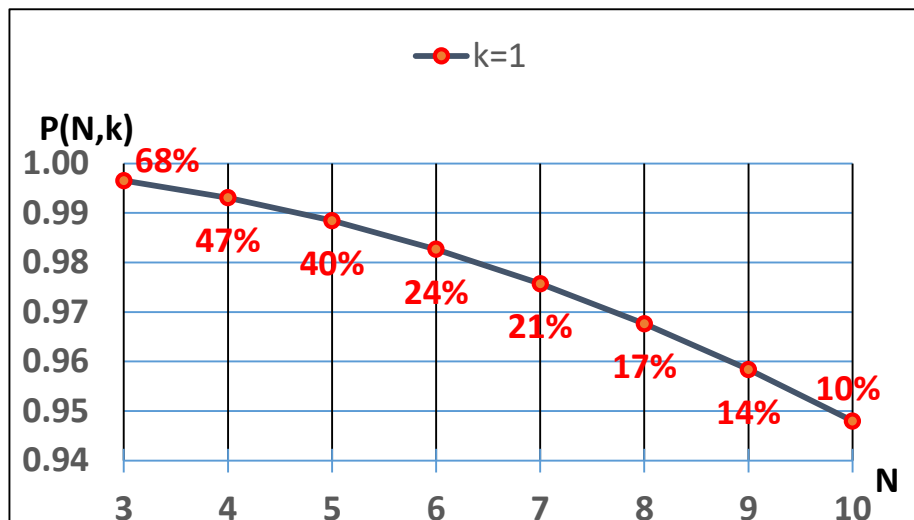


Рис.4.2.7. Вероятность не более одного обрыва обмотки

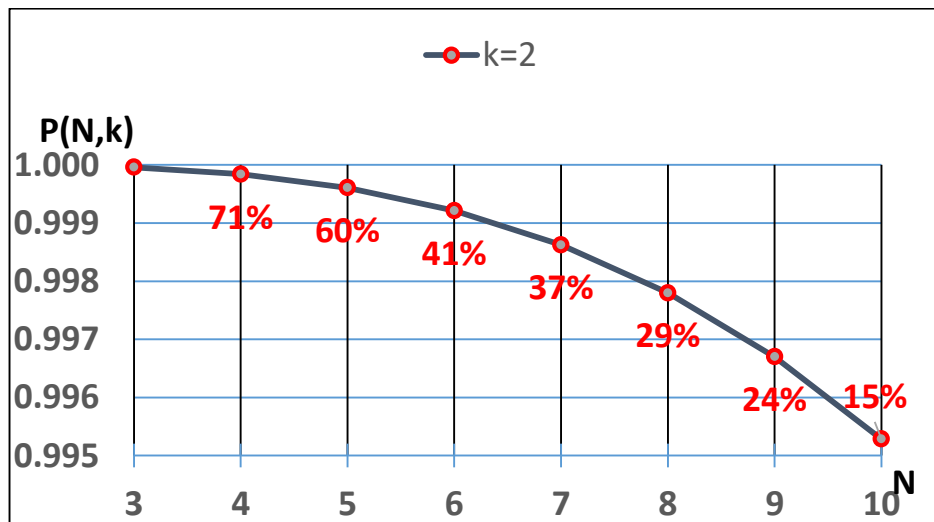


Рис.4.2.8. Вероятность не более двух обрывов обмотки

В таблицах 4.2.8, 4.2.9 и 4.2.10 приведены значения вероятностей безотказной работы (надёжности) синхронного генератора при различных сочетаниях числа фаз N и допустимого числа обрывов обмоток k , обеспечивающих, соответственно, величину пульсаций напряжения не выше 10%, 20% и 30%.

Таблица 4.2.8 – Надёжность генератора при возможности обрывов обмоток и величине пульсаций напряжения не выше 10%

$\begin{matrix} N \\ k \end{matrix}$	5	6	7	8	9
0	0,830000	0,762000	0,728000	0,694000	0,660000
1					0,947980

Таблица 4.2.9 – Надёжность генератора при возможности обрывов обмоток и величине пульсаций напряжения не выше 20%

$\begin{matrix} N \\ k \end{matrix}$	3	4	5	6	7	8	9
0	0,898000	0,830000	0,796000	0,762000	0,728000	0,694000	0,660000
1					0,967632	0,958384	0,947980
2							0,995284

Таблица 4.2.10 – Надёжность генератора при возможности обрывов обмоток и величине пульсаций напряжения не выше 30%

$\begin{matrix} N \\ k \end{matrix}$	3	4	5	6	7	8	9
0	0,89800	0,86400	0,83000	0,79600	0,76200	0,728000	0,69400
1				0,98266	0,97572	0,967632	0,95838
2						0,997799	0,99669

В таблицах 4.2.8, 4.2.9 и 4.2.10 также цветом выделены варианты, обеспечивающие максимальную надёжность при допустимом уровне пульсаций напряжения не выше, соответственно, 10%, 20% и 30%.

Анализ кривых надёжности подтвердил наличие разнонаправленных тенденций: увеличение числа фаз ведёт к снижению пульсаций, но при этом

снижаются показатели надёжности генератора. Поэтому необходимо стремиться к минимально возможному числу фаз генератора при условии обеспечения требований к выходным характеристикам и надёжности генератора.

Исходя из проведенного цифрового тестирования различных схем и проведенного анализа вероятностей отказов при требуемом уровне качества напряжения по уровню пульсаций можно рекомендовать 5-ти или 6-ти фазную обмотку, соединённую кольцом, при двухполупериодной схеме выпрямления. При этом, преимущество следует отдать 6-ти фазной обмотке, так как ее легче всего уложить в пазы традиционной трехфазной обмотки, что значительно упрощает технологию изготовления генератора.

Выводы по главе 4

1. Проведен анализ вероятности отказов при обрыве диодов и обмоток для генераторов с различным числом фаз коэффициентным методом расчета. В качестве показателя качества был выбран уровень пульсаций выпрямленного напряжения.

2. Доказано, что с точки зрения требуемой надежности и уровня пульсаций существует оптимальное количество фаз, удовлетворяющее этим критериям.

3. Для мини-ГЭС рекомендован вариант 6-ти фазной обмотки, соединенной в кольцо, работающей на двухполупериодный выпрямитель.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ВЫПРЯМЛЕННОМУ НАПРЯЖЕНИЮ И УРОВНЮ ПУЛЬСАЦИЙ МНОГОФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Для проверки теоретических выводов, приведенных в главах 2 и 3 был выбран имеющийся в лаборатории генератор для бортовой сети автотракторных транспортных систем. Магнитная система генератора имеет когтеобразную конструкцию и электромагнитное возбуждение. Статорная обмотка представляет собой классическую трехфазную якорную обмотку, соединенную в треугольник.

Генератор имеет следующие паспортные данные (табл.5.1):

Трехфазный синхронный генератор переменного тока Г288Е.3701 со встроенным выпрямительным блоком предназначен для работы в качестве источника электрической энергии параллельно с аккумуляторной батареей в системе электрооборудования автомобиля КраЗ с двигателем ЯМЗ 236, 238. Генератор предназначен для поставок на внутренний рынок и на экспорт в страны всех климатических зон.

Таблица 5.1. Основные параметры генератора

Номинальное напряжение, В	28
Максимальный выпрямленный ток, А	47
Масса, кг	10
Мощность, Вт	1300
Частота вращения вала без нагрузки, об/мин	1200
Частота вращения вала, об/мин/при токе, А	2100/30
Длина, мм	230
Диаметр, мм	174
Применяемость	КраЗ с дв.ЯМЗ 236

Данный генератор представляет собой серийное изделие и не предназначен для размещения в ней многофазной обмотки (рис. 5.В.1).



Рис.5. В.1. Основные части испытуемого генератора

Для проведения испытаний конструкция генератора была переделана. Когтеобразный ротор был переделан под четырехполюсную конструкцию. Железо статора имеет 24 паза, что позволяет разместить в них 6 фазную обмотку с числом пазов на полюс и фазу равным 2. В пазах расположена двухслойная обмотка. Число витков в секции 20, диаметр провода 1.15 мм. Ток возбуждения составил 1.2 А, что близко к номинальному току возбуждения штатного генератора. Концы фаз были выведены наружу, для возможности соединения их в звезду и кольцо. Для выпрямителя была выбрана двухполупериодная схема с 12-ю диодами. После сборки генератор был собран в испытательный стенд (рис.5. В.2.)

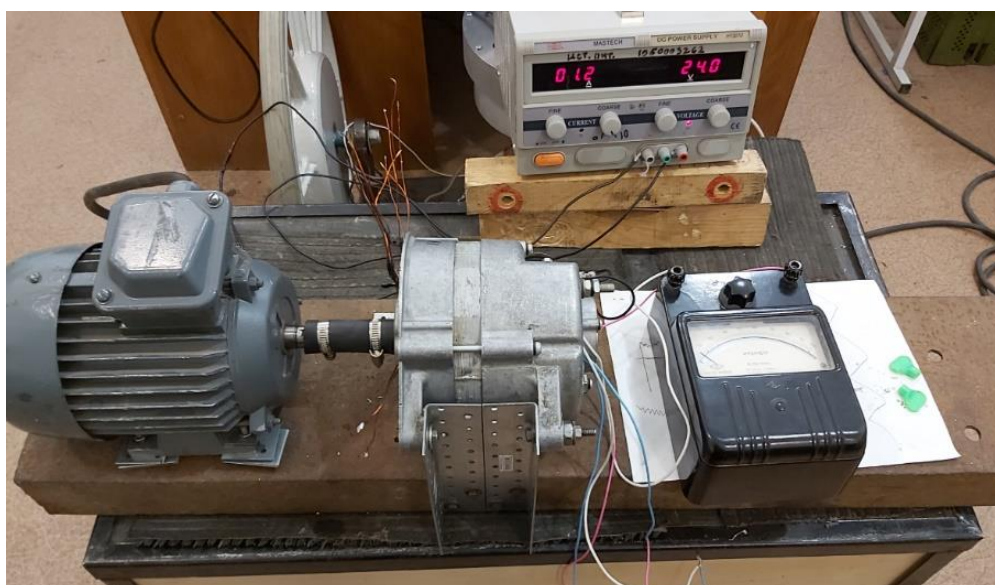


Рис.5.2. Стенд для испытания генератора в нормальном и нештатном режимах

В качестве привода использовался асинхронный двигатель с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

Для замера параметров применялись цифровые и аналоговые приборы класса точности 0.5.

Генератор испытывался без нагрузки на холостом ходу.

Результаты испытаний представлены ниже.

5.1. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду при работе на двухполупериодный выпрямитель

Испытание генератора проводилось на холостом ходу при нормальном режиме, нештатном режиме обрыва одной фазы и нештатном режиме обрыва одного диода по испытательным схемам, приведенным на рис. 5.1.1-5.1.3.

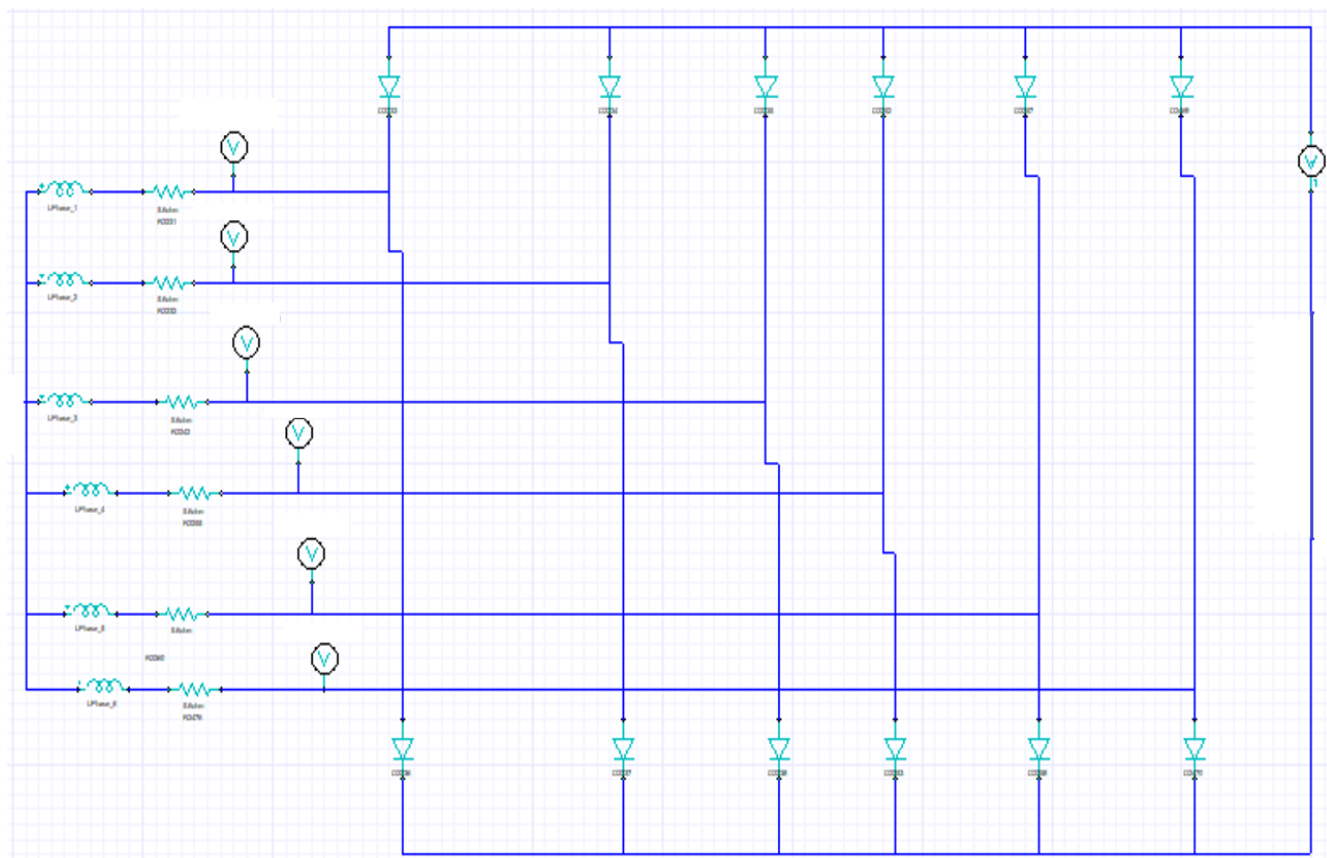


Рис.5.1.1. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду в штатном режиме на холостом ходу.

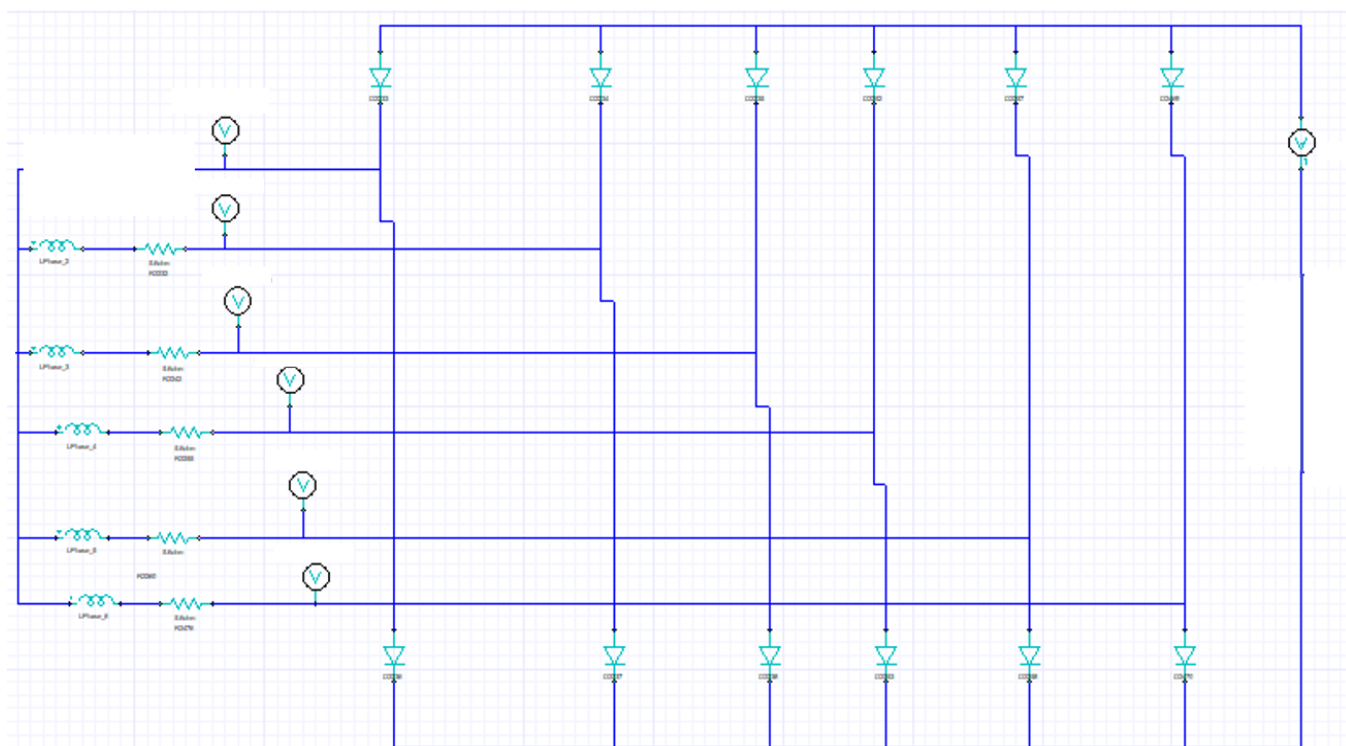


Рис.5.1.2. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду при обрыве фазы на холостом ходу

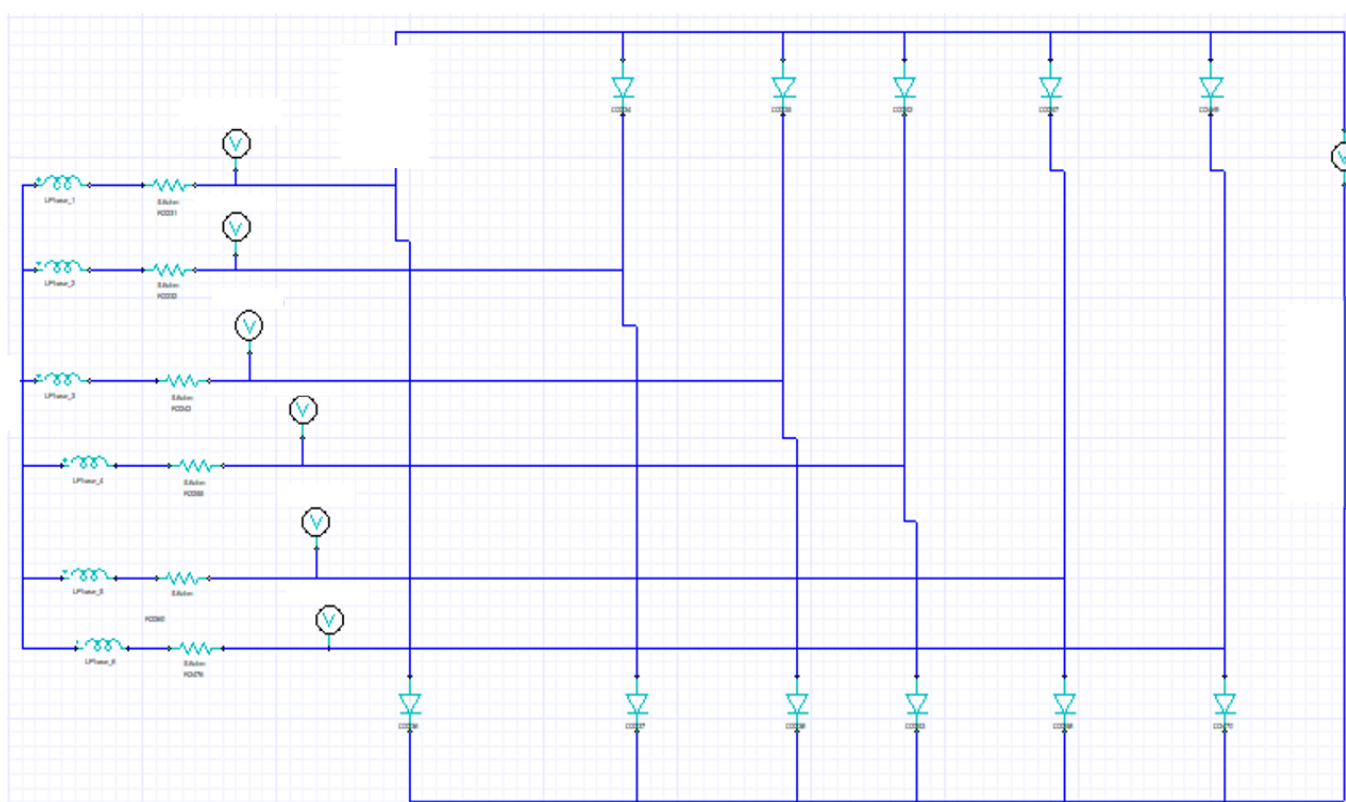


Рис.5.1.3. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду при обрыве диода на холостом ходу

Результаты испытаний представлены в табл.5.1.1.

Таблица 5.1.1. Результаты тестирования генератора при соединении фаз в звезду

Параметр/режим	Фазная ЭДС, В	Средняя ЭДС, В	Среднеквадратичная ЭДС, В	Уровень пульсаций
Нормальный режим	15.1	27.3	27.2	0.11
Погрешность при нормальном режиме	-	7.14 %	7.15 %	27 %
Обрыв фазы, тест	15.2	26.7	26.3	0.23
Погрешность при обрыве фазы	-	7.12%	7.13%	32%
Обрыв диода	15.1	26.23	26.4	0.19
Погрешность при обрыве диода	-	7.17%	7.11%	26 %

5.2. Тестирование генератора при соединении фаз в кольцо при работе на двухполупериодный выпрямитель

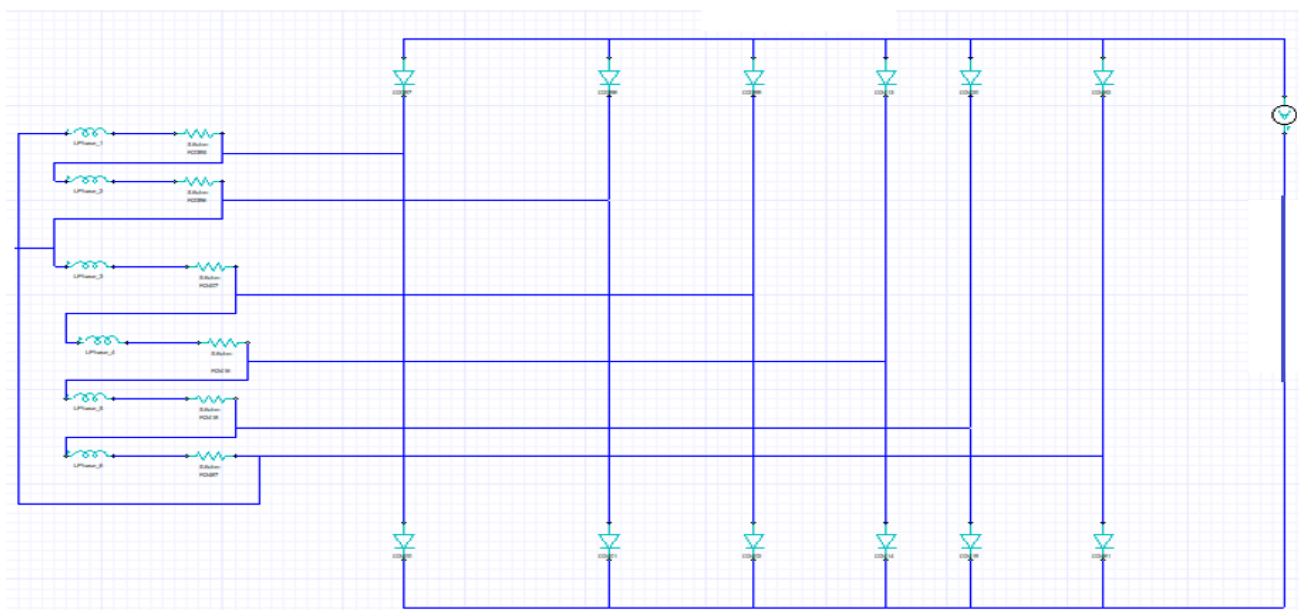


Рис.5.2.1. Тестирование генератора при соединении фаз в звезду в штатном режиме на холостом ходу

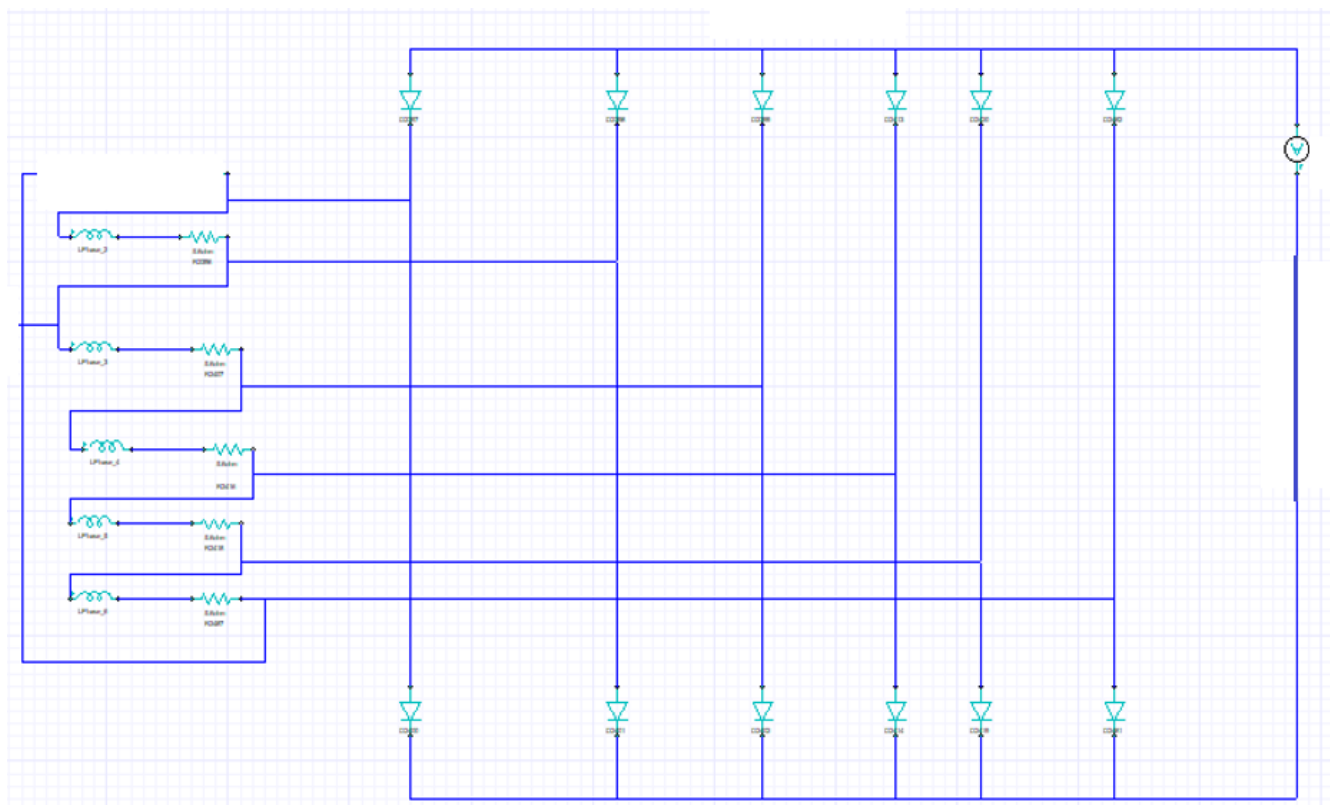


Рис.5.2.2. Тестирование генератора при соединении фаз в кольцо при обрыве фазы на холостом ходу.

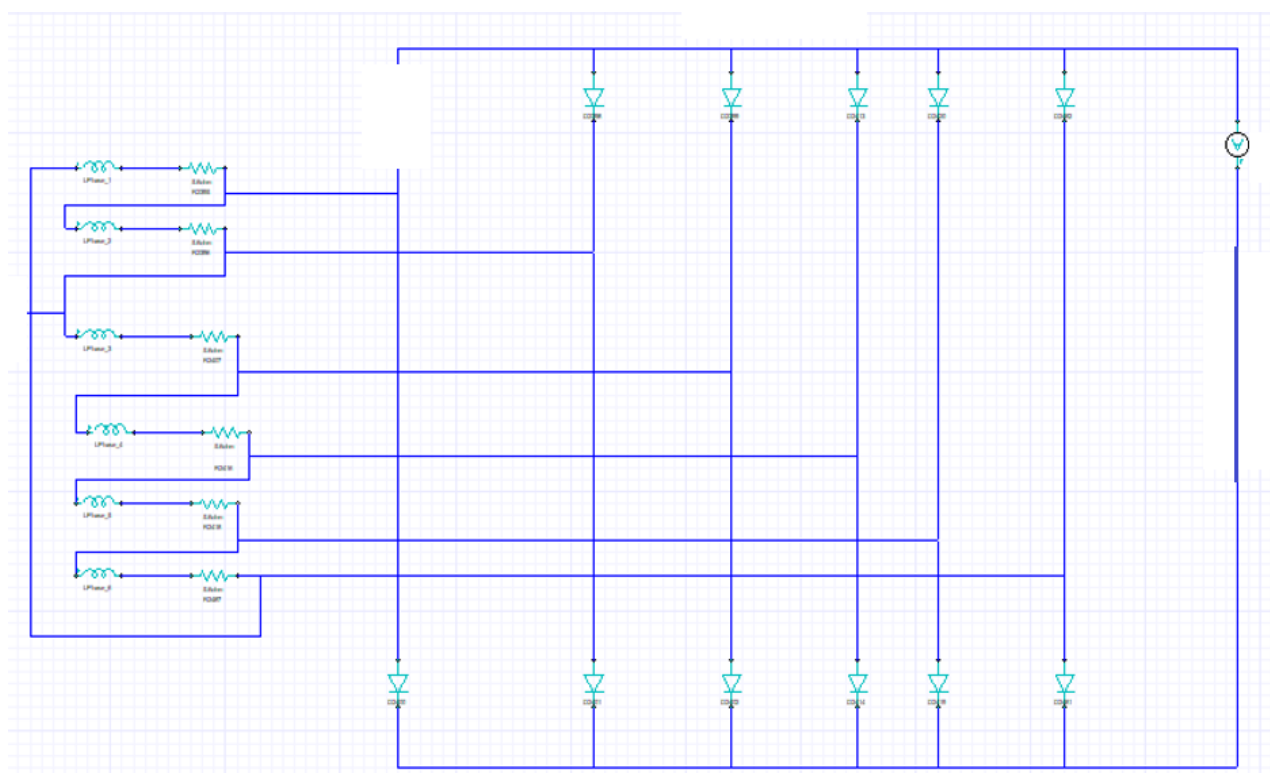


Рис.5.2.3. Тестирование генератора при соединении фаз в кольцо при обрыве диода на холостом ходу.

Таблица 5.2.1. Результаты тестирования генератора при соединении фаз в кольцо

Параметр/режим	Фазная ЭДС, В	Средняя ЭДС, В	Среднеквадратичная ЭДС, В	Уровень пульсаций
Нормальный режим	15.1	28.5	28.6	0.11
Погрешность при нормальном режиме	-	7.18 %	7.17 %	23 %
Обрыв фазы, тест	15.2	28.2	28.3	0.23
Погрешность при обрыве фазы	-	7.15%	7.13%	28%
Обрыв диода	15.1	27.7	27.9	0.21
Погрешность при обрыве диода	-	7.13%	7.11%	27 %

Полученные результаты испытаний показали, что разработанная цифровая модель и теоретические выкладки достаточно точны. По выпрямленному напряжению погрешность составила около 7.1%, а по уровню пульсаций погрешность находится в пределах 23- 28 %, что вполне приемлемо.

Вывод по главе 5

Результаты испытаний генератора подтвердили адекватность математических выкладок главы 2 и точность цифровой модели нормального и внештатного режима для шестифазного генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям можно сделать следующие основные выводы и рекомендации:

1. Основным параметром автоматических необслуживаемых мини-ГЭС является высокая надежность при заданном качестве вырабатываемой электроэнергии. Наиболее реальным направлением решения этой задачи является ориентация на создания комплекса многофазный вентильный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и многофазный двухполупериодный пассивный выпрямитель. Повышение надежности комплекса обусловлено его работоспособностью при отказе одной или нескольких фаз из-за обрыва или входа из строя диода.

2. Проведен анализ работы однополупериодного выпрямителя, двухполупериодного выпрямителя, мостового выпрямителя с многофазным генератором при изменении числа фаз. Сделан вывод о преимуществах этих схем друг перед другом. Полученные таблицы основных показателей для разных вариантов выпрямления и изменении фаз от 3-х до 9-ти можно использовать в инженерной практике для оценки и выбора вариантов выпрямления.

3. Для анализа эффективности выпрямительных схем при увеличении числа фаз была построена цифровая модель генератора и выпрямителя. Эта необходимость была обусловлена влиянием на показатели качества обмоточного коэффициента и коэффициента использования обмотки, работающей на выпрямитель. При этом для всех вариантов исследовался генератор, имеющий одинаковые габариты и основные размеры (диаметр расточки и активную длину), число полюсов и общее число проводников в пазах. Это позволило оценить эффективность получения выпрямленного напряжения и снижения уровня пульсаций выпрямленного напряжения при различных соединениях якорной обмотки в фазы и различных схемах выпрямления.

4. Проведены цифровые исследования однополупериодной схемы, двухполупериодной схемы при соединении фаз в звезду и кольцо, а также полные мостовые схемы при соединении мостов параллельно и последовательно.

Тестирование проводилось для нормального режима и нештатного режима обрыва фазы якорной обмотки или обрыва диода. В качестве показателей эффективности схем были приняты максимум среднего выпрямленного напряжения и минимум уровня пульсаций напряжения. Сделан вывод о необходимости оптимизации числа фаз как с точки зрения себестоимости, так и по показателям надежности.

5. Проведен анализ вероятности отказов при обрыве диодов и обмоток для генераторов с различным числом фаз коэффициентным методом расчета. В качестве показателя качества был выбран уровень пульсаций выпрямленного напряжения. Доказано, что с точки зрения требуемой надежности и уровня пульсаций существует оптимальное количество фаз, удовлетворяющее этим критериям.

6. Для мини-ГЭС рекомендован вариант 6-ти фазной обмотки, соединенной в кольцо, работающей на двухполупериодный выпрямитель.

7. Результаты испытаний генератора подтвердили корректность математических выкладок главы 2 и достаточную точность цифровой модели нормального и нештатного режима для шестифазного генератора.

Дальнейшее развитие данного научного исследования возможно в следующих основных направлениях:

1. Разработка многофазного генератора мини-ГЭС со встроенным выпрямителем и исследование параметров его надежности, включая надежность опор.

2. Разработка системы диагностики и предупреждения аварийных ситуаций для многофазного генератора мини-ГЭС.

3. Исследование многофазного генератора в комплексе с накопителем электроэнергии.

4. Разработка технологии силовых гибридных сборок для многофазного выпрямителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаева, Ф.С. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР/ Ф.С. Абдуллоева, Г.Б. Баканин, С.М. Гордон. – Л.: Недра, 1965. – 658 с.
2. Авакян, А.Б. Энергетические ресурсы СССР. Гидроэнергетические ресурсы / А.Б. Авакян и др.; под ред. А.Н. Вознесенского– М.: Наука, 1967. – 599 с.
3. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана. Воронин С.Г., **Давлатов А.М.**, Султонов О.О., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19.№3. С. 100-107.
4. Андрианова Р.А., Воронин С.Г. Оценка вероятности безотказной работы многосекционных вентильных двигателей.
5. Бальзанников, М.И. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования / М. И. Бальзанников, В.В. Елистратов – Самара, Изд. Сам ГАСУ, 2008. – 329 с.
6. Безруких, П.П. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / П.П.Безруких, В.В. Елистратов, Дегтярев В.В. Сидоренко Г.И. и др., под ред. П.П.Безруких. – М.: «ИАЦ Энергия», 2007. –272 с.
7. ГОСТ 27.003-90. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований надёжности.
8. ГОСТ 27.301-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – III, 15 с.
9. ГОСТ 27.005-97. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Минск: БелГИСС, 2005. – III, 44 с.
10. **Давлатов А.М.**, Косимов Б.И., Гулов Д.Ю., Султонов О.О. Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций Республики Таджикистан. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Казань, 20-21 марта 2019 ст.456-461.

11. **Давлатов А.М.,** А.М., Воронин С.Г. Тенденция развития малых ГЭС в горных регионах Республики Таджикистан. Двадцать шестая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" Москва, 12–13 марта 2020 года.ст 1099.
12. **Давлатов А.М.,** Воронин С.Г., Султлов О.О., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана. Вестник ЮУрГУ серия энергетик том №3.2019DOI: 10.14529/power190311.
13. **Давлатов А.М.,** Воронин С.Г., Клиначев Н.В., Пауков Д.В. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока. Вестник ЮУрГУ серия энергетик том №3.2020. DOI: 10.14529/power200311.
14. **Давлатов А.М.,** Гулов Д.Ю., Горт М.В. Эффективность электроснабжения горных районов Таджикистана. Международный научно-исследовательский журнал ▪ № 1 (103) ▪ Часть 1 ▪Январь.DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.008>.
15. **Давлатов А.М ,** Х. Д. Бобоев, Б. И. Косимов, Р. Т. Абдуллозода. Разработка компьютерной модели карьерной распределительной сети напряжением 6 кВ. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 2. – С. 3-8.
16. **Давлатов А.М,** Х. Д. Бобоев, Д. Ю. Гулов, Р. Т. Абдуллозода. Анализ эффективности мини-ГЭС систем электроснабжения горных районов Республики Таджикистан. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 120-126. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-120-127.
17. **Давлатов А.М,** Х. Д. Бобоев, Б. И. Косимов. Общая характеристика сопротивления изоляции относительно земли в сетях напряжением 6-10. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 10. – С. 51-54.
18. **Давлатов А.М,** Х. Д. Бобоев, Б. И. Косимов . Состояние малой энергетики в Республике Таджикистан и анализ традиционных структур мини-ГЭС. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 10. – С. 55-60.

19. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока.-М.:Высшая школа, 1982.
20. Вольдек А. И. Электрические машины. -М.: Энергия, 1974.-832 с
21. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.73-76.
22. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения: по материалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 2008г.: Прил. к журн. «Вестник Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности». - СПб. - Чита, 2008. - Т.13, №3. - С. 117-120.
23. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт АСГ1220-10000-380/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. - С.30.
24. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // 60-я юбилейная научная конференция, посвященная 65-летию университета. Секции технических наук: материалы конф./ Южно-Урал.гос. ун-т. - Челябинск, 2008.-Т.1.- С.161-162.
25. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 372-376.
26. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания// Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С.100-102.
27. Ганджа, С. А. Генератор для ветроэнергетических установок // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докл. / Одиннадцатая

Всероссийская научно-техническая конференция, 7-9 декабря 2005 г. - Томск, 2005. - С. 84-87.

28. Ганджа, С. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1 // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. – С.30.

29. Ганджа, С. А. Математическая модель вентильного многосекционного моментного двигателя на основе агрегированных переменных // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. - С. 8-13.

30. Ганджа, С. А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (ВМАЗ) // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21-23 июня 2005 г.): тез. докл./ Межрегион. совет по науке и технол. - Миасс, 2005. - С. 57.

31. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 358-360.

32. Ганджа, С. А. Некоторые проблемы разработки САПР вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 386-393.

33. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. - Вып.12, №34. - С.68-72.

34. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/С. А. Ганджа. - Свердловск, 1985. - 22 с.

35. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2005 г./ Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2005. – Т.2. - С. 82.
36. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2007. - Вып.8, № 20. - С.19-23.
37. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. -С. 13-21.
38. Ганджа, С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для ветроэнергетических установок // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.168-170.
39. Ганджа, С. А. Применение метода граничной коллокации для расчета магнитных полей в электрических машинах // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр./ Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1983. - С. 3-10.
40. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором/ С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедкер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 361-363.
41. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором// ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в

2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 164-167.

42. Ганджа, С. А. Разработка системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 378-385.

43. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля в вентильных электрических машинах постоянного тока с аксиальным зазором // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.89-91.

44. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева //ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования:тр. симпозиума: в 2 т. / Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г.- М.,2006. – Т.2.-С. 111-115.

45. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С. 84-86.

46. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А., Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т./ Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. - Т.1. - С. 76-80.

47. Ганджа, С. А. Экологически чистый возобновляемый источник электрической энергии ветроэнергетическая установка 10 кВт/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационные разработки малого бизнеса Челябинской области/М-во экон. развития Челяб. обл. - Челябинск, 2007. - Вып.2. - С.30-31.

48. Грачев П.Ю. Математические модели электромеханических и электромагнитных преобразователей для автономных энергетических установок. *Электричество*. 2010. № 3. С. 35–39.
49. Грачев П.Ю., Костырев М.Л., Кунцевич П.А., Конохов Н.Н. Особенности инновационных проектов ВЭУ и микро ГЭС с асинхронными генераторами. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2014. № 3 (8). С. 52-56.
50. Грачёв П.Ю., Костырев М.Л., Мягков Ф.Н., Кунцевич П.А. Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов. *Электротехника*. 2005. № 12. С. 24-29.
51. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 199 с.
52. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. Высшая школа, 1987.-245с.
53. Лукутин Б.В., Сипайлов Г.А. Использование механической энергии возобновляемых природных источников для электроснабжения автономных потребителей. Фрунзе.: Илим, 1987.- 135 с.
54. Лукутин Б.В., Обухов с.г. Динамика микрогидроэлектростанции савто балластной стабилизацией напряжения. *Электротехника*, 1989, N10.С. 9-12.
55. Лукутин Б.В. Способы стабилизации параметров электроэнергии автономных микрогидроэлектростанций. *Мех. и электрификация сельского х/ва*, 1987, N2 8. с.42-44.
56. Патент РФ 2704805. Универсальный каскадный многофазный аксиальный магнитоэлектрический генератор. Яковенко А.А.
57. Патент РФ 5032074/09. Якорь многофазного синхронного генератора. Пластун А.Т.
58. Патент РФ 2018110241. Аксиальная многофазная двухвходовая электрическая машина- генератор. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Варенов А.Б., Артемьев А.В.
59. Патент РФ 95118098. Многофазный генератор электрической энергии. Алан Блянше [FR], Рене Дамирон [FR]

60. Патент РФ 2016128644. Аксиальная многофазная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С.

61. Патент РФ 2 670 195. Ф. Порше (DE), Штефан (DE). Преобразователь, электрическая многофазная система и спосо, в котором их применяют.

62. Патент РФ 2010 116554. Система многофазного индукторного электропитания. БААРМЭН Дэвид В. (US), ГАТРИ Уоррен Э. (US), ДАКУОРТ Пол (US)

63. Патент РФ 92 5063088. Многофазный функциональный генератор. Симиглазов А.М.

64. Патент РФ 2.766875. Цифровой многофазный генератор.

Сучкова А.Б. Станков В.С.

65. Патент РФ 2017141689. Многофазный синхронный генератор с однополупериодным выпрямителем. Исмагилов Ф.Р.(RU), Вавилов В.Е., Фаррахов Д.Р., Минияров А.Х, Веселов А.М.

66. Патент РФ 93004739/07. Многофазная система коммутации и генераторная установка такой системы. Леонхард Виденхорн [CH].

67. Справочник «Надежность ЭРИ». – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.

68. Справочник «Надежность ЭРИ ИП». – М.: МО РФ, 2006.

69. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. – 1991.

70. Проектирование электрических машин. Под ред. и.п. Копылова. - М.:Энергия, 1980.- 496 с.

71. Официальный сайт Министерство энергетики и промышленности Республики Таджикистан [Сайт]. – URL: <http://www.minenergoprom.tj>.

72. Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии. Перспективы их использования и потребности в подготовке кадров. Обзор / Н. Друзь, Н. Борисова А. Асанкулова и др. – ЮНЕСКО; Алматы, 2010. –144 с.

73. Приступ, А. Г. Частотно-регулируемый торцевой асинхронный

электродвигатель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/А. Г. Приступ. - Новосибирск, 1990. - 16 с.

74. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Оптимизация режимов работы электромеханических систем: межвуз. сб. науч. трудов / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - С.127-132.

75. Пятаков А.В. Повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей выявлением витковых замыканий в трансформаторе 6-10/0,4 кВ. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. 05.20.02, Троицк, 2017.

76. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск.3. Бассейн р. Амударьи: Гидрометеоиздат, 1971. – 359 с.

77. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы: Аварии и инциденты: техническое пособие. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488 с.

78. Семкин, Б.В. Разработка систем управления "малой" энергетикой / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов. Тез. докл. к Третьей Междунар. Конф. Том II, часть I. - Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1995. - С. 118.

79. Семкин, Б.В. Выбор типа электрогенератора для мини-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн. - техн. творч. студ.: Сборник тез. 53-й научн. - техн. конф. студ., аспирант. и проф.- преподават. состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1996. - С. 141-142.

80. Семкин, Б.В. Использование возобновляемых энергоресурсов в малой энергетике / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Теплоэнергетика. – 1996, № 2. – С. 6-7.

81. Семкин, Б.В. Факторы, определяющие работу систем управления микро-ГЭС / Б.В. Семкин, П.П. Свит // Научн. - техн. творч. студ.: Сборник тез. 54-й научн. - техн. конф. студ., аспирант. и проф.- преподават. состава Алт. гос. техн. ун-та. Часть 2. Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. - 1996. С. 10-11.

82. Семкин, Б.В. Микро-ГЭС как автономный источник энергии / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Горы и человек: в поисках устойчивого развития. Тез. докл. на междунар. научн. - практ. конф. - Барнаул. – НИИ Горного природопользования. - 1996. - С. 248-250.

83. Семкин, Б.В. Проблемы использования микро-ГЭС на территории Алтайского края / Б.В. Семкин, А.П. Кротов, В.М. Иванов, П.П. Свит // Проблемы энергетики и пути их решения. Тез. докл. научн. - техн. семинара (Барселона). – Москва, 24-31 мая 1997. - С. 49-50.

84. Семкин, Б.В. Перспективы размещения малых и микро-ГЭС в предгорных районах Алтайского края и проблемы охраны окружающей среды в зонах их водохранилищ / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Т.Ю. Родивилина // Обской вестник. – 1997, № 1. - С. 55-66.

85. Семкин, Б.В. К вопросу о рациональном использовании автономных электростанций в труднодоступных районах / Б.В. Семкин, М.И. Стальная, П.П. Свит // Ползуновский альманах. – 1999, № 3. – С. 99-103

86. Семкин, Б.В. Малая энергетика – решение вопроса энергоснабжения Алтайского края / Б.В. Семкин, В.М. Иванов, П.П. Свит, Г.О. Клейн, Д.А. Бычков // Вестник алтайской науки: эффективность и безопасность энергосбережения. – Барнаул: изд-во АлтГТУ – 2004, №1 – С. 62-109.

87. Смолин, Н.И. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектростанций и малых ГЭС Таджикистан/Д.Ю. Гулов, Б.И. Косимов, О.О. Султонов // В сборнике: Приоритетные направления развития энергетики в АПК Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. – 2017. – С. 100-105.

88. Соболев, А.Н. Сравнение методов расчета однофазных КЗ в электроустановках до 1 кВ / А.Н. Соболев А.В. Богдан, В.А. Богдан, В.В. Савиных // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 11. – С. 30 – 31.

89. Соболев, А.Н. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора / А.Н. Соболев А.В. Богдан, И.А. Потапенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 8. – С. 13 – 14.

90. Соболев, А.Н. Токи повреждений в обмотках асинхронных генераторов с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболев А.В. Богдан // Кибернетика энергетических систем: материалы XXVIII сессии семинара «Диагностика энергооборудования» / ЮРГТУ. – Новочеркасск, 2006 / Ред. журн. «Изв. вузов – Электромеханика». – 2006. – С. 170 - 171.

91. Соболев, А.Н. Анализ неисправностей асинхронного генератора / А.Н. Соболев // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: сборник научных трудов / СГАУ. – Ставрополь, 2007. –С. 177 – 178.

92. Соболев, А.Н. Анализ повреждений в обмотках асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболев, А.В. Богдан // Перспективы и направления развития энергетики АПК: материалы Международной научно-технической конференции / БГАТУ. – Минск, 2006. – С. 40 – 42. 10. Соболев, А.Н. Защита при витковых замыканиях в обмотке статора асинхронных генераторов с емкостным возбуждением / А.Н. Соболев, А.В. Богдан, А.И. Богдан, М.М. Ключников // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. – Краснодар, 2006. – С. 192 – 196.

93. Соболев, А.Н. Использование методов расчета однофазных КЗ в электроустановках АПК / А.Н. Соболев, А.В. Богдан, В.В. Савиных // Энерго- и ресурсосберегающие технологии, и установки: материалы 4-й научной конференции факультетов механизации и электрификации / КубГАУ. – Краснодар, 2005. – С.115 – 1116. Соболев, А.Н. Токи при коротком замыкании витков в статорной обмотке асинхронного двигателя и генератора / А.Н. Соболев // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК / КубГАУ. – Краснодар, 2005. – С. 276 – 278.

94. Соболев, А. Н. Трехфазные короткие замыкания в обмотке статора асинхронного генератора / А.Н. Соболев, А.В. Богдан // Электроэнергетические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. – Краснодар, 2005. – С. 150-153

95. Совместный магнитно-тепловой конечно-элементный расчет неявнополюсного двигателя постоянного тока / Е.Б. Герасимов, Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов, Ю.Я. Щелыкалов // Электротехника. -1996. -№10. –С.39-42.
96. Способ диагностики работы двигателя: пат. 2154813 РФ, МПК G01M15/00. № 99105603/06; заявл. 19.03.1999; опубл.20.08.2000, Бюл. № 23. – 7 с.
97. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента: пат. 2188939 РФ, МПК7 E 21 B 44/06, E 21 B 45/00. № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25. – 6 с.
98. Таджикистан. Природа и природные ресурсы. – Душанбе: Дониш, 1982. – 96 с.152
99. Тимошевский, М.В. Кавитирующее обтекание уменьшенной модели направляющих лопаток турбины высокого давления / С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К. Ханялич// Международный журнал многофазного потока 78, – 2016, С. 75-87.
100. Тресман, А.Г. Кривые обеспеченности и естественная зарегулированность стока рек Таджикистана / А.Г. Тресман. – Душанбе: Дониш, 1969. – 168 с.
101. Тресман, А. Г. Определение годового стока на неизученных створах рек Памира /А. Г. Тресман // Доклад АН Тадж. ССР. – № 4. т. 11, Душанбе – 1959.– 98 с.
102. Тубис, Я. Б. База знаний «Тепловентиляционный расчет асинхронных двигателей» как составная часть расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД / Я. Б. Тубис, А. Э. Кравчик, А. С. Кобелев // Электротехника. - 2004. - №7. - С. 2-8.
103. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1, заявл. 29.09.2008; опубл.15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.
104. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 РФ, МПК G 06 F17/14. № 2010127068/08; заявл. 01.07.2010; опубл.20.12.2011, Бюл. № 35. – 9 с.

105. Февралев, А. В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках: Учебное пособие / А. В. Февралев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ. – 2014. – 181 с.
106. Федий, К. С. Низкоскоростной синхронный генератор автономных источников электроснабжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / К. С. Федий. - Красноярск, 2007. - 20 с.
107. Федянин, А. Л. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем / А. Л. Федянин, С. В. Леонов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8-11 декабря 2005 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. – Т. 1. -С. 258-259
108. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.
109. Фортов, В.Е. Энергетика в современном мире/ В.Е. Фортов, О.С. Попель. – Издательский Дом «Интеллект».: Долгопрудный, 2011. – 168 с. 3. Режимы внутригодового распределения стока рек Таджикистана: отчет о НИР / Тресман А.Г. – Душанбе: Отдел энергетики АН Таджикской ССР, 1959. – 103 с.
110. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
111. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. –Т. 317. – № 5. – С. 149–153.
112. Шульц, В.Л. Реки Центральной Азии/ В. Л. Шульц // Научно-исследовательский Институт по гидрометеорологии Центральной Азии. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 691 с.
113. Grachev P.Yu., Gorbachev E.E., Tabachinskiy A.S. Power Converters With Compact Winding Scigs For Hevs, Micro Hydroelectric Power Stations And Wind

Turbines In the collection: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings. 2016. C. 7

114. **A. Davlatov**, S. Voronin, B. Kosimov. Development Directions of Power Supply for Rural Areas of Tajikistan. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 157-161, doi:10.1109/URALCON.2019.8877688.

115. **Davlatov A.**, Gandzha, S., Aminov, D., Kosimov, B., Mahmudov, A. Development of a concept of an energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural. Advanced Problems of Electro technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 950 (2020) 012004 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/950/1/012004.

116. **Davlatov A.**, S. Voronin, B. Kosimov, Comparative Evaluation of Connection Schemes of Synchronous Generator Windings as Part of Dc Sources. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112072

117. **A. Davlatov**, S. Voronin, O. Sultonov. Features of Balancing a Three-Phase Step Voltage at the Output of Semiconductor Converters. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 119-123, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234355.

118. **A. Davlatov**, B. Kosimov, S. Gandzha, D. Aminov, D. Gulov, I. Abdulloev. Development brushless direct current electric motor of the Pilger mill drive for the technology of seamless pipes manufacturing based on the magnetic system with claw-poles.

119. Advanced Problems of Electro technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 950 (2020) 012004 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/950/1/012004

120. **A. Davlatov**, S. S. Tavarov, K. Boboev. "Optimization of the 220 Kv Power Grid by Reactive Power. " 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 541-545, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559484

121. K. Boboev, A. Sidorov, **A. Davlatov**, "Evaluation of Indirect Methods for Determining the Isolation Parameters of the Network Phases Relative to the Ground on a Computer Model. ," 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 556-560, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.

118.**A. Davlatov**, S. Voronin, O. Sultonov. "Features of the Construction and Use of Small Hydroelectric Power Plants for Power Supply of Mountainous Regions of Tajikistan," 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 634-638, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559525

122. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator / A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler, / 1st International Electric Drives Production Conference 2011, –EDPC-2011 – Proceedings 6085557, – P. 93-100.

123. Frede Blaabjerg, Tomislav Dragicevic, and Pooya Davari, “Applications of Power Electronics Department of Energy Technology,” Aalborg University, 9220, 2019,

124. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 15-18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.

125. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018Chelyabinsk, Russia. DOI:10.1109 / URALCON.2018.8544320 pp. 282-287

126. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Bakhtiyor K. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia DOI: 10.1109 / GloSIC.2018.8570132

127. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Selecting Optimal Design of Electric Motor of Pilgrim Mill Drive for Manufacturing Techniques Seamless Pipe. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 25-29 March 2019.Sochi, Russia DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742941

128. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ECF Paper 25-29 March 2019 Sochi, Russia, DOI: 10.1109 / ICIEAM.2019.8742976.
129. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con) 2019. 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia.DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877650
130. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Application of the combined excitation submersible hydrogenerator as an alternative energy source for small and medium rivers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia.DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915294.
131. Moshkin, V.I., Shestakov, D.N., Ugarov, G.G. Energy Modes of the Pulse Linear Electromagnetic Motor with Effective Transformation of Magnetic Energy // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 2018, 8602832
132. Moshkin, V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings, 2017, 8076319
133. S. A. Haritonov and V. M. Berestov, "Analysis of sinusoidal PWM with natural sample (methodical aspect)," Technical electrodynamics. Special Issue: Power Electronics and energy efficiency, part 2, pp. 31–37, 2002.
134. Haval Sardar Kamil and Dalila Mat Said, "Control Strategy for a Three Phase Four-leg Grid Connected PV Inverter under Unbalanced Faults," Centre of Electrical Energy Systems, 2018.

135. Hongtao Shi, Fang Zhuo, and Hao Yi, "Control strategy for microgrid under three-phase unbalance condition," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 4(1), pp. 94–102, 2016. DOI: 10.1007/s40565-015-0182-3
136. P. Hsu and M. Behnke, "A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load," *Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 2, pp. 1369– 1374, 1998.
137. Jofey Simon, "Control of a four leg inverter for unbalanced power networks," *MTPS, CUFE, Bangalore, India (ONLINE)*: 2394–0697, vol. 2, is. 3, pp. 72–77, 2015.
138. A. Kouzou, M. O. Mahmoudi, and M. S. Boucherit, "The Space Vector Modulation PWM Control Methods Applied on Four Leg Inverters Djelfa University and ENP Algiers," Algeria. [Online]. Available: www.intechopen.com
139. Lewis, B.J. Unsteady computational fluid dynamic analysis of the behavior of guide vane trailingedge injection and its effects on downstream rotor performance in a francis hydroturbine / B.J. Lewis, J.M. Cimbala // *Journal of Turbomachinery*. – 2015. – Vol. 137 (8). – 81001. DOI: 10.1115/1.4029427
140. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of TurboGenerators Based on the Thermodynamics Modeling Method // *Journal of Power Electronics*. – 2011. – Vol. 11. – № 3. – P.759–766.
141. Li, X. Guide vane asynchronous closure mode for improving the transient quality of hydroturbinen /X. Li, J. Chang, C. Li // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. – 2014. – Vol. 33 (1). – P. 202–206. DOI: 10.1115/1.4036234
142. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings // *J. Electromagnetic Analysis & Applications*. – 2009. – № 3. – P.187–191.
143. M. N. Marwali, D. Min, and A. Keyhani, "Robust stability analysis of voltage and current control for distributed generation systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 516–526, 2006.
144. M. Mokhtari, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, and F. Aminifar, "Design of an Asymmetrical Three-phase Inverter for Load Balancing and Power Factor Correction

Based on Power Analysis,” Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 6, no. 3, pp. 293–301, 2011.

145. Petrov, G.N. Tajikistan`s Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus / G.N. Petrov // Center for Social and Political Studies. Sweden. – 2003. – №33 (21), – pp. 153–161.

146. Raef Aboelsaud and A. Ibrahim, “Voltage Control of Autonomous Power Supply Systems Based on PID Controller Under Unbalanced and Nonlinear Load Conditions,” 2019. DOI: 10.1109/REEPE.2019.8708841.

147. P. Rioual, H. Pouliquen, and H. P. Louis, “Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation,” Proc. 5th Eur. Conf. Power Electron. Appl., vol. 4, pp. 8–14, 1993.

148. Pavlov, N. V. Multi-agent Approach to Modeling of Electrotechnical Complexes Elements at the Oil and Gas Production Enterprises / N. V. Pavlov, A. B. Petrochenkov // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1504-1508. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506. – EDN FQRQNT

149. Petrochenkov, A. B. Development of a Method for Optimizing Power Consumption of an Electric Driven Centrifugal Pump / A. B. Petrochenkov, S. V. Mishurinskikh // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1520-1524. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396730. – EDN CVBBNV.

150. Sergey Gandzha, Bakhtiyor Kosimov, Dilshod Aminov. Development of analysis methods for Clow Pole Synchronous Motor of the Pilger mill for the Manufacturing of Seamless Pipers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. . 4-5 Oct. 2019Magnitogorsk, Russia DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915343

151. Sergey Gandzha. Dilshod Aminov, Bakhtiyor Kosimov, Rustam Nimatov, **Azamdzhon Davlatov** and Azamjon Mahmudov. Development of a concept of an

energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019). Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 18 December 2019 St. Petersburg, Russia. DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011009>

152. T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, “A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island,” IEEE Trans. Energy Convers, vol. 21, no. 2, pp. 406–414, 2005.

153. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C>.

154. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient / H. Li, D. Chen, F. Wang, H. Zhang // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. – 2017. – Vol. 139 (10). – 101002.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Гидроэнергетические ресурсы республики Таджикистан

Республика Таджикистан обладает огромными гидроэнергетическими ресурсами, составляющими 527 миллиардов кВтч /год. С учетом технических условий гидроэнергетические ресурсы Таджикистана составляют 317 миллиардов киловатт-часов, из которых в настоящее время используются только 4-5 процентов.

Республика Таджикистан по своим гидроэнергетическим ресурсам занимает восьмое место в мире после Китая, России, США, Бразилии, Конго, Индии и Канады и первое место среди стран Центральной Азии. Энергетический сектор Республики Таджикистан составляет до 95% гидроэнергетики.

Гидроэнергетический потенциал Таджикистана в три раза превышает текущий спрос на электроэнергию во всех странах Центральной Азии. При рациональном использовании этих ресурсов можно обеспечить регион дешевой и экологически чистой электроэнергией. Основная часть этих ресурсов сосредоточена в бассейнах рек Пяндж, Вахш, Сырдарья, Кафирниган, Зарафшан и Бартанг. [<https://www.mewr.tj/>]. Малые и крупные реки Таджикистана составляют около 947 протяженностью каждого из них более 10 км, и общая протяженность составляет 28500 км. Таджикистан имеет большие гидроэнергетические и водные ресурсы. Мощность энергии рек и озер Республики Таджикистан составляет 64 млн. кВт.

Сырдарья - одна из основных и важных рек Средней Азии площадью 443 м², расположенная между 39 ° 23' - 46 ° северной широты и 61 ° - 78 ° 24 'в.д., ее длина с юга на север 800 км и от Востока на Запад - 1600 км. Река Сырдарья занимает 32% территория Средней Азии. Годовой расход воды 14 км³. Источником воды в реке Сырдарья во многом являются западные части гор Тяньшань, гребни Олоя и северные склоны Туркестанских гор.

1. Река Норин является основным источником реки Сырдарья, которая берет начало от вод центральной части Тяньшана.

2. В Ферганской долине также есть реки и озера, которые не доходят до реки Сырдарья.

3. Юго-западная децентрализация Каратагум. Следует отметить, что северная часть реки Сырдарьи расположена в регионе Восточной Атлантики, юго-западном субконтиненте и континентальном климате.

Река Вахш является одним из крупнейших притоков реки Аму, расположенной в восточной части горной системы Олой, протяженностью более 524 км. Площадь бассейна Вахш составляет 39100 км², а крупнейшие притоки Вахша берут начало с нижнего Олая, также известный как Кизилсу, некоторые притоки Кизилсу, которые протекают через Долину Олой присоединяются в реку Мугсу. Мугсу протекает на север западе Памира и называется Баландикик. Мугсу и Кизилсу при образуют реку Сурхоб. Западнее от Сурхоба протекает река Хингоб, вместе они образуют реку Вахш. Река Вахш расположена между различными речными бассейнами. В разные периоды года поток воды становится меньше или больше. Июнь, июль является самыми полноводными месяцами. Скорость течения составляет 836 м³ в секунду, что составляет 20,4% годового дефицита. Недосток воды приходится на декабрь, январь, февраль и март. Поэтому река Вахш является важным местом для развития производительных отраслей Таджикистана. Река Вахш вместе с Пянджем составляют более 75 % энергетических ресурсов страны. Рельеф - скалистая местность, климатические условия в этом районе основные причины полноводия и быстроты течения в реке Вахш. Эти условия позволяют производить от одного километра реки около 13 000 кВт электроэнергии в год. Вахш - одна из самых важных рек Средней Азии.

Гидроэнергетические ресурсы реки Пяндж.

Гидроэнергетический потенциал реки Пяндж оценивается в 122,9 миллиарда кубометров. При этом технически и экономически обоснованные ресурсы для строительства гидроэлектростанций составляют 82 млрд кВтч. Согласно имеющемуся анализу, в настоящее время существует 14 приграничных участков для строительства гидроэлектростанций с водохранилищами, только один из которых находится в эксплуатации. Рассматривается река, одна из пяти крупнейших рек Чодарозии 921 км, Очамкунии площадью 114000 км² и с объемом

стока 33,4 км². Протяженность этой реки разделяет границу Республики Таджикистан с Исламской Республикой Афганистан.

Гидроэнергетические ресурсы реки Вахш

Гидроэнергетическая мощность реки Вахш составляет 251,15 миллиарда кВтч, а технически и экономически обоснованные ресурсы для строительства гидроэлектростанций - 37 миллиардов кВтч. Согласно имеющемуся анализу, в настоящее время существует 9 подходящих площадок для строительства гидроэлектростанций с водохранилищами. В настоящее время на 7 из них построены гидроэлектростанции общей мощностью 4 775,05 МВтч.

Река Вахш - одна из крупнейших рек Республики Таджикистан. Других рек и других притоков, впадающих в бассейн реки Вахш, составляет 6276 единиц общей протяженностью 17073 км. В бассейне реки Вахш сотни ледников общей площадью около 5000,2 м² из которых доступны. В бассейне реки Вахш также есть 569 горных озер общей площадью 17,37 км².

Гидроэнергетические ресурсы реки Зарафшан

Гидравлическая мощность реки Зарафшан составляет 33,94 млрд кВтч, что вместе с технически осуществимыми и экономически обоснованными гидроресурсами для строительства гидроэлектростанций составляет 10,55 млрд кВтч. Согласно существующему анализу, существует 13 подходящих площадок для строительства гидроэлектростанций и водохранилищ. Длина реки составляет 877 км, а общая площадь реки составляет 12,3 тыс. км².

Гидроэнергетический ресурсы реки Кафирноган

Гидравлическая мощность реки Кафирниган составляет 37,22 млрд кВтч, что вместе с технически осуществимыми и экономически обоснованными гидроресурсами для строительства гидроэлектростанций составляет 8,7 млрд кВтч. Согласно имеющемуся анализу, есть 6 подходящих площадок для строительства гидроэлектростанций и водохранилищ.

Гидроэнергетический ресурсы реки Сурхоб и Обихингоу

Реки Сурхоб и Обихингоу берут начало в реке Вахш и имеют энергетическую мощность 36,32 миллиарда кВтч. При этом технически осуществимые и

экономически обоснованные гидроресурсы для строительства гидроэлектростанций составляют 16,46 млрд кВтч. Согласно существующему анализу, есть 4 подходящих участка в бассейне реки Сурхоб и 5 подходящих участков для строительства гидроэлектростанций в бассейне реки Обихингоу.

В Таджикистане в начале XX-го века в связи с отсутствием промышленных предприятия электричество почти не использовалось. Были малые предприятия, которые функционировали за счет выработка электроэнергии автономных электростанций (дизельный генератор), находящихся на их территории. Такие, как известной малой фабрики «САНТО» построенный в 1907 году, мощностью 365,78 кВт, в районе Исфара.

Первая электростанция в Таджикистане была построена в 1913 году в реке Гунд, города Хорог, для обеспечения электрической освещении пограничной службы данного города.

Для обеспечения центра страны электричеством в 1927 году планировались построение новых электрических станций в реке Варзоб. 25 февраля 1931 года была начато строительство гидроэлектростанции Варзоб мощностью 7200 кВт. Таким образом строительство названной электростанции занимало 6 лет и 31 декабря 1936 года станция запущена в эксплуатацию.

В последующие годы в стране построено несколько электростанций (Шаартуз, Исфара, Канибадам) суммарной мощностью более чем на 17,3 МВт.

В 1949 году в составе каскада Варзоб появилась вторая электростанция мощностью 14,4 МВт, Варзобская ГЭС-2. А в 1952 году была сдана в эксплуатации Варзобская ГЭС-3, мощностью около 3,5 МВт.

В Республике Таджикистан первая энергетическая программа, учитывавшая сельскохозяйственную направленность экономики, была создана в 1949-1950 годах. Было решено, что развитие энергетики в Республике Таджикистан будет опираться на гидроэнергоресурсы, потому что запаса нефти и газа в регионе практически нет, а запасы угля труднодоступны.

Исходя из этого можно сказать, что во второй половине минувшего века, особенно с 1950-х по 1980-е годы, энергетика Республики развивалась весьма интенсивно.

Суммарная установленная мощность всех электростанций республики составляет 5357,686 МВт (на 2015 год). При этом более 92% электроэнергии в стране вырабатывается на ГЭС.

Каскад ГЭС, расположенный на реке Вахш, является основным источником электроэнергии в Таджикистане. Установленная мощность Вахшского каскада составляет 4775 МВт, что составляет более 89% суммарной мощности ЭЭС. Таким образом в Республике Таджикистан производство электроэнергии почти полностью зависит от ГЭС.



Рис. П.1. Вахшский каскад ГЭС

В Республике Таджикистан актуальными народнохозяйственными задачами являются обеспечение электроэнергией ряда отдельных и труднодоступных районов, а также выработка электроэнергии на ГЭС без отрицательного воздействия на экологию. Кроме того, важной задачей является использование для

выработки электроэнергии гидропотенциал искусственных водотоков, созданных для нужд сельского хозяйства.

На данный момент в республике находится масса потребителей, находящийся на дальних районах горной местности (в основном населенные пункты).

Основной проблемой систем электроснабжения горных районов Таджикистана является нехватка электроэнергии. Для устранения дефицита электрической энергии в энергосистеме правительство Республики Таджикистан одобрило закон, который включает в себя несколько проектов, одним из которых является использование малых гидроэлектростанций, от 02 февраля 2009 г. под № 73 “ДОЛГОСРОЧНАЯ ПРОГРАММА СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПЕРИОД 2009-2020 ГОДОВ”. Таблица дефицита электроэнергии в республике показан в таблице П.1. Таким образом, основной упор при устранении дефицита электроэнергии делается на строительство малых ГЭС.

Таблица П.1. Дефицит электроэнергии в республике Таджикистан

Период	Выработка кВтч	Потребление кВтч	Дефицит кВтч
2007	17340245	17493136	-152891
2008	15921127	16839440	-918313
2009	15910448	16028129	-117681
2010	16246123	16487860	-241737
2011	16061871	16060308	1563
2012	16790294	16129645	660649
2013	16926945	15982752	944193
2014	16260070	14950994	1309076
2015	16961557	15628619	1332938
2016	17037613	15718209	1319404
2017	18090773	16730307	1360466

Таким образом, предполагается, что строительство малых ГЭС в стране позволяет устранить проблемы, связанные с электроснабжением труднодоступных мест Республики Таджикистан.

Согласно закону, в период с 2009 по 2020 год в стране построено и используется более 189 малых ГЭС общей полезной мощностью 26,8 МВт.

На рис.П.2 показана карта рек и водохранилищ в Республике Таджикистан и потенциальных мест для небольших гидроэлектростанций, а также малых гидроэлектростанций.

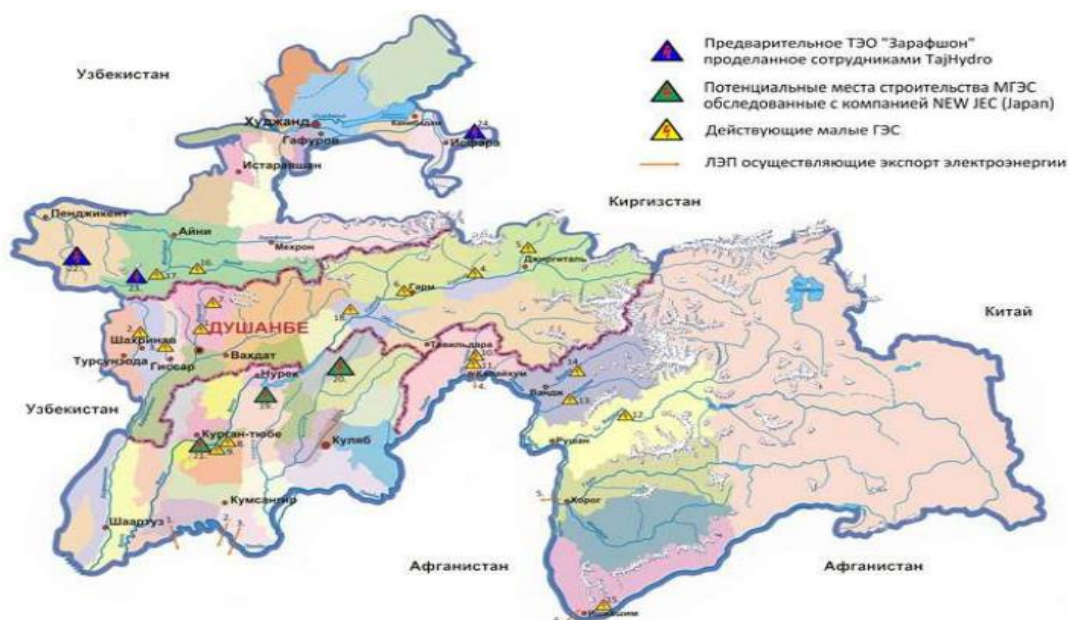


Рис.П.2 Карта рек и водохранилищ в Республике Таджикистан

Например, село Сангикар в Раштском районе численностью населения более 200 чел., находятся на расстоянии 40 км от центра района, в котором находится подстанция «Племсовхоз 110/10 кВ».

Село Сари Осёб в Ховалинском районе находится на дальнем расстоянии от ближайшей подстанции. Расстояние от населенного пункта Сари Осиёб до подстанции «Ховалинг 35/10 кВ» составляет около 50 км. Численность населения данного село составляет около 150 чел.

Деревня Марзич Айнийского района расположена на расстоянии 35 км от ближайшей подстанции «Айни 35/10 кВ», которая находится в центре района. В данной деревне живут более 150 чел.

Труднодоступные места в горных районах республики Таджикистан приведены в таблице П.2.

Таблица П.2. Труднодоступные места в горных районах республики Таджикистан

Поз.	Населенные пункты	Расстоянии населенные пункты от центра района	Потребление	Мощность ГЭС кВт
1	Булнкуль	90	32	25
2	Пасор	125	27	20
3	Хиндукуш 1	105	23	20
4	Хиндукуш 2	116	33	32
5	Хавдж	130	18	20

Таким образом, подключение указанных населённых пунктов к энергосистеме линией напряжением 6 или 10 кВ экономический не выгодно. Также существует ряд проблем, связанных с горным рельефом территории Таджикистана. Развитие малой энергетики в далёких селах Республики Таджикистан является решением проблемы электроснабжения населенных пунктов горной местности страны.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Справка о внедрении результатов
диссертационной работы в Институте энергетики Таджикистана**

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Института энергетики Таджикистана,
кандидат химических наук, доцент

Исозода Д.Т.

_____ 2022 г.



СПРАВКА

о внедрении результатов

диссертационной работы А.М. Давлатова

**«Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса мини
ГЭС на базе многофазного вентильного генератора»**

Настоящей справкой подтверждают, что результаты диссертационной работы Давлатова Азамджона Махмадиевича «Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса мини ГЭС на базе многофазного вентильного генератора» внедрены в учебный процесс Института энергетики Таджикистана, в частности:

– при изучении студентами электроэнергетического факультета специальности “Электрические станции” и “Электрические сети и системы” математические модели для исследования электромагнитных процессов в электрических машинах, методики анализа коротких замыканий.

Заведующий кафедрой
электрических станций
Института энергетики Таджикистана
кандидат технических наук

Косимов
Бахтиёр
Исматуллоевич

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственную и научную деятельность ООО НПП «Привод»

Утверждаю
Директор ООО НПП «Привод»
 В.В. Мاستюкин
« 30 » _____ 2022



Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
в производственную и научную деятельность предприятия
ООО НПП «Привод»

Комиссия в составе

Председатель : директор Мастюкин В.В. ООО НПП «Привод»

Члены комиссии:

Дунаев А.Б – технический директор ООО НПП «Привод»;

Лободин С.И. – главный конструктор ООО НПП «Привод»

составили настоящий акт в том, что следующие результаты диссертационной работы Давлатова Азамджона Махмадиевича «Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса мини ГЭС на базе многофазного вентильного генератора», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук используются в производственной и научной деятельности предприятия:

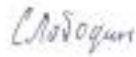
- зависимости среднеквадратичного выпрямленного напряжения, уровня пульсаций и коэффициента использования обмотки якоря при работе генератора на пассивные выпрямители

- цифровая комплексная модель генератора и неуправляемого вентильного выпрямителя при произвольном числе фаз, реализованная в программной среде Ansys Electronics Desktop;

- зависимости уровня пульсаций при различных отказах фаз якорной обмотки, соединенных в кольцо и звезду и электронных компонентов выпрямителя.

Акт составили:

Технический директор ООО НПП «Привод»  А.Б. Дунаев

Главный конструктор ООО НПП «Привод»  С.И. Лободин