

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»  
(СПбГМТУ)**

На правах рукописи



**Кузнецов Виктор Иванович**

**БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ЕДИНЫЕ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доктор технических наук, профессор  
Сеньков Алексей Петрович

Санкт-Петербург  
2015

## Содержание

Введение.....	4
Глава 1 Обзор современных ГЭУ .....	9
1.1 Анализ современных ГЭУ.....	9
1.1.1 ГЭУ «Азипод».....	9
1.1.2 ГЭУ с ВРК .....	20
1.1.3 Единая электроэнергетическая система .....	24
1.1.4 Типы гребного электродвигателя.....	27
1.1.5 Типы преобразователей частоты для ГЭУ .....	33
1.2 Типовые структуры ГЭУ.....	42
1.2.1 Малое гидрографическое судно «Вайгач» .....	42
1.2.2 Спасательное судно «Игорь Белоусов».....	44
1.2.3 Круизное судно «Norwegian Epic» .....	46
1.2.4 Паром «Schleswig-Holstein».....	47
Выводы по Главе I.....	49
Глава 2 Судовые бестрансформаторные электроэнергетические системы ....	51
2.1 Судовые бестрансформаторные ЭЭС с многофазными генераторами.....	53
2.2 Судовые бестрансформаторные ЭЭС с многоуровневыми инверторами .....	57
2.3 Wärtsilä Low Loss Concept.....	65
2.4 Судовая бестрансформаторная СЭЭС с шестифазными генераторами и многоуровневыми инверторами .....	68
Выводы по Главе II.....	73
Глава 3 Математическое моделирование блоков ЕЭЭС .....	74
3.1 Трехфазный синхронный генератор .....	74
3.2 Двухобмоточный синхронный генератор.....	79
3.3 Трехфазный асинхронный электродвигатель .....	85
3.4 Преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения и широотно-импульсной модуляцией.....	90
Выводы по Главе III.....	98

Глава 4 Компьютерное моделирование схем СЭЭС .....	99
4.1 Моделирование типичной схемы СЭЭС .....	99
4.1.1 Оценка качества тока ГЭД.....	101
4.1.2 Оценка качества напряжения на ГРЩ.....	106
4.2 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с многоуровневым АИН. Вариант 1.....	109
4.3 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с многоуровневым АИН. Вариант 2.....	118
4.4 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с двухобмоточным генератором.....	127
4.5 Анализ результатов моделирования .....	135
Выводы по Главе IV.....	136
Заключение .....	137
Список используемой литературы .....	140
Приложение А .....	144
Приложение Б.....	146
Приложение В .....	155

## **Введение**

**Актуальность темы.** В настоящее время системы электродвижения (СЭД) находят широкое применение в судостроении России и в ведущих зарубежных судостроительных фирмах. Это связано с рядом преимуществ по сравнению с традиционными пропульсивными комплексами, среди которых следует выделить:

- повышение надежности судовой электроэнергетической установки (СЭЭУ) и пропульсивного комплекса;
- улучшение маневренности судна;
- повышение КПД энергетической установки в долевых режимах;
- снижение эксплуатационных расходов;
- уменьшение сроков ремонтных работ;
- снижение вредных выбросов в атмосферу;
- возможность более рационального размещения оборудования на судне.

Современные полупроводниковые преобразователи частоты, обеспечивающие управление мощными гребными двигателями переменного тока, создают незначительные искажения синусоидального напряжения первичной электрической сети, что позволяет решить проблемы электромагнитной совместимости мощных ГЭУ и других судовых потребителей электроэнергии. Это позволило объединить судовую электростанцию и все потребители электроэнергии в единую электроэнергетическую систему (ЕЭЭС). Основные достоинства ЕЭЭС, включающей ГЭУ, приведены в [1, 9]:

- возможность оптимизации режимов работы первичных двигателей, сокращение их числа, снижение расхода топлива и вредных выбросов;
- повышение надежности ЭЭС;

- повышение маневренности судов и безопасности плавания, за счет широкого диапазона регулирования частоты вращения и быстродействия гребных электродвигателей;
- гибкая компоновка элементов ЕЭЭС на судне, освобождение большого объема судовых помещений под полезную загрузку.

Применение в составе судовых систем электродвижения современной силовой полупроводниковой техники и винторулевых колонок требует по-новому подходить к вопросу проектирования ЕЭЭС. При этом следует учитывать также особенности данных установок, как соизмеримость мощности источников и приёмников электроэнергии, сравнительно небольшую протяжённость линий электропередач, широкий диапазон изменения нагрузки в эксплуатационных режимах работы судна, наличие мощных полупроводниковых преобразователей, влияющих на качество электроэнергии в судовой сети.

**Цели и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является предложение и исследование в установившемся режиме схем бестрансформаторных ЕЭЭС методом компьютерного моделирования. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ современных ЕЭЭС и их основных элементов;
- провести анализ современных бестрансформаторных ЕЭЭС и их основных элементов;
- разработать математическую модель синхронного генератора;
- разработать математические модели преобразователей частоты на базе двухуровневого и трехуровневого автономных инверторов напряжения;
- разработать математическую модель гребного электродвигателя переменного тока с одной трехфазной обмоткой на статоре.

**Объект исследований.** Объектом исследований являются бестрансформаторные ЕЭЭС в установившемся режиме.

**Предмет исследований.** Предметом исследований является математические модели бестрансформаторных ЕЭЭС, реализованных в компьютерной среде MATLAB/Simulink.

В первой главе проанализированы современные ГЭУ. Рассмотрены типы судовых движителей, применяемых в ГЭУ. Указаны основные типы судового электрооборудования входящих в ГЭУ. Приведены структуры ЕЭЭС современных судов.

Во второй главе проведен патентный поиск, на основании которого приведены схемы бестрансформаторных ЕЭЭС. Указаны схемы бестрансформаторных ЕЭЭС выполненных на базе многоуровневых инверторов напряжения и многофазных синхронных генераторах.

В третьей главе приведено математическое описание основных агрегатов входящих в ЕЭЭС. Приведено математическое описание трехфазного синхронного генератора. Приведено математическое описание двухобмоточного синхронного генератора. Приведено описание гребного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Приведено математическое описание преобразователя частоты.

В четвертой главе проведено компьютерное моделирование типичной структуры ЕЭЭС и бестрансформаторных схем ЕЭЭС. Показаны результаты компьютерного моделирования в схемах ЕЭЭС в установившемся режиме.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 9 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях из перечня ВАК. Получены 4 патента РФ (№2529090; №2521883; №2479103; №2481692).

Практическое применение гребных электрических установок (ГЭУ) на судах насчитывает уже около ста лет. В течение этого времени они видоизменялись и совершенствовались. Основные этапы развития ГЭУ отражены в [1].

До 60-х годов прошлого века ГЭУ строились по схеме генератор-двигатель на машинах постоянного тока с регулированием частоты вращения двигателя за счет изменения токов возбуждения электрических машин с помощью реостатов. При этом мощность ГЭУ кораблей США еще до второй мировой войны достигала несколько десятков мегаватт.

В 60-х годах реостатные схемы регулирования тока возбуждения заменили тиристорные схемы.

В 70-е годы появились мощные полупроводниковые диоды и были созданы ГЭУ двойного рода тока на базе синхронных генераторов с неуправляемым выпрямителем. Ненадежные генераторы постоянного тока заменили более надежные генераторы переменного тока с меньшей массой и габаритами, но в качестве гребного двигателя использовался по-прежнему коллекторный двигатель постоянного тока. ГЭУ двойного рода тока была применена на атомных ледоколах типа «Арктика» и «Россия» [2].

В 80-е годы были созданы мощные полупроводниковые преобразователи и вместо двигателей постоянного тока появились гребные двигатели переменного тока, управляемых полупроводниковыми преобразователями. В 1984 году фирма «Стремберг» установила на океанографическом судне «Аранда» ГЭУ переменного тока с синхронным гребным электродвигателем мощностью 885 кВт [3]. Управление электродвигателем обеспечивал циклоконвертер, построенный на тиристорах. Структура ГЭУ, отработанная на «Аранде» была применена на ледоколах «Таймыр» и «Вайгач». В состав ГЭУ ледоколов входят три синхронных гребных электродвигателя мощностью по 12 МВт [2].

В ГЭУ, разработанных до 90-х годов, назовем эти установки ГЭУ традиционного исполнения, было одно общее свойство - положение гребного винта и направление тяги гребного винта относительно продольной плоскости судна было неизменным. По сравнению с гребными установками, построенными на тепловых двигателях – дизелях или турбинах ГЭУ традиционного исполнения имеют ряд существенных недостатков:

- большие масса и габариты установки;
- большая стоимость;
- ниже к.п.д.;
- большие эксплуатационные расходы.

Традиционные ГЭУ имели и определенные достоинства: возможность применения более быстроходных первичных двигателей; оптимизация режимов работы первичных электродвигателей; уменьшение длины валопроводов; повышение маневренности судов, улучшение условий жизни экипажа.

Широкое применение ГЭУ традиционного исполнения из-за перечисленных недостатков было экономически невыгодным, поэтому ГЭУ применялись в основном на судах определенного назначения - ледоколах, научно-исследовательских судах, кабелеукладчиках, рыбопромысловых судах, а также на подводных лодках.

За прошедшие 20 лет были найдены новые принципы построения судовых ГЭУ, которые существенно расширили область применения ГЭУ. Основными направлениями развития ГЭУ являются:

- применение гребных электродвигателей переменного тока с полупроводниковыми преобразователями;
- применение гребных установок «Азипод»;
- применение винторулевых колонок большой мощности;
- объединение источников электроэнергии и потребителей в единую электроэнергетическую систему судна.

## Глава 1 Обзор современных ГЭУ

### 1.1 Анализ современных ГЭУ

#### 1.1.1 ГЭУ «Азипод»

Один из новых вариантов построения ГЭУ основан на применении системы «Азипод». В 1987 году специалистами фирмы АВВ была предложена новая ГЭУ (патент Финляндии FI76977), названная Azipod (AzimuthingPoddedDrive) – азимутальный движительный привод гондольного типа). На рисунке 1.1 приведена схема системы Azipod, на которую фирма АВВ получила патент РФ [4].

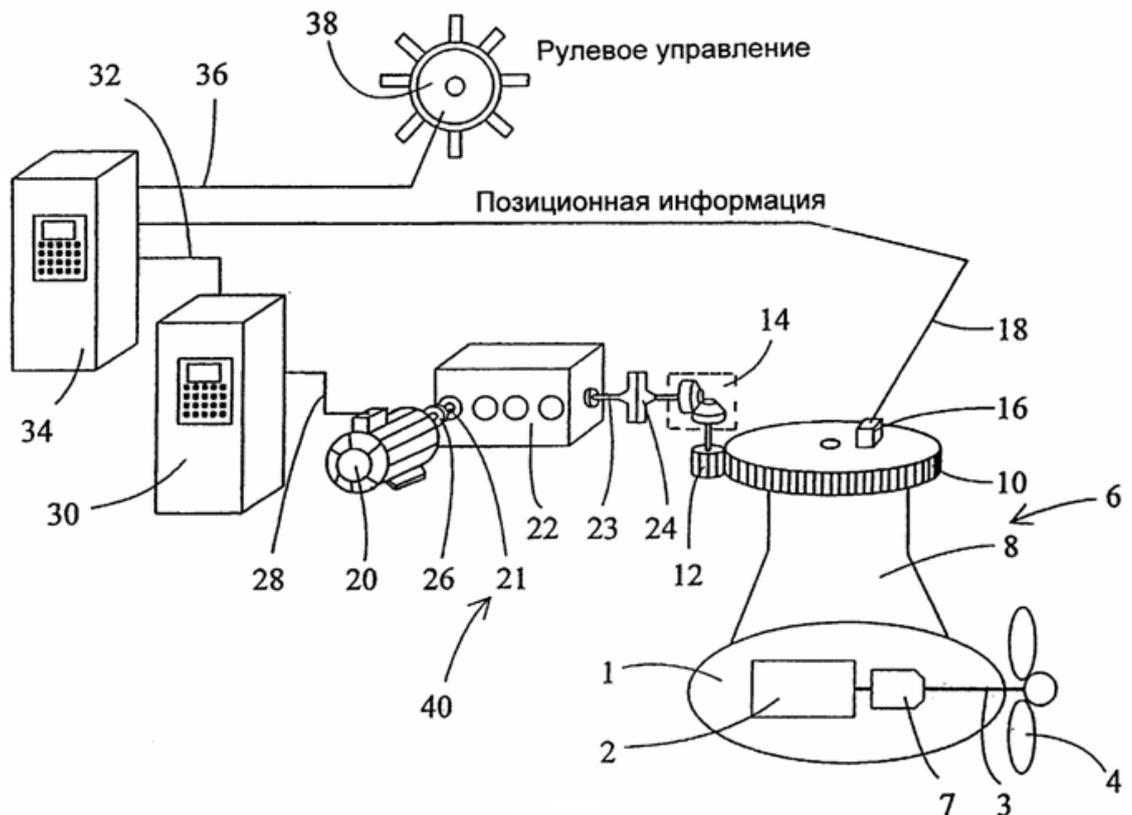


Рисунок 1.1 – Схема системы Azipod

В этой установке гребной электродвигатель размещается в герметичной гондоле 1. Валопровод 3, на котором установлен ротор электродвигателя, выведен из гондолы через герметичное уплотнение. На конце валопровода

закреплен гребной винт 4. В верхней части к гондоле приварена вертикальная шахта 8, составляющая с гондолой единую конструкцию. Гондола с шахтой устанавливаются под кормой судна таким образом, чтобы открытый верхний торец шахты выходил на палубу, находящуюся выше ватерлинии. На этой палубе размещаются необходимые для работы ГЭУ системы. Шахта и гондола с гребным винтом может разворачиваться с помощью гидроприводов или электроприводов вокруг вертикальной оси. При этом изменяется направление тягового усилия винта относительно продольной оси судна. «Азипод» обеспечивает движение судна, а также заменяет рулевое устройство и кормовое подруливающее устройство.

В 1989 году фирма АВВ установила на гидрографическом судне «Seili» во время капитального ремонта первую ГЭУ «Айпод» (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Гидрографическое судно «Seili»

Эксплуатационные испытания ГЭУ «Азипод» оказались удачными, и в течение последующих лет фирма АВВ совершенствовала созданные ГЭУ и применяла их на судах различных типов.

На рисунке 1.3 представлена схема устройства «Азипод», приведенная в [5], позволяющая понять состав ГЭУ.

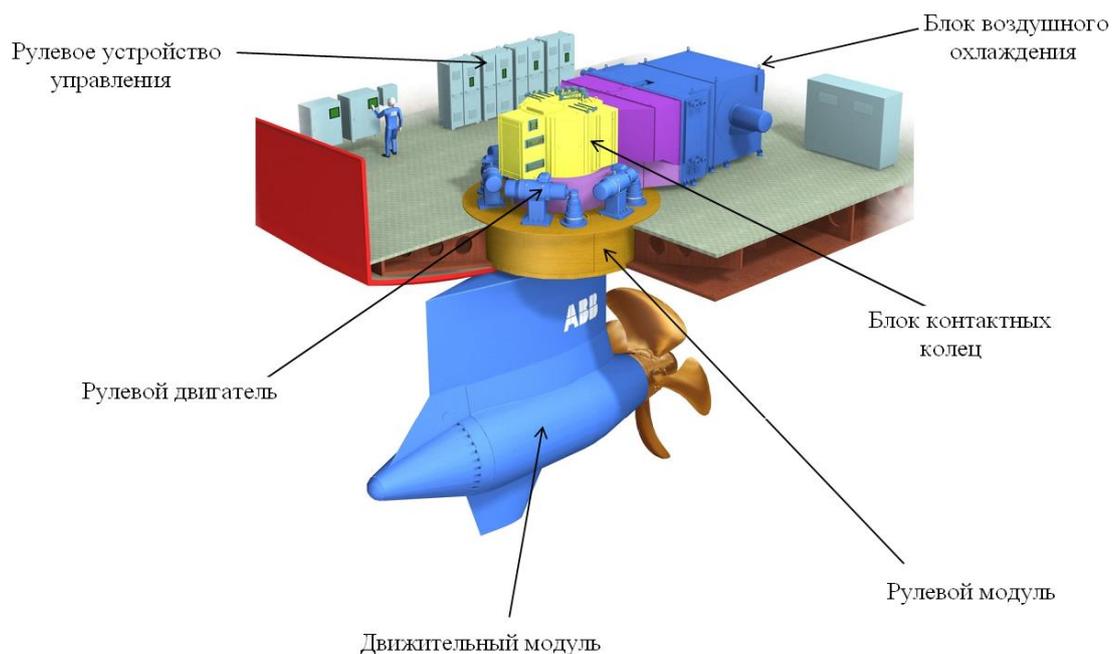


Рисунок 1.3

Установка «Азипод» состоит из следующих основных компонентов и систем:

- гребной винт;
- гребной электродвигатель;
- модуль рулевого управления;
- гидросиловой блок;
- система охлаждения воздушная или водяная;
- блок токосъемных колец;
- 2 (два) блока подготовки масла;
- блоки интерфейса;
- напорный танк.

Электроснабжение электродвигателя и вспомогательного оборудования, размещенного в гондоле, осуществляется либо через блок токосъемных колец, установленного в верхней части шахты, либо через гибкие кабели, допускающие закручивание при повороте гондолы с шахтой. При использовании токосъемных колец узел гондолы может вращаться вокруг вертикальной оси на  $360^\circ$ , при использовании гибких кабелей угол поворота гондолы ограничен.

Управление гребными электродвигателями обеспечивается с помощью полупроводниковых преобразователей частоты.

Система электродвижения «Азипод» обладает целым рядом существенных достоинств, которые позволили ей получить широкое распространение:

- обеспечивает отличные динамические качества и манёвренность судна;
- повышает безопасность плавания и резервирование движительной установки;
- исключает потребность в длинной линии водопровода, руле, кормовых подруливающих устройствах, винте регулируемого шага и понижающих редукторах;
- допускает более простую конструкцию корпуса судна;
- позволяет экономить полезное пространство на судне для грузов и пассажиров;
- снижает уровни шума и вибрации,
- операционная гибкость ГЭУ ведёт к уменьшению установленной мощности, к снижению потребления топлива, уменьшению стоимости ремонта, улучшению экологии из-за уменьшения количества выхлопных газов;
- уменьшает время простоя судна;

– подходят как для суровых арктических, так и для остальных климатических условий.

Фирма АВВ разработала модульный размерный ряд ГЭУ «Азипод» различной мощности, которые могут быть устанавливаться на судах различных типов. На рисунке 1.4 и таблицах 1.1 и 1.2 приведены габаритные размеры и масса модулей «Азипод» [6].

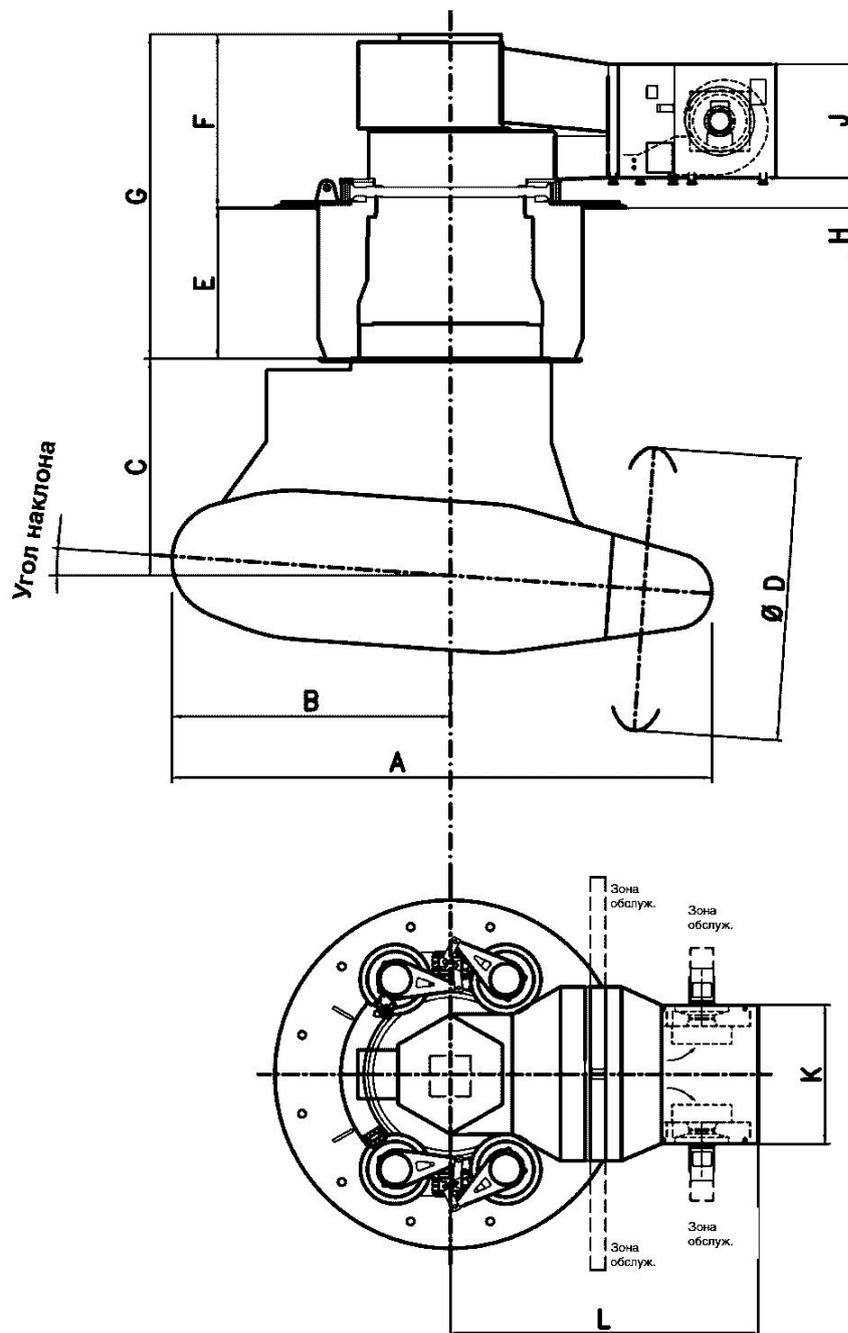


Рисунок 1.4 – Габаритные размеры модулей «Азипод»

Таблица 1.1 - Габаритные размеры и масса модулей «Азипод»

ТИП	A	B	C*	D	E	F	G	H	J	K	L
	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]	[M]
V25	13.5	7.1	6.5*	5.4-8.4	1.6	3.4	5.0	0.6	2.5	2.6	6.6
V23	11.8	6.5	5.8*	4.8-6.9	1.4	3.6	5.0	0.5	2.5	2.6	6.6
V21	11.6	6.6	4.8*	4.4-6.4	1.8	3.5	5.3	0.5	2.5	2.6	(6.3)
V18	10.1	5.4	4.0*	3.8-5.9	1.2	2.9	4.1	0.5	2.3	2.6	5.8
V16	9.0	4.9	3.5*	3.5-5.5	1.2	2.7	3.9	0.4	2.0	2.6	5.3
V23ICE	10.7	5.5	4.2*	4.5-5.6	3.1	3.4	6.5	0.6	2.3	2.6	6.2
V18ICE	10.1	5.4	3.5*	4.2-5.0	1.9	2.8	4.7	0.4	2.0	2.6	5.8
V16ICE	8.5	4.5	3.2*	3.5-4.5	1.9	2.9	4.8	0.4	2.0	2.6	5.8

## Примечания

Стандартный угол наклона вала составляет 0-2 градуса.

\* Данное значение меняется в зависимости от обводов корпуса судна, диаметра винта и т.п.

Все указанные размерные значения являются предварительными и могут меняться в зависимости от проекта.

Таблица 1.2 - Масса модулей «Азипод»

Масса, тонн							
Тип системы AZIPOD	Двигательный модуль без винта	Рулевой модуль	SRU (Блок контактных колец)	(CAU) Блок воздушного охлаждения	(HPU)Силовой гидравлический блок	(OTU) Блок подготовки масла	GTU+AIU+LBU+A CU
V25	115-200	88-145	4	10-12	5.5	2x0.3	0.5
V23	115-160	67-102	4	9-10	5.2	2x0.3	0.5
V21	90-135	50-82	4	8-10	5	2x0.3	0.5
V18	78-115	44-67	3	7-8	4.5	2x0.3	0.5
V16	61-85	35-58	3	5-6	4.2	2x0.3	0.5
V23ICE	193-235	114-176	4	10	4.5	2x0.3	0.5
V18ICE	153-187	77-95	3	8.5	4.5	2x0.3	0.5
V16ICE	103-125	77-95	3	8.5	4.5	2x0.3	0.5

За прошедшие 20 лет с момента постройки первого судна с установкой «Азипод» фирма АВВ не только разработала модульный ряд ГЭУ «Азипод» различной мощности, но и создала новые разновидности установок «Азипод».

В 2000 году была создана установка AZ iPod<sup>®</sup>CO[5, 7], а в 2004 году – установка Azipod<sup>®</sup>CZ (рисунок 1.5).

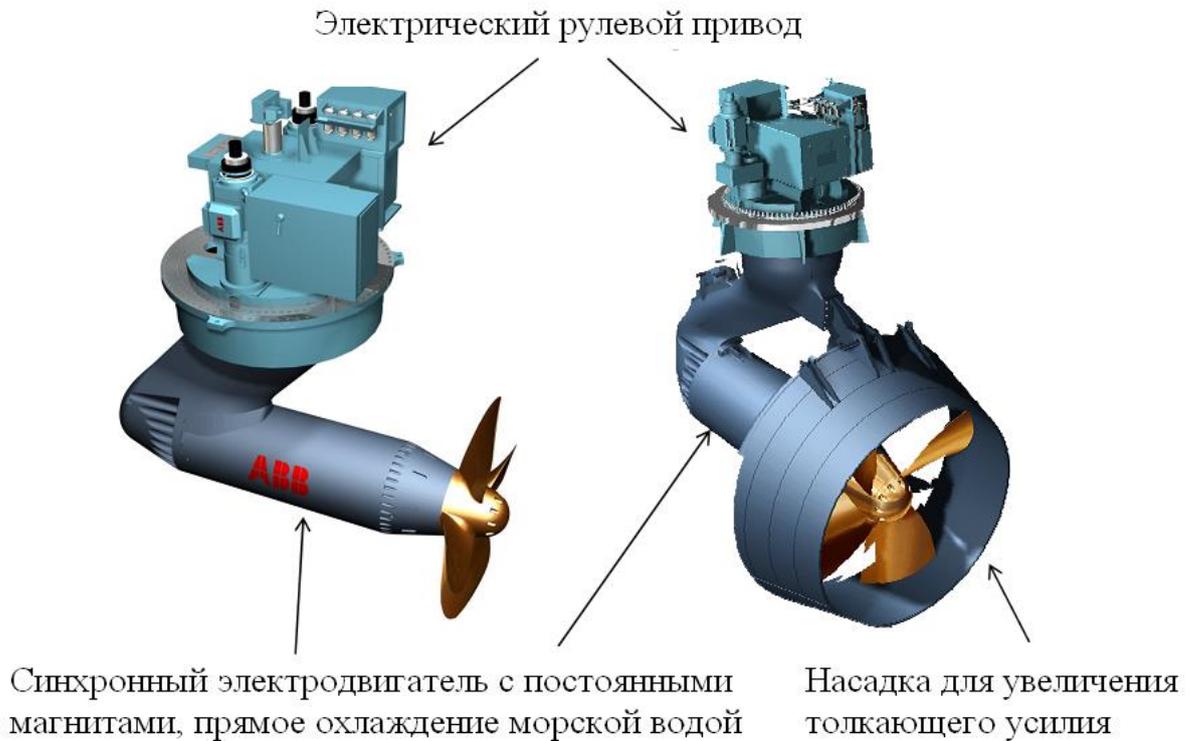


Рисунок 1.5 – Внешний вид установки Azipod<sup>®</sup>CZ

В этих установках в качестве гребного электродвигателя используется синхронный двигатель с постоянными магнитами – это позволяет получить максимальный к.п.д. и минимальные габариты, в том числе диаметра гондолы. Установки имеют прямое водяное охлаждение морской водой и электрический привод рулевого устройства.

Установки Azipod<sup>®</sup>CO имеют тянущий винт и единичную мощность от 1,3 МВт до 4,5 МВт.

Установки Azipod<sup>®</sup>CZ имеют толкающий винт, размещенный в насадке и единичную мощность 3,3 МВт.

В 2001 году разработана система CRP Azipod<sup>®</sup>[8] (рисунок 1.6). В этой системе используется комбинация двух гребных установок – один винт через

традиционный водопровод вращает тепловой двигатель, например, дизель, а в потоке воды, создаваемым первым винтом, располагается движитель CRP Azipod<sup>®</sup> с винтом, вращающимся в противоположном направлении (CRP и означает соосные гребные винты противоположного вращения).

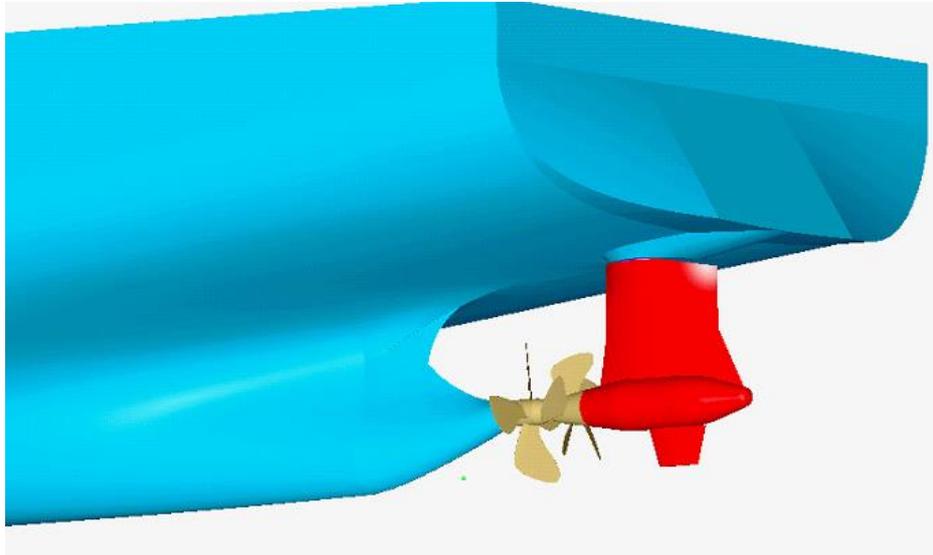


Рисунок 1.6

Установка CRP Azipod<sup>®</sup> обеспечивает повышение маневренности и резервирования по сравнению с двухвальными традиционными ГЭУ. Становятся ненужными второй валопровод и кормовое подруливающее устройство – освобождается значительный полезный объем на судне. Кроме того, CRP Azipod<sup>®</sup> позволяет повысить к.п.д. ГЭУ, необходимая мощность ГЭУ уменьшается на 10% – 15%.

К ноябрю 2009 года фирма АВВ уже установила 213 единиц ГЭУ «Азипод» на 96 судах [5]. Общая мощность действующих установок «Азипод» составляет 2300 МВт. Типы судов, оснащенных ГЭУ «Азипод» перечислены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

№	Тип судна	Количество
1	Круизные пассажирские судна	47
2	Паромы	6
3	Яхты	5
4	Суда снабженцы	5
5	Исследовательские суда	4
6	Ледоколы	9
7	Танкеры ледокольного класса	10
8	Контейнеровозы арктического класса	5
9	Плавкран	1
10	Буровая установка	2
11	Трубоукладчик	1
12	Патрульное судно	1

Среди этих судов и танкеры ледокольного класса «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров», построенные на ЛАО. Фирма АВВ является лидером в области создания разработки систем Azipod<sup>®</sup>, но разработки аналогичных гребных установок ведут многие зарубежные фирмы Siemens, Chattel, Aquamaster, Mermaid [9] и др.

Фирма Siemens и Schottel совместно создали гребную гондольную установку с двумя винтами, расположенными по торцевым сторонам гондолы и вращающимся в противоположные стороны. В качестве приводного двигателя используется синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, что позволило уменьшить диаметр двигателя на 40% и массу на 10%. В целом эффективность разработанной гребной установки за счет применения двух винтов и двигателя с постоянным магнитами повышена на 10% [9, 10].

Всего на период с 1990 по 2014 годы фирма АВВ поставила 258 единиц ГЭУ «Азипод» на 122-х судах [45]. Типы установок «Азипод» поставленные на судах приведены в таблице 1.4. Типы судов, оснащенных ГЭУ «Азипод» перечислены в таблице 1.5.

Таблица 1.4

№	Тип установки	Количество, шт.
1	«Азипод» СО:	37
2	«Азипод» CZ:	3
3	«Азипод» VI:	28
4	«Азипод» ХО:	4
5	«Азипод» ХС:	2
6	«Азипод» VO:	48
7	Всего	258

Таблица 1.5

№	Тип судна	Количество
1	Рыболовное	1
2	Наблюдательное судно	10
3	Яхта	7
4	Исследовательское	5
5	Доковое судно	2
6	Самоподъёмное судно	2
7	Судно-гостиница	1
8	Усиленный ледовый танкер	1
9	Ролкер (паром)	7
10	Паром	1
11	Судно снабжения платформ	1

Продолжение таблицы 1.5

№	Тип судна	Количество
12	Суда снабжения	3
13	Плавкран	1
14	Буровая установка	2
15	Ледокол	10
16	Танкер ледового класса	10
17	Сухогруз ледового класса	5
18	Ледокольный буксир	1
19	Патрульное судно	1
20	Судно службы водных путей	1
21	Круизное пассажирское судно	49
22	Трубоукладчик	1
23	Всего	122

### 1.1.2 ГЭУ с ВРК

Вторым направлением развития систем электродвижения является создание и применение винторулевых колонок большой мощности.

Винторулевая колонка - устройство, включающее муфту для соединения с валом гребного двигателя, механическую передачу и гребной винт. На рисунке 1.7 показано устройство винторулевой колонки немецкой фирмы Schottel[11].

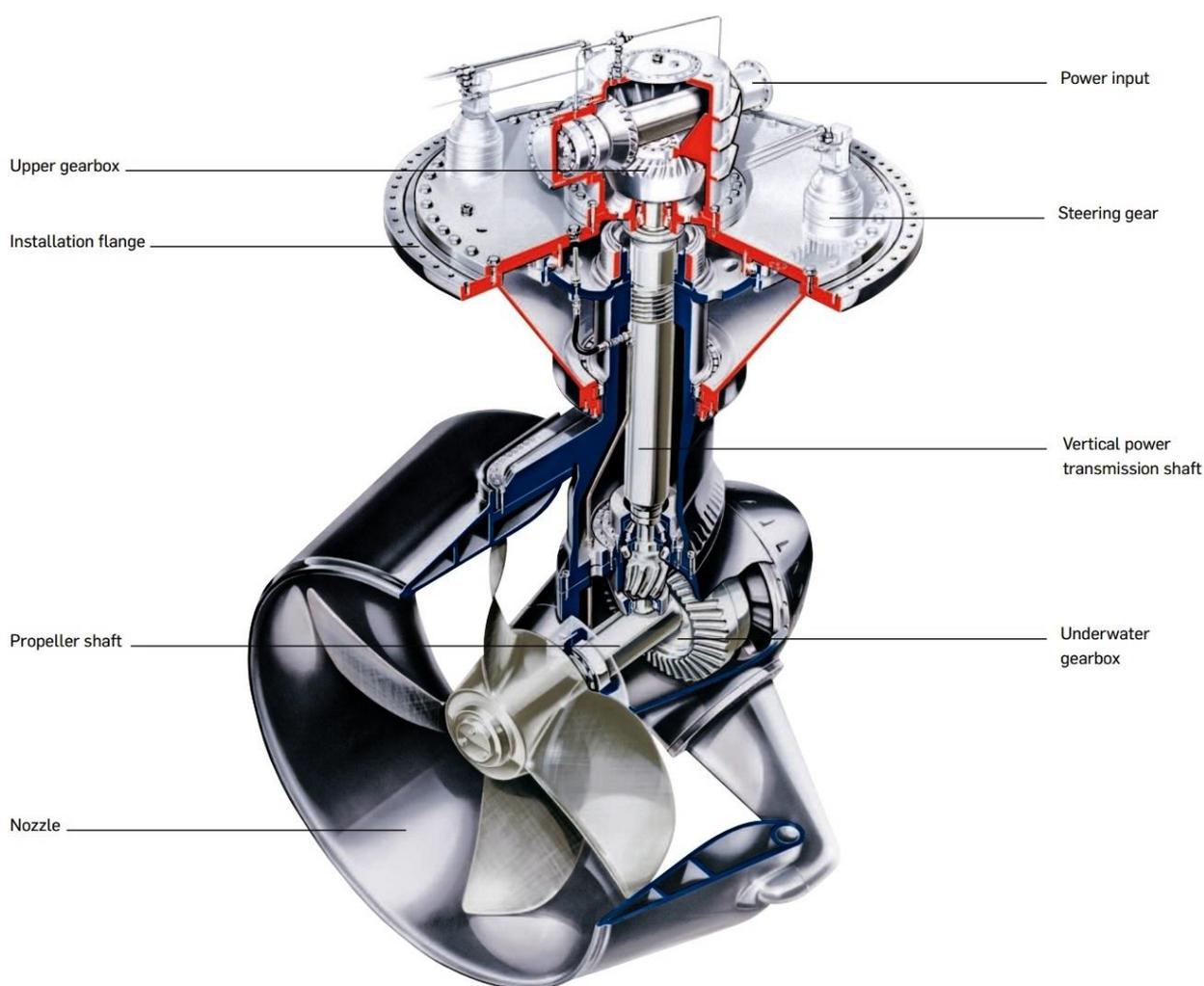


Рисунок 1.7 – Устройство ВРК фирмы Schottel

Вал гребного электродвигателя располагается горизонтально, в винторулевой колонке (ВРК) с помощью конической зубчатой передачи вращение электродвигателя передается на вертикальный вал и с

вертикального вала с помощью еще одной конической зубчатой передачи вращение передается на горизонтальный вал, на котором установлен гребной винт.

ГЭУ с винторулевыми колонками по многим свойствам аналогичны ГЭУ с системой «Азипод». Также как и устройства Азипод ВРК могут разворачиваться вокруг вертикальной оси и менять направление тяги винта, что позволяет отказаться от рулевого устройства и кормового подруливающего устройства. ВРК обеспечивают отличные динамические качества и манёвренность судна; повышают безопасность плавания; исключают потребность в длинной линии валопровода, руле и кормовых подруливающих устройствах.

Как и в устройствах Азипод в ВРК можно применить один или два встречно вращающихся винта. ВРК более компактны, чем устройство Азипод, и создает меньшее гидродинамическое сопротивление при движении судна. Так как в конструкции ВРК используется редуктор, то для движителя можно использовать электродвигатель с большей частотой вращения и меньшими габаритами, чем в устройствах Азипод. Однако мощность и момент ВРК ограничивают зубчатые пары механической передачи, и в настоящее время она составляет меньше 10 МВт. При больших значениях мощности ГЭУ необходима установка винта непосредственно на вал двигателя.

Фирма Schottel выпускает 14 типоразмеров ВРК, параметры которых приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры ВРК фирмы Schottel

№	Type	Rating*	Input power [kW]	Input speed [ $min^{-1}$ ]	Well Ø [mm]	Weight [kg]
1	SPR 110	A	195	2100	850	880
		B	230			
2	SPR 170	A	270	1800/2000	1050	1650
		B	310			
3	SPR 200	A	310	1800/2100	1100	2100
		B	370			
4	SPR 330	A	470	1800	1400	3600
		B	550			
5	SPR 440	A	650	1600/1800	1450	7500
		B	780			
6	SPR 550	A	750	1000/1600/1800	1700	9600
		B	920			
7	SPR 1012	A	1150	750/1000/1200 1600/1800	2100	17000
		B	1400			
8	SPR 1212	A	1380	750/1000/1200 1600/1800	2300	17500
		B	1650			
9	SPR 1215	A	1500	750/1000 1600/1800	2400	19500
		B	1800			
10	SPR 1515	A	1750	750/900/1000 1200/1600/1800	2600	2750
		B	2200			
11	SPR 2020	A	2200	750/1000 1200/1800	2800	40000
		B	2600			
12	SPR 3030	A	3850	750/1200	3400	53000
		B	3400			
13	SPR 4040	A	3350	750/1000	3800	78000
		B	4000			
14	SPR 4500	A	4000	750/900	4200	65000
		B	4750			

На рисунке 1.8 показан внешний вид ВРК финской фирмы Steerprop Ltd различных типов.

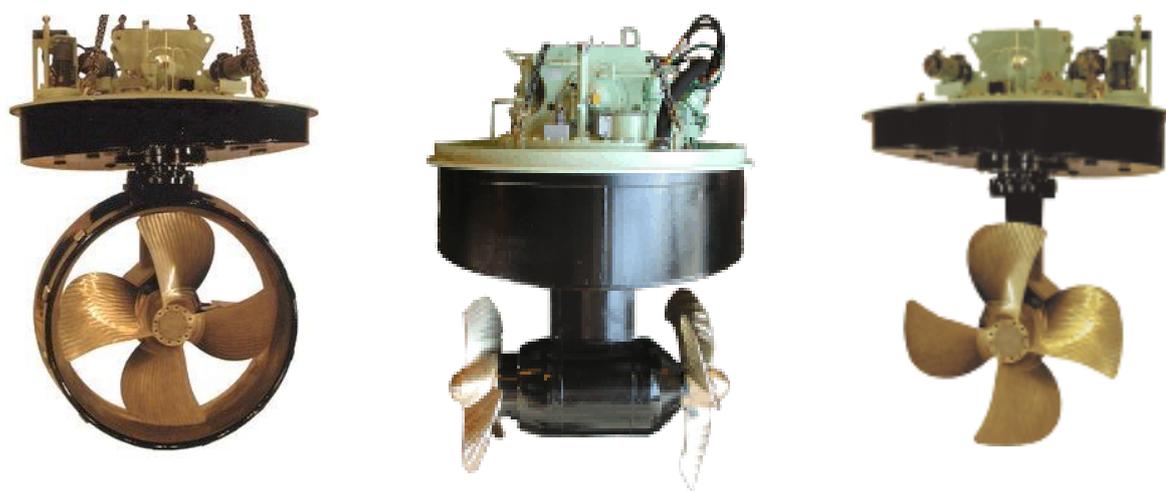


Рисунок 1.8 - Внешний вид ВРК фирмы Steerprop Ltd

Винторулевые колонки фирмы Steerprop Ltd типа SP имеют мощности от 900 до 3000 кВт – таблица 1.7.

Таблица 1.7 – Параметры ВРК фирмы SteerpropLtd

Тип	SP10	SP14	SP20	SP25	SP35	SP45	SP35 CRP
Мощность [кВт]	900	1250	1566	2000	2400	3400	3000
Номинальная частота вращения входного вала [об/мин]	1200 1600 1800	1000 1200 1600 1800	750 900 1000 1200 1600 1800	750 900 1000 1200 1600 1800	750 900 1000 1200	750 900 1000 1200	750 900 1000 1200
Максимальный диаметр винта [мм]	1600	1900	2150	2400	2800	3100	3500
Частота вращения при развороте [об/мин]	3	3	2.5	2.5	2	2	2
Время разворота на 180° [с]	10	10	12	12	15	15	
Вес [кг]	5600	10000	13000	18500	28000	37000	38000

Широкое распространение получили также ВРК финской фирмы «Aquamaster», вошедшей в шведскую фирму «KaMeWa».

Для повышения к.п.д. ГЭУ фирмы «Schottel» и «Aquamaster» создали ВРК с двумя гребными винтами, вращающимися в одном или в различных направлениях [12].

Примером применения ВРК на современных судах является гребная электрическая установка малого гидрографического судна «Вайгач» [13-16], разработанная ФГУП «ЦНИИ СЭТ». Полупроводниковые преобразователи ПП1 и ПП2 состоят из неуправляемых мостовых выпрямителей и автономных инверторов напряжения на IGBT-транзисторах. Мощность преобразователей по 700 кВА, охлаждение – водяное. В качестве гребных электродвигателей использованы асинхронные двигатели АДР-550-4, разработанные ОАО «Электросила». Номинальная мощность двигателей - 550 кВт, номинальная частота вращения - 1500 об/мин, номинальное напряжения питания - 960 В, номинальная частота напряжения - 50 Гц. На судне установлены две винторулевые колонки финской фирмы Steerprop.

### **1.1.3 Единая электроэнергетическая система**

Создание установок «Азипод» и винторулевых колонок, полупроводниковых преобразователей частоты большой мощности, низкооборотных гребных винтов и тихоходных электродвигателей переменного тока резко расширило область применения ГЭУ и создало предпосылки для создания полностью электрического судна, в котором все технологические операции выполняются электрическими устройствами: электроприводами, электрическими приборами, системами автоматического регулирования и электронными устройствами. Тепловые двигатели на электрическом судне используются только для производства электроэнергии.

Современные полупроводниковые преобразователи частоты, обеспечивающие управление мощными гребными двигателями переменного тока, создают незначительные искажения синусоидального напряжения

первичной электрической сети, что позволяет решить проблемы электромагнитной совместимости мощных ГЭУ и других судовых потребителей электроэнергии. Это позволило объединить судовую электростанцию и все потребители электроэнергии в единую электроэнергетическую систему (ЕЭЭС). Основные достоинства ЕЭЭС, включающей ГЭУ, приведены в [1, 9]:

- возможность оптимизации режимов работы первичных двигателей, сокращение их числа, снижение расхода топлива и вредных выбросов;
- повышение надежности ЭЭС;
- повышение маневренности судов и безопасности плавания, за счет широкого диапазона регулирования частоты вращения и быстродействия гребных электродвигателей;
- гибкая компоновка элементов ЕЭЭС на судне, освобождение большого объема судовых помещений под полезную загрузку.

В [1] приводится информация о выполненном в ОАО ЦКБ «Айсберг» исследовании целесообразности применения на судах четырех типов (пассажирском судне, танкере, рудовозе и сухогрузе) ЕЭЭС вместо малооборотного дизеля. Установлено, что система электродвижения имеет большую массу и дороже, требует увеличения численности экипажа на 1-2 человека. Однако сокращается необходимая длина машинного отделения, более гибкая компоновка оборудования позволяет освободить полезный объем на судне и снижается потребление топлива. В результате дополнительные затраты на применение на судах ЕЭЭС окупаются за 2-3 года. Статья была опубликована в 1997 году. Прошедшие годы полностью подтвердили сделанные в [1] выводы – применение систем электродвижения на судах стало устойчивым направлением развития судостроения.

На рисунке 1.9 приведены данные по численности судов с различными двигателями за 100 лет [17].

## DEVELOPMENT OF MAIN PROPULSION SYSTEM IN SHIPS

### MARKET SHARE OF OCEAN GOING MOTOR SHIPS

Source: Lloyds Register's Statistics

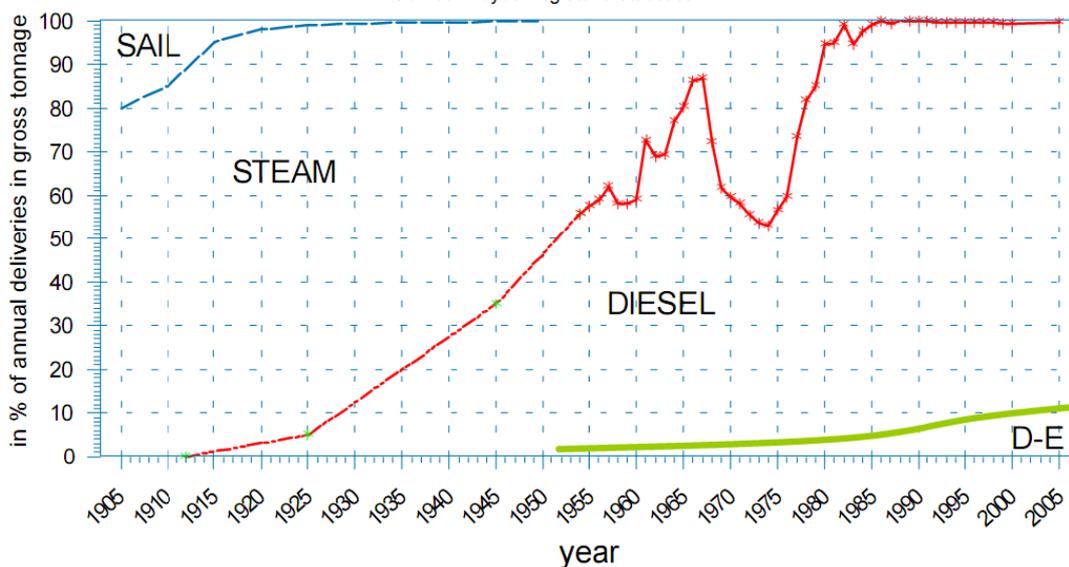


Рисунок 1.9

Приведенная диаграмма подтверждает устойчивый рост доли судов с дизель-электрической двигательной установкой. В [17] предлагается использовать для судов ледового плавания газотурбинную энергетическую установку в сочетании с системой электродвижения.

Естественно, что с ростом количества и сложности компонентов электрооборудования, увеличения количества линий связи, взаимного влияния компонентов электрооборудования необходимы новые методы проектирования судов с ЕЭЭС. Элементы комплексного подхода при проектировании ЕЭЭС созданы и использованы при проектировании первой в России ЕЭЭС для гидрографического судна «Вайгач» в ФГУП «ЦНИИ СЭТ» [15].

### 1.1.4 Типы гребного электродвигателя

В современных гребных установках двигатели переменного тока вытеснили коллекторные машины постоянного тока. В то же время среди двигателей переменного тока нет вида, который бы во всем диапазоне мощностей и частот вращения, характерных для судовых ГЭУ, превосходил бы остальные виды машин. К тому же гребные двигатели для винторулевых колонок и двигатели в установках «Азипод» имеют значительно отличающиеся частоты вращения.

В [12] сообщается, что выбор типа ГЭД зависит от многих факторов: типа преобразователя напряжения, мощности и частоты вращения электродвигателя, способа охлаждения и т.д. По регулировочным характеристикам синхронные и асинхронные машины при управлении от полупроводниковых преобразователей аналогичны.

#### 1.1.4.1 Требования предъявляемые к ГЭД

Гребные электродвигатели переменного тока, имеют целый ряд характерных особенностей, отличающих их от двигателей, применяемых в сухопутной практике. Некоторые из этих особенностей [18, 23].

1. Повышенные значения индукций и линейных нагрузок с целью возможно большего снижения габаритов и весов гребных электродвигателей.

2. Усиленная вентиляция для возможности повышенного использования активных материалов без опасности перегрева электродвигателей. Так как наибольшее выделение тепла происходит в электродвигателях при их реверсировании, когда скорость их вращения невелика, то необходимо охлаждающие двигатель вентиляторы снабжать отдельными, самостоятельными приводами, действие которых не зависит от скорости вращения гребного двигателя.

3. Материалы повышенного качества для частей рабочего и конструктивного характера, с целью снижения веса электродвигателя и величины потерь в его активных материалах и для повышения его к. п. д.

4. Особенно надежная изоляция, гарантирующая стойкость ее против влаги и действия различных солей, приносимых при охлаждении двигателя воздухом, забираемым с верхней палубы при незамкнутой системе вентиляции.

5. Температурные указатели, термопары или температурные сопротивления, которые располагаются в различных частях гребных электродвигателей, подверженных наиболее значительному нагреву при работе последних.

Повышенная вентиляция во многих случаях может служить весьма эффективным средством электродвигателей, так как, увеличивая производительность охлаждающих вентиляторов, можно значительно повысить эффективность использования меди и стали в электродвигателе и, в соответствии с этим, уменьшить его объем, не выходя за пределы норм нагрева. Такую возможность легко осуществить, так как расход мощности на вентиляцию гребных электродвигателей бывает вообще незначительным и выражается десятными долями процента от номинальной мощности.

#### 1.1.4.2 Асинхронные электродвигатели

Асинхронные ГЭД, особенно с короткозамкнутым ротором, конструктивно просты, надежны, обладают хорошими пусковыми характеристиками, и поэтому вполне приемлемы для ГЭУ [19, 24]. Однако они имеют низкий коэффициент мощности, равный 0,85-0,87 у быстроходных двигателей. Их применение связано с необходимостью увеличивать габариты генераторов для получения соответствующей реактивной мощности, поскольку размеры машин переменного тока определяются полной мощностью, а не активной.

Наиболее низким коэффициентом мощности, достигающим до 0,7, обладают тихоходные асинхронные двигатели, так как по условиям сборки и износа подшипников у них делается относительно большой воздушный зазор, увеличивающий ток намагничивания и полную мощность. В ГЭУ при

прямом соединении электродвигателя с гребным валом частота вращения мала, не более 150-200 об/мин, поэтому электродвигатели имеют низкий коэффициент мощности, снижающийся иногда до 0,67, что вызывает увеличение полной мощности самого ГЭД примерно в 1,5 раза по сравнению с полной мощностью синхронных ГЭД той же активной мощности. В таком же отношении увеличивается полная мощность питающих генераторов.

#### 1.1.4.3 Синхронные электродвигатели

Синхронные двигатели имеют пусковую короткозамкнутую обмотку, создающую достаточно большой пусковой момент, незначительно отличающийся от пускового момента асинхронного двигателя. Пусковая короткозамкнутая обмотка на роторе дает возможность производить асинхронный пуск синхронного двигателя. В конце асинхронного пуска обмотка возбуждения ротора подключается к возбудителю постоянного тока.

По величине пускового момента и механическим характеристикам синхронные двигатели также вполне пригодны для ГЭУ.

Основное преимущество синхронного ГЭД – высокий коэффициент мощности, равный единице [21, 22]. Поэтому размеры синхронного двигателя меньше, чем асинхронного, при той же активной мощности и меньших размерах питающих генераторов.

Синхронные ГЭД имеют большой воздушный зазор. У асинхронного двигателя с увеличением воздушного зазора возрастает намагничивающий ток, отчего увеличивается реактивная мощность и падает коэффициент мощности.

У синхронного ГЭД большой воздушный зазор сказывается на увеличении МДС обмотки возбуждения, необходимое количество витков которой укладываются на явно выраженных полюсах ротора. Следует, однако, помнить, что увеличение воздушного зазора ведет к возрастанию размеров, массы и стоимости машины.

Большой воздушный зазор уменьшает пульсационные и поверхностные потери, что позволяет сделать на статоре более широкие пазы, увеличить количество уложенной меди и тем самым повысить линейную нагрузку машины. Большой зазор облегчает сборку машины и допускает некоторую просадку вала в подшипниках, что особенно важно для ГЭУ, в которых обычно применяются подшипники скольжения.

#### 1.1.4.4 Достоинства и недостатки асинхронных и синхронных электродвигателей

Асинхронным электродвигателям присущи следующие достоинства [20]:

- 1) более простая и надежная конструкция по сравнению с конструкцией синхронных электродвигателей и электродвигателей постоянного тока;
- 2) хорошая перегрузочная способность;
- 3) отсутствие обмотки возбуждения и в связи с этим отсутствие необходимости в источниках постоянного тока;
- 4) простота в обслуживании.

Наряду с достоинствами необходимо отметить следующие недостатки:

- 1) низкий коэффициент мощности. Из-за увеличенной реактивной мощности, потребляемой двигателем, увеличиваются мощность и габариты генераторов, что приводит к возрастанию стоимости гребной установки;
- 2) низкий КПД по сравнению с КПД синхронных электродвигателей;
- 3) большой вес и стоимость двухклеточных электродвигателей;
- 4) большие потери в цепи ротора фазных электродвигателей;
- 5) из-за больших пусковых токов короткозамкнутых электродвигателей они выполняются с большими габаритами;
- 6) сложность управления, особенно при маневрировании и реверсах.

Достоинства синхронного двигателя:

1. Возможность работы с коэффициентом мощности, равным единице. Вследствие этого габаритные размеры у синхронного двигателя меньше, чем у асинхронного при прочих равных условиях.

2. Возможность работы с опережающим коэффициентом мощности, что позволяет сократить размеры главных генераторов и коммутационной аппаратуры.

3. Синхронный двигатель может быть выполнен, в отличие от асинхронного, на меньшую скорость вращения. В тихоходных асинхронных двигателях с увеличением числа полюсов коэффициент мощности становится таким малым, что реактивная мощность превышает активную. Поэтому получение нормальных характеристик в асинхронном двигателе возможно только при определенных числах полюсов.

4. Синхронный двигатель можно выполнить с большим воздушным зазором, чем асинхронный. В асинхронном двигателе при увеличении воздушного зазора уменьшается  $\cos(\varphi)$  и увеличивается намагничивающий ток статора.

В синхронном двигателе поле создается обмоткой возбуждения, получающей питание от независимого источника тока, поэтому воздушный зазор может быть увеличен. Большой воздушный зазор позволяет увеличить сечение обмотки статора, уменьшить расход материалов на изоляцию, допускает больший износ вкладышей подшипников, улучшает вентиляцию двигателя, обеспечивает большую перегрузочную способность.

5. Синхронный двигатель имеет более высокий КПД, чем асинхронный, и меньшую чувствительность к колебаниям напряжения сети, так как момент последнего пропорционален квадрату напряжения:  $M = U^2$ , а момент синхронного двигателя при постоянном возбуждении пропорционален первой степени напряжения:  $M = U$ .

6. Возможность выполнения синхронного двигателя на большую мощность, поскольку в больших асинхронных двигателях увеличивается напряжение на контактных кольцах, что вызывает значительные трудности как при изготовлении, так и в эксплуатации.

Следует также отметить недостаток синхронных двигателей, который заключается в необходимости наличия источника постоянного тока для питания возбуждения.

В [12] сделан вывод, что для ГЭУ малой и средней мощности – до 7-8 МВт предпочтительными являются АД, а при больших мощностях СДОВ.

Специалисты фирмы АВВ, имеющие уже большой опыт по практическим разработкам современных ГЭУ, для ГЭУ мощностью 5 МВт и ниже применяют АД с короткозамкнутым ротором, а для ГЭУ большей мощности – СДОВ с бесщеточной системой возбуждения [6].

## **1.1.5 Типы преобразователей частоты для ГЭУ**

### **1.1.5.1 Требования к преобразователям частоты в составе ГЭУ**

Применение в составе судовых систем электродвижения современной силовой полупроводниковой техники и винторулевых колонок требует по-новому подходить к вопросу проектирования ЕЭЭС. При этом следует учитывать также особенности данных установок, как соизмеримость мощности источников и приёмников электроэнергии, сравнительно небольшую протяжённость линий электропередач, широкий диапазон изменения нагрузки в эксплуатационных режимах работы судна, наличие мощных полупроводниковых преобразователей, влияющих на качество электроэнергии в судовой сети [25].

Широкое применение в современных ЕЭЭС силовой полупроводниковой техники породило сложную многофакторную проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) полупроводниковых преобразователей с остальным судовым электро- и электронным оборудованием.

Разрешение этой проблемы в общем виде - одна из главных задач современной судовой электротехники. Особенно остро эта проблема проявляется в ЭЭС с мощными гребными электрическими установками (ГЭУ) крупных судов: ледоколов, пассажирских лайнеров, судов типа «ро-ро», паромов и т. д. Такие ГЭУ независимо от типа судна реализуются по отработанной структуре «синхронный генератор – непосредственный преобразователь частоты (циклоконвертор) — синхронный гребной электродвигатель (ГЭД)».

Многолетний опыт эксплуатации таких ГЭУ на судах различных типов (в том числе на ледоколах с наиболее сложными условиями работы), поставляемых известными фирмами (например, Siemens, ABB), подтвердил их эксплуатационную надёжность, высокие маневренные качества и

конструктивную универсальность (ГЭД может размещаться внутри корпуса судна, в винторулевых колонках типа «Azipod», в составе угловой колонки, например типа «Aquamaster»).

Тем не менее в течение многих лет остаются неразрешенными серьезные недостатки таких ГЭУ. Первый из них - это очень высокое значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_U$ ) (по ГОСТ 32144-2013) [26]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} 100\% \quad (1.1)$$

где:

$U_1$  — действующее значение основной гармоники;

$U_i$  — значение гармоник за исключением основной.

Выходное напряжение для традиционного 6-пульсного непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) при отношении частоты питающей сети  $f_1$  к выходной  $f_2$ , равном  $f_1/f_2 = 9$ , имеет  $K_U = 29\%$ , а для 12-пульсной схемы НПЧ значение  $K_U = 15\%$ .

При снижении выходной частоты и частоты вращения ГЭД ситуация осложняется, так как приходится увеличивать углы запаздывания и опережения коммутации тиристоров для получения нужного закона регулирования  $U=F(f)$ , и форма выходного напряжения ухудшается, что приводит к целому ряду отрицательных последствий.

Применение широкополосных «тяжелых» фильтров проблематично из-за постоянно изменяющегося спектра гармоник напряжения и резко увеличивает размеры и массу оборудования. К этому ведет и увеличение числа фаз, поскольку кратно увеличивается количество мостов и силовых

фазосдвигающих трансформаторов. Эти решения практически не в состоянии обеспечить низкие значения  $K_U$  (например, на уровне 3-4%).

Второй серьезный недостаток ГЭУ - низкое (порядка 0,65—0,7) значение коэффициента мощности, что резко увеличивает установленную мощность (на 15—18%), массу, размеры и стоимость генератора.

В целом понятно, что чем хуже гармонический состав выходного напряжения, тем меньше коэффициент мощности преобразователя. Например, в работе [25] приведены рассчитанные зависимости коэффициента мощности циклоконвертора с нулевой схемой включения и однофазным и трехфазным выходами при треугольном законе регулирования угла открывания тиристоров, а коэффициент мощности таких НПЧ имеет достаточно низкие значения.

Таким образом, мощный преобразователь частоты современных ЭЭС с ГЭУ является ключевым элементом, от которого зависят энергетические, массогабаритные, вибрационные и стоимостные характеристики ГЭУ.

Устранению указанных принципиальных недостатков традиционных ЭЭС посвящен ряд исследований и практических разработок, проведенных в ЦНИИ им. Академика А. Н. Крылова [26].

Основные требования к судовому статическому преобразователю электроэнергии (СПЭ), характеристики которого близки к идеальным, можно сформулировать следующим образом: высокий (не ниже 0,99) КПД преобразования; высокое значение (порядка 0,9 – 0,95) коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ); низкое значение коэффициента нелинейных искажений (около 4%) без использования фильтров; возможность свободного (естественного) обмена энергией между ГЭД и питающим генератором; лучшие, чем у существующих ЭЭС, массогабаритные характеристики; минимальное число фаз для уменьшения количества полупроводниковых приборов и

трансформаторно-дроссельного оборудования; возможность непосредственного питания от источника высокого напряжения (10,5 кВ); использование отечественной силовой полупроводниковой базы.

Ни один из применяемых в современных гребных электрических установках СПЭ — непосредственный преобразователь частоты или двухзвенный преобразователь частоты («выпрямитель + инвертор») на основе низковольтных IGBT транзисторов — не в состоянии обеспечить выполнение этих требований.

Несмотря на интенсивные работы, проводимые многими иностранными фирмами и отечественными предприятиями, разрешить в общем виде проблему получения на выходе преобразователя напряжения с малым значением  $K_U$  не удастся. Частные решения, как правило, сводятся к увеличению числа фаз, использованию развязывающих «мотор-генераторов», установке в питающие силовые цепи и нагрузку дополнительных фильтров, которые имеют большую массу, габариты и недостаточно эффективны при глубоком регулировании частоты вращения гребного электродвигателя [26].

Следует отметить, что к судовой ЕЭЭС предъявляются также требования, которые принципиально отсутствуют в ТУ на отдельные виды электрооборудования [27].

ЕЭЭС должна обеспечивать статическое и динамическое качество электрической энергии по частоте, напряжению, искажениям формы кривой, вызванным полупроводниковыми преобразователями энергии, по импульсным коммутационным перенапряжениям, по модуляции напряжения.

Это особенно актуально в связи с обозначившимся направлением развития судовой электроэнергетики — объединением всех потребителей с системой электродвижения судна. ЕЭЭС должна обеспечить, с одной стороны, качество электроэнергии, как в обычной системе, с другой —

быстрые пуски и реверсы гребных двигателей, быстрое изменение хода корабля [27].

Единая ЭЭС должна обеспечивать устойчивость работы во всех нормальных и аварийных режимах функционирования корабля [27]. Необходимо предусмотреть устойчивое и надёжное функционирование полупроводниковых преобразователей во всех нормальных режимах эксплуатации; соответствие качества электроэнергии требованиям классификационных обществ, национальным стандартам и стандартам МЭК, обеспечение ЭМС всех видов электрооборудования, минимальные массогабаритные характеристики системы.

#### 1.1.5.2 Выбор преобразователей частоты для ГЭУ

Преобразователь частоты (ПЧ) современных ЕЭЭС с ГЭУ является ключевым элементом, от которого зависят энергетические, массогабаритные, вибрационные и стоимостные характеристики ГЭУ.

До недавнего времени в системах электродвижения переменного тока полупроводниковые преобразователи непосредственного типа (НПП) (или НПЧ – непосредственные преобразователи частоты) использовались значительно чаще, чем полупроводниковые преобразователи со звеном постоянного тока (так называемые двухзвенные преобразователи частоты (ДПЧ)).

Это связано, прежде всего, с более высоким КПД данных преобразователей и возможностью реализации рекуперативного торможения ГЭД [26, 28].

Низкое значение коэффициента мощности (порядка 0,65-0,7), низкое качество выходного напряжения [26, 28] позволяет сделать вывод о необходимости применения других схемных решений преобразователей частоты для ГЭУ.

Современные полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) на базе автономных инверторов напряжения (АИН) практически не уступают по КПД непосредственным преобразователям частоты (НПЧ), при этом имеют более простую силовую схему, и в меньшей степени влияют на качество электроэнергии в судовой сети [28].

Настоящее время характеризуется вниманием исследователей и разработчиков силовой электроники к энергетическим аспектам работы ПП, к вопросам энергосбережения средствами регулируемого электропривода, к задачам оптимального управления. На данном этапе создание перспективных устройств связано с решением проблем энергетической и электромагнитной совместимости ПП с питающей сетью и ЭМ, с исследованиями высокочастотных электромагнитных процессов, вызываемых ПП с ШИМ в электросетях и ЭМ, с оценкой их влияния на надежность, долговечность, экономичность и другие характеристики оборудования.

В связи с появлением множества новых технических решений по силовым схемам ПП, с усложнением этих схем, большой объем работ выполняется по синтезу оптимальных алгоритмов управления, по реализации в микропроцессорных устройствах функций идентификации параметров, технической диагностики и визуализации процессов. В практику эксплуатации ПП и электроприводов внедряются новые информационные технологии.

Для уменьшения влияния привода на энергосистему с помощью трансформаторов и автотрансформаторов создана 48-пульсная схема преобразования, в которой искажения токов сети малы. На действующих атомных ледоколах («Таймыр», «Вайгач») в системах электродвижения используются также тиристорные преобразователи частоты. И на перспективных атомных ледоколах мощностью 60 МВт в качестве основного варианта рассматривается использование НПЧ [29].

В системах с мощными тиристорными преобразователями обычно существует проблема их влияния на питающую электросеть. При соизмеримой мощности преобразователей и электросетей используются многопульсные схемы. Это обычно не полностью решает задачу уменьшения искажения напряжений сетей. Для подавления высших гармонических напряжений и для компенсации реактивной мощности требуется применение дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств, которые существенно усложняют систему, увеличивают стоимость.

Запираемые тиристоры (GTO, IGCT, SGCT и др.) относятся к полностью управляемым СПП и позволяют построить полностью управляемые преобразователи. Для этих приборов также характерно низкое падение напряжения в открытом состоянии. Однако большие коммутационные потери энергии приводят к необходимости применять в преобразователях сравнительно низкие частоты ШИМ (до 500-600 Гц). Вследствие этого токи и напряжения на входе и выходе преобразователей имеют значительные искажения и для устранения искажений необходимо применение мощных фильтров. Высоковольтные преобразователи этого типа мощностью до 4 МВт и выше производятся фирмой Rockwell Automation для приводов насосов, вентиляторов, компрессоров, мельниц и др. В России в этом направлении работают ОАО "Новая эра", НИИПТ, ЦНИИ СЭТ и др. По данным фирмы Rockwell Automation типичный КПД полностью управляемых преобразователей частоты на запираемых тиристорах 97,5%.

Существенно иными характеристиками обладают мощные транзисторные модули. Модули IGBT имеют падения напряжения на транзисторах в открытом состоянии от 4 В у модулей первого поколения до 1,2 В у модулей 4 поколения. Величина падения напряжения зависит от номинального напряжения модуля и от фирмы-производителя. Инверторы обычно имеют повышенные потери энергии, так как токи протекают преимущественно через транзисторы. В активных выпрямителях потери

энергии обычно меньше, так как токи протекают преимущественно через диоды, которые имеют меньшие падения напряжения. В низковольтных транзисторных преобразователях частоты достигается КПД порядка 97%, в высоковольтных – 97,5-98%. Модули IGBT относятся к полностью управляемым СПП. При построении преобразователей на модулях IGBT снимаются многие ограничения. В частности, возможно значительное увеличение частоты ШИМ, например до 10-20 кГц и более. Это позволяет существенно упростить фильтрацию токов и напряжений на входе и выходе преобразователей. Это также открывает перспективы для новых применений устройств силовой электроники. Транзисторные преобразователи используются в системах любого типа, в том числе в приводах с синхронными и асинхронными электрическими машинами.

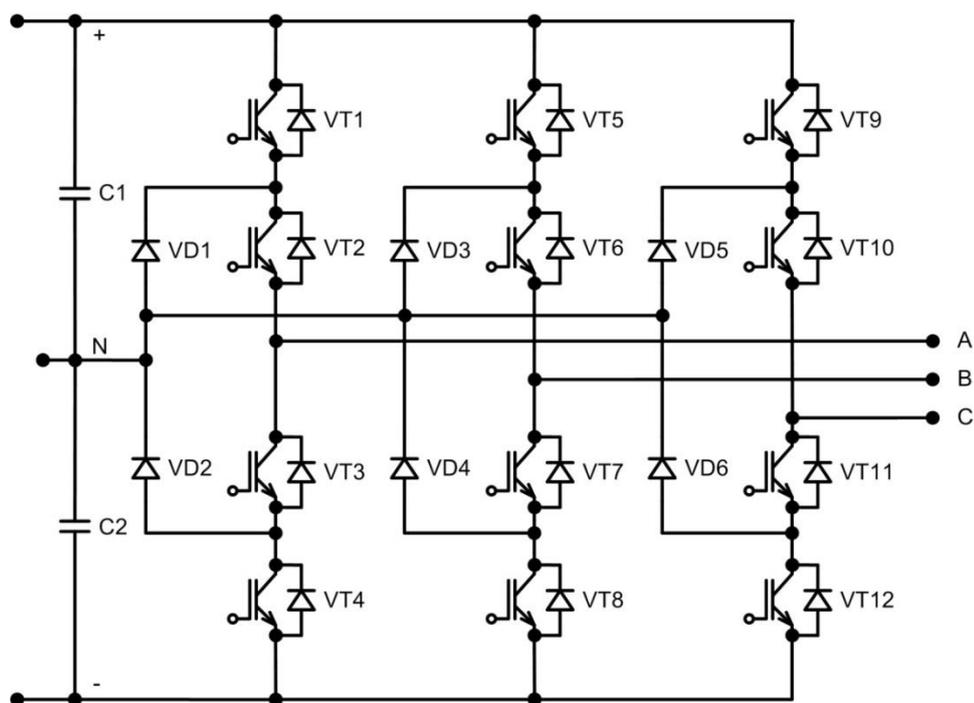


Рисунок 1.10 - Трехуровневый инвертор

Одно из направлений развития преобразователей – многоуровневые преобразователи частоты. На рисунке 1.10 изображена схема трехуровневого инвертора напряжения. В многоуровневых преобразовательных мостах в

каждом плече используется несколько транзисторов, включенных последовательно.

Напряжения между ними распределяется с помощью конденсаторов, включенных последовательно в звене постоянного напряжения, и разделительных диодов. В каждый момент времени в режиме ШИМ работает не все плечо моста, а только один из последовательно включенных приборов. Вследствие этого существенно уменьшаются динамические потери энергии в преобразователе. Уменьшается амплитуда пульсаций напряжений и токов на входе и выходе преобразователя. Использование многоуровневых схем позволяет построить преобразователи повышенного напряжения.

## 1.2 Типовые структуры ГЭУ

### 1.2.1 Малое гидрографическое судно «Вайгач»

За годы интенсивного развития систем электродвижения, создана типичная схема ЕЭЭС, широко распространенная и используемая как отечественными предприятиями, так и зарубежными фирмами. Примером такой схемы ЕЭЭС в отечественном судостроении, является схема малого гидрографического судна «Вайгач» проекта 19910, изображенная на рисунке 1.11 [14, 15]. В данной системе гребная электрическая установка (ГЭУ) и потребители собственных нужд (ПСН) подключаются к одной судовой электростанции (СЭС), что повышает надежность судна.

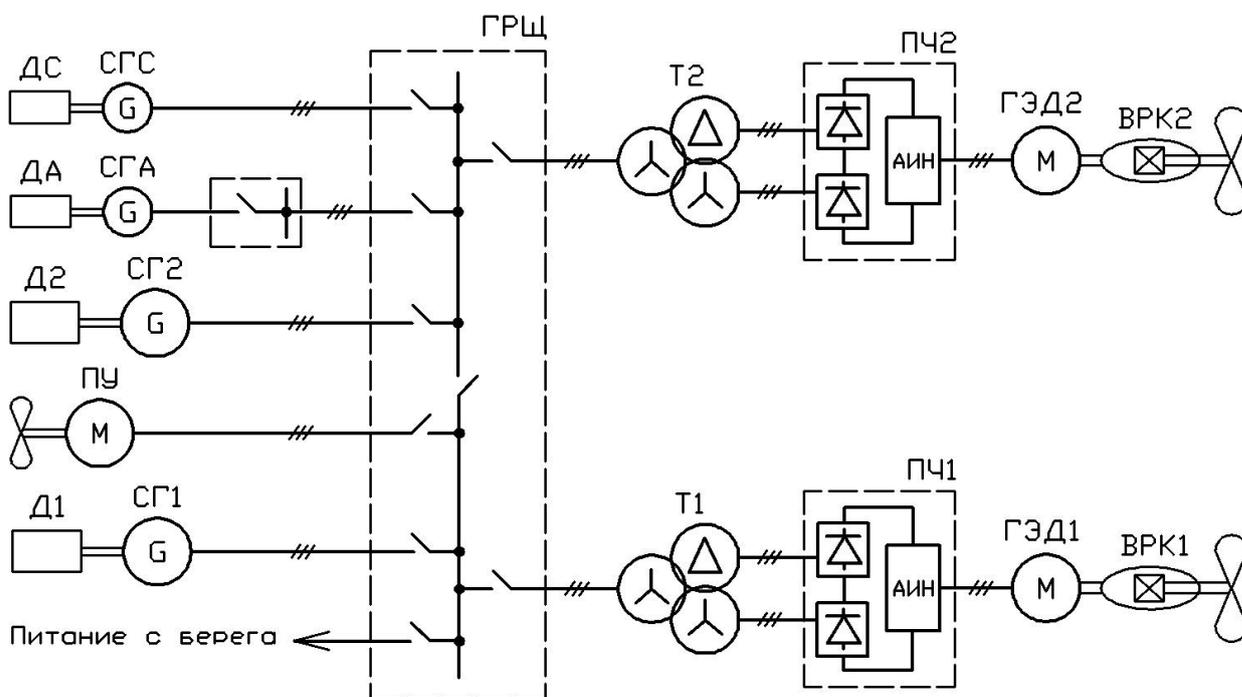


Рисунок 1.11 – Схема ЕЭЭС судна «Вайгач»

ЕЭЭС «Вайгач» состоит из следующих узлов:

- Двух главных дизель-генераторов мощностью по 1000 кВт;
- Щита главного распределительного (ГРЩ);
- Двух согласующих трансформаторов (ТРС) мощностью по 800 кВА;
- Двух преобразователей частоты (ПЧ) мощностью по 700 кВА;
- Двух гребных электродвигателей (ГЭД) мощностью по 550 кВт;

- Двух винто-рулевых колонок;
- Стояночного дизель-генератора;
- Аварийного дизель-генератора.

В составе ГЭУ применены двухзвенные преобразователи частоты, состоящие из выпрямительного устройства (ВУ), звена постоянного тока (ЗПТ), автономного инвертора напряжения (АИН). Выпрямительное устройство состоит из двух соединенных последовательно трехфазных выпрямителей Ларионова, что позволяет получить 12-пульсный выпрямитель, формирующий на выходе постоянное напряжение с малыми пульсациями. Для обеспечения нормальной работы 12-пульсного выпрямителя, требуется две системы трехфазных напряжений гальванически развязанных и имеющих фазовый сдвиг между одноименными линейными напряжениями в 30 электрических градусов. Для решения данной задачи в составе ГЭУ, используется согласующий трансформатор, на котором размещены три трехфазные обмотки. Первичная обмотка, соединенная звездой, подключается к шинам ГРЩ. Две вторичные соединенные звездой и треугольником подключаются к входам 12-пульсных выпрямителей преобразователя частоты. Выполнение вторичных обмоток согласующего трансформатора соединением «звезда-треугольник» позволяет компенсировать в магнитной системе трансформатора 5-ю и 7-ю гармонические составляющие и, тем самым, улучшить качество напряжения на шинах ГРЩ. Выпрямленное напряжение с малыми пульсациями поступает от ВУ на вход автономного инвертора напряжения, через фильтр в звене постоянного тока. Применение в АИН IGBT-транзисторов позволяет повысить частоту коммутации силовых полупроводниковых приборов, что вместе с поступающим на его вход постоянным напряжением с малыми пульсациями, позволяет получить высокое качество напряжения на выходе преобразователя частоты.

Таким образом, применение двухзвенного преобразователя частоты со звеном постоянного тока, содержащего 12-пульсный выпрямитель и автономный инвертор напряжения, позволяет повысить качество напряжения подаваемого на ГЭД, расширить диапазон регулирования частот вращения, повысить КПД, а также минимизировать габариты и потери на фильтрах расположенных на линии питания ПЧ-ГЭД. Наличие согласующего трансформатора позволяет получить две системы трехфазного напряжения необходимые для работы 12-пульсного выпрямителя преобразователя частоты, а также обеспечить электромагнитную совместимость ГЭУ с другими потребителями на судне.

### 1.2.2 Спасательное судно «Игорь Белоусов»

Другим примером применения типичной схемы в отечественном судостроении является спасательное судно «Игорь Белоусов» проекта 21300, схема ЕЭЭС которого приведена на рисунке 1.12.

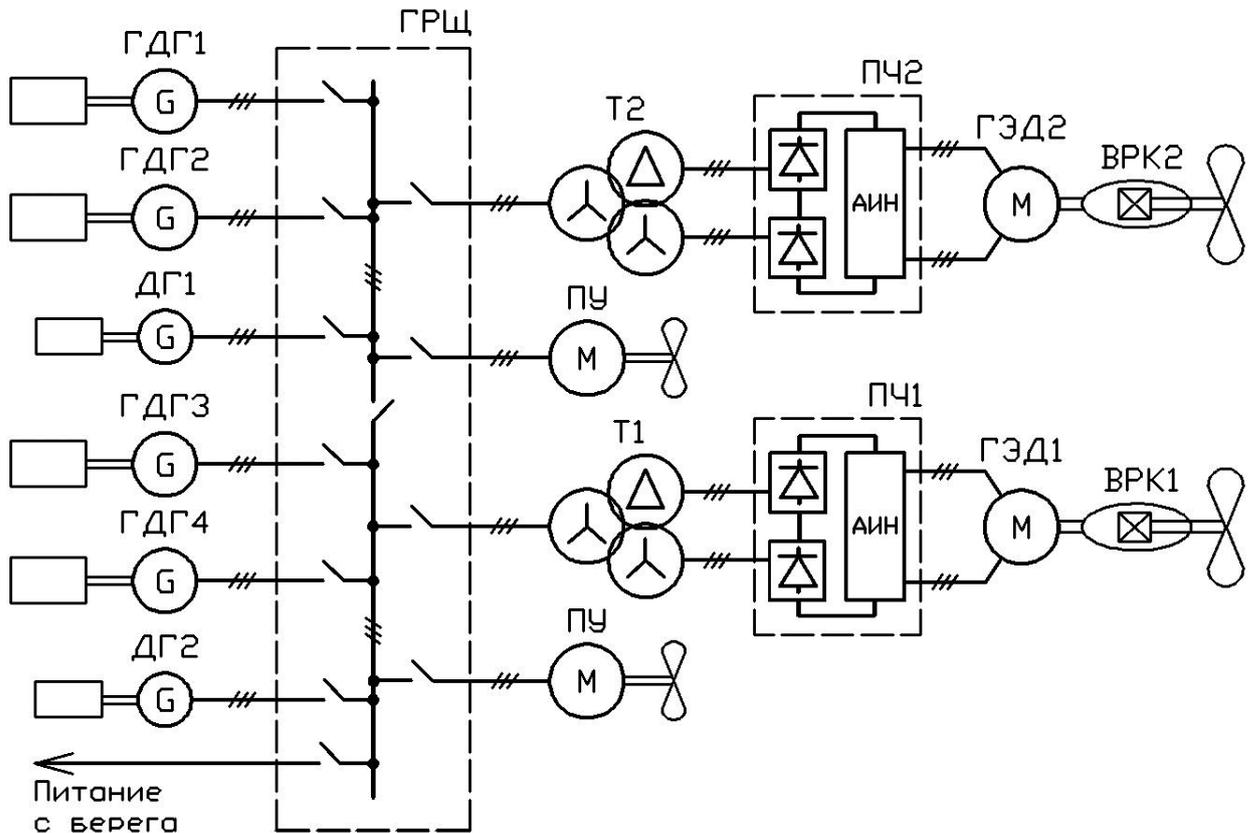


Рисунок 1.12 – ЕЭЭС спасательного судна «Игорь Белоусов»

ЕЭЭС спасательного судна «Игорь Белоусов» состоит из следующих узлов:

- Четырех главных дизель-генераторов мощностью по 1600 кВт;
- Щита главного распределительного (ГРЩ);
- Двух согласующих трансформаторов (ТРС) мощностью по 3000 кВА;
- Двух преобразователей частоты (ПЧ) мощностью по 3000 кВА;
- Двух гребных электродвигателей (ГЭД) мощностью по 2400 кВт;
- Двух подруливающих устройств (ПУ) мощностью по 680 кВт;
- Двух винто-рулевых колонок;
- Двух дизель-генераторов мощностью по 1000 кВт.

Также как и в ЕЭЭС гидрографического судна «Вайгач», в ЕЭЭС «Игорь Белоусов» двухзвенные преобразователи частоты на базе автономных инверторов напряжения регулируют частоту вращения гребных электродвигателей. Трансформатор согласующий (ТРС1, ТРС2), установленный на линии питания ГРЩ – ПЧ, обеспечивает нормальную работу 12-пульсного выпрямителя, входящего в состав ПЧ, электромагнитную совместимость преобразователя частоты с другими судовыми потребителями. В ГЭУ спасательного судна «Игорь Белоусов» применены синхронные гребные электродвигатели с двумя трехфазными обмотками, что позволяет: повысить надежность ГЭД, снизить пульсации электромагнитного момента, снизить токи через полупроводниковые вентили.

### 1.2.3 Круизное судно «Norwegian Epic»

В зарубежном судостроении типичная схема ЕЭЭС широко распространена и применяется на судах различного назначения. На рисунке 1.13 приведена схема ЕЭЭС круизного судна «Norwegian Epic» (Норвежский Эпос) [30].

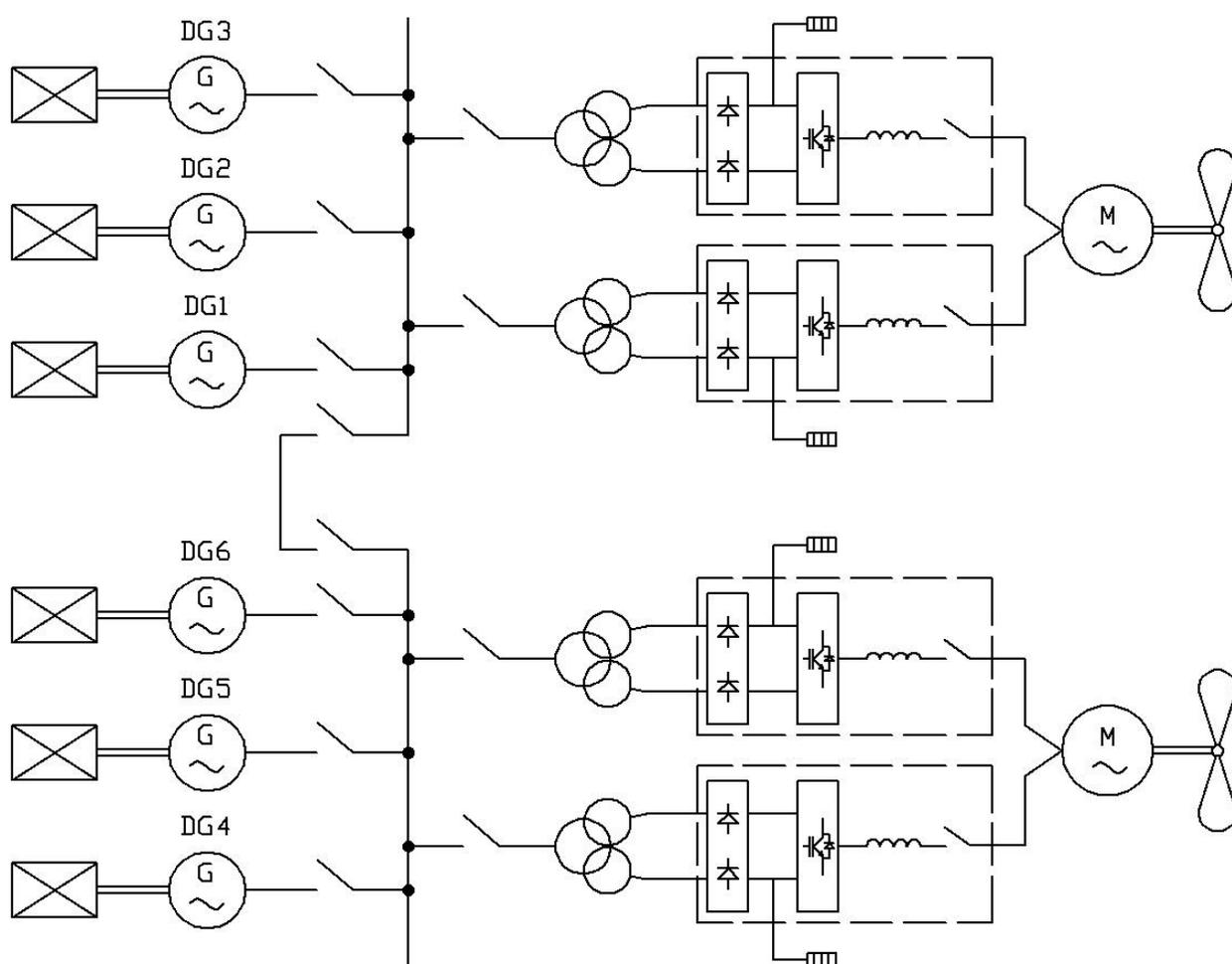


Рисунок 1.13 - Схема ЕЭЭС круизного судна «Norwegian Epic»

ГЭУ круизного судна «Norwegian Epic» оснащается двумя гребными электродвигателями по 24 мВт, на статоре которых размещены по две трехфазные обмотки. К каждой обмотке электродвигателя подключается преобразователь частоты с согласующим трансформатором. Таким образом, на каждый ГЭД приходится по два преобразователя частоты и два согласующих трансформатора.

### 1.2.4 Паром «Schleswig-Holstein»

На рисунке 1.14 приведена схема ЕЭЭС парома «Schleswig-Holstein», в которой преобразователи частоты, регулирующие частотой вращения гребных электродвигателей, получают питание от ГРЩ через согласующие трансформаторы [31].

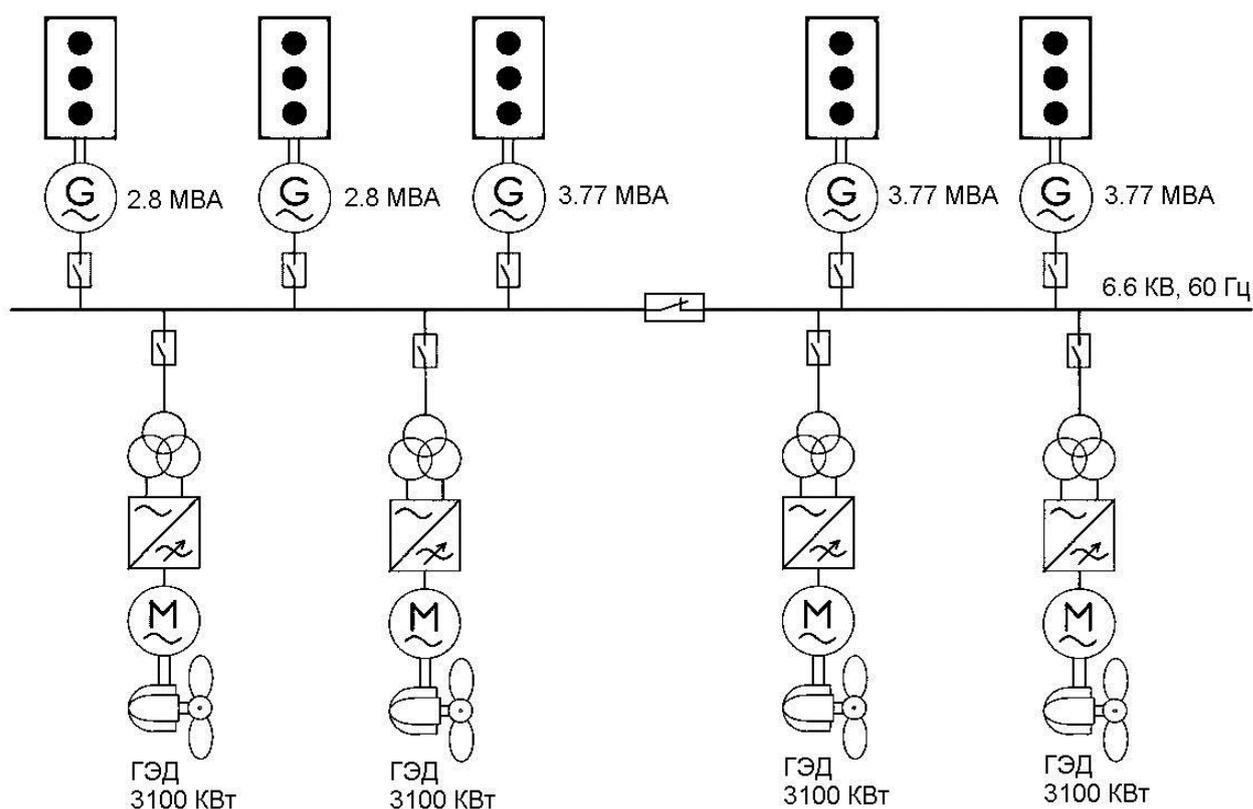


Рисунок 1.14 – ЕЭЭС парома «Schleswig-Holstein»

Таким образом, типичная схема единой электроэнергетической системы, нашла широкое распространение в отечественном и зарубежном судостроении и применяется на судах различного назначения.

Отличительной особенностью схем ЕЭЭС приведенных на рисунках 1.11-1.14, является наличие согласующего трансформатора, питающего двухзвенный преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения.

Согласующий трансформатор выполняет две основные функции:

- формирование двух гальванически развязанных напряжений требуемой величины, имеющих фазовый сдвиг в 30 электрических градусов,

необходимых для работы 12-пульсного выпрямителя преобразователя частоты;

- обеспечение электромагнитной совместимости ПЧ с другими судовыми потребителями.

## **Выводы по Главе I**

Наиболее широкое распространение на судах различного назначения получают единые электроэнергетические системы, в которых гребная электрическая установка и потребители собственных нужд, получают питание от одной судовой электростанции судна.

Судовая электростанция судна, строится на базе синхронных генераторов переменного тока, частота напряжения которой составляет 50 или 60 Гц, а уровень напряжения варьируется в зависимости от величины необходимой мощности.

В состав гребной электрической установки входят основные блоки:

- трансформатор согласующий;
- преобразователь частоты;
- электродвигатель гребной;
- движитель судовой.

В ГЭУ могут применяться как установки «Азипод», так и винторулевые колонки, приводимые по вращению машиной переменного тока, как правило, асинхронным или синхронным электродвигателями.

Для регулирования частоты вращения вала гребного электродвигателя, как правило, используется двухзвенный преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения.

Преобразователь частоты состоит из следующих основных блоков:

- автономного инвертора напряжения;
- емкостного фильтра звена постоянного тока;
- выпрямителя трехфазного 12-пульсного;
- системы управления.

Трехфазная обмотка гребного электродвигателя подключается к выходу автономного инвертора напряжения, выполненного по мостовой

схеме на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзистор), который преобразует постоянное напряжение на входе автономного инвертора напряжения, в импульсное напряжение высокой частоты на выходе. Автономный инвертор напряжения получает питание от 12-пульсного выпрямителя.

Трансформатор согласующий, расположенный на линии питания щита главного распределительного и преобразователя частоты гребной электрической установки предназначен для:

- обеспечения электромагнитной совместимости ГЭУ и ПСН;
- формирования двух систем трехфазного напряжения, необходимых для работы 12-пульсного выпрямителя преобразователя частоты;
- преобразования уровня напряжения судовой электростанции в требуемый уровень для ГЭУ;
- обеспечения гальванической развязки судовой электростанции судна и гребной электрической установки.

Потребители собственных нужд запитываются от вторичной обмотки понижающего трехфазного трансформатора, первичная обмотка которого, подключается к ГРЩ.

Таким образом, рассмотренная типовая структура ЕЭЭС получила наиболее широкое распространение в отечественном и зарубежном судостроении.

Рассмотренная структура ЕЭЭС широко применяется на судах различного назначения.

## Глава 2 Судовые бестрансформаторные электроэнергетические системы

На судах, имеющих системы электродвижения, основными потребителями электроэнергии являются гребные электрические установки. Остальные судовые потребители электроэнергии могут иметь суммарную мощность значительно меньшую мощности ГЭУ. Для таких судов целесообразно строить электроэнергетическую систему (ЭЭС) таким образом, чтобы сократить число преобразований электроэнергии при ее передаче от генераторов к гребным электродвигателям (ГЭД). Обеспечить электроэнергией остальных судовых потребителей технически проще. Для снижения потерь мощности в ЭЭС при передаче электроэнергии от судовой электростанции до гребных электродвигателей можно исключить из цепи передачи электроэнергии от генераторов к ГЭД трансформаторы.

Один из вариантов бестрансформаторной судовой ЭЭС рассмотрен в [30, с. 296 - 299]. Авторы указывают, что параметры ЭЭС могут быть существенно повышены за счет исключения из структуры ЭЭС трансформаторов. На рисунке 2.1 схема преобразования электроэнергии для питания одного из ГЭД СЭЭС, предлагаемая в [30].

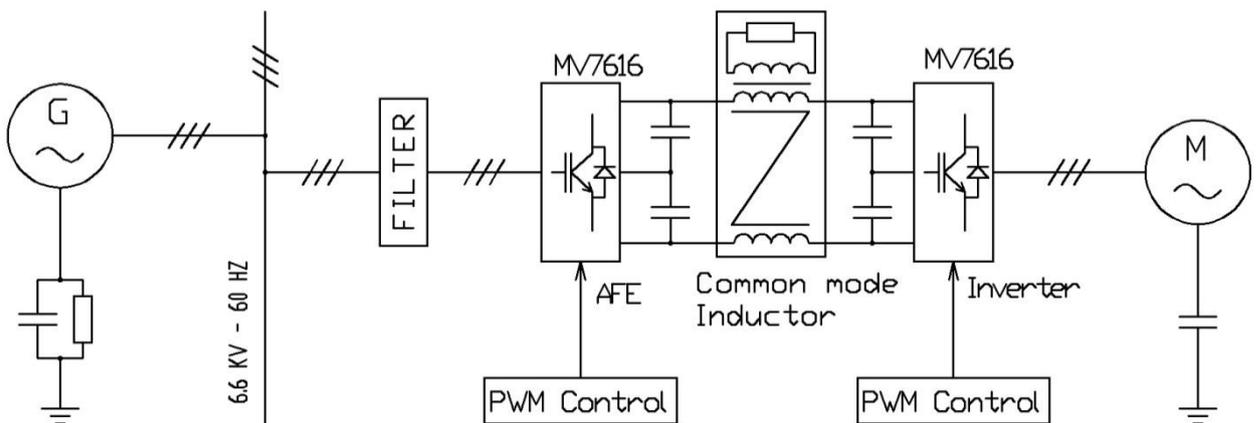


Рисунок 2.1 - Схема электроэнергетической установки

В приведенной схеме электроэнергия с выхода ГРЩ через фильтр поступает на вход активного выпрямителя, с выхода активного выпрямителя через второй фильтр поступает на вход инвертора, и с выхода инвертора подается на гребной электродвигатель. Силовой трансформатор в этой схеме СЭЭС исключен.

По заключению авторов [30, с. 296 - 299] бестрансформаторная СЭЭС с ГЭУ обладает следующими преимуществами:

- высокий КПД;
- высокий коэффициент мощности;
- снижение массы;
- экономия пространства;
- уменьшение стоимости ГЭУ.

## 2.1 Судовые бестрансформаторные ЭЭС с многофазными генераторами

Исключить трансформаторы из цепи питания ГЭД без снижения качества напряжения питания ГЭД можно также за счет применения в составе судовой электростанции многофазных генераторов. На рисунке 2.2 приведена схема бестрансформаторной СЭЭС, разработанная совместно ЦНИИ СЭТ и ГМТУ [32] на основе СЭЭС судна «Вайгач».

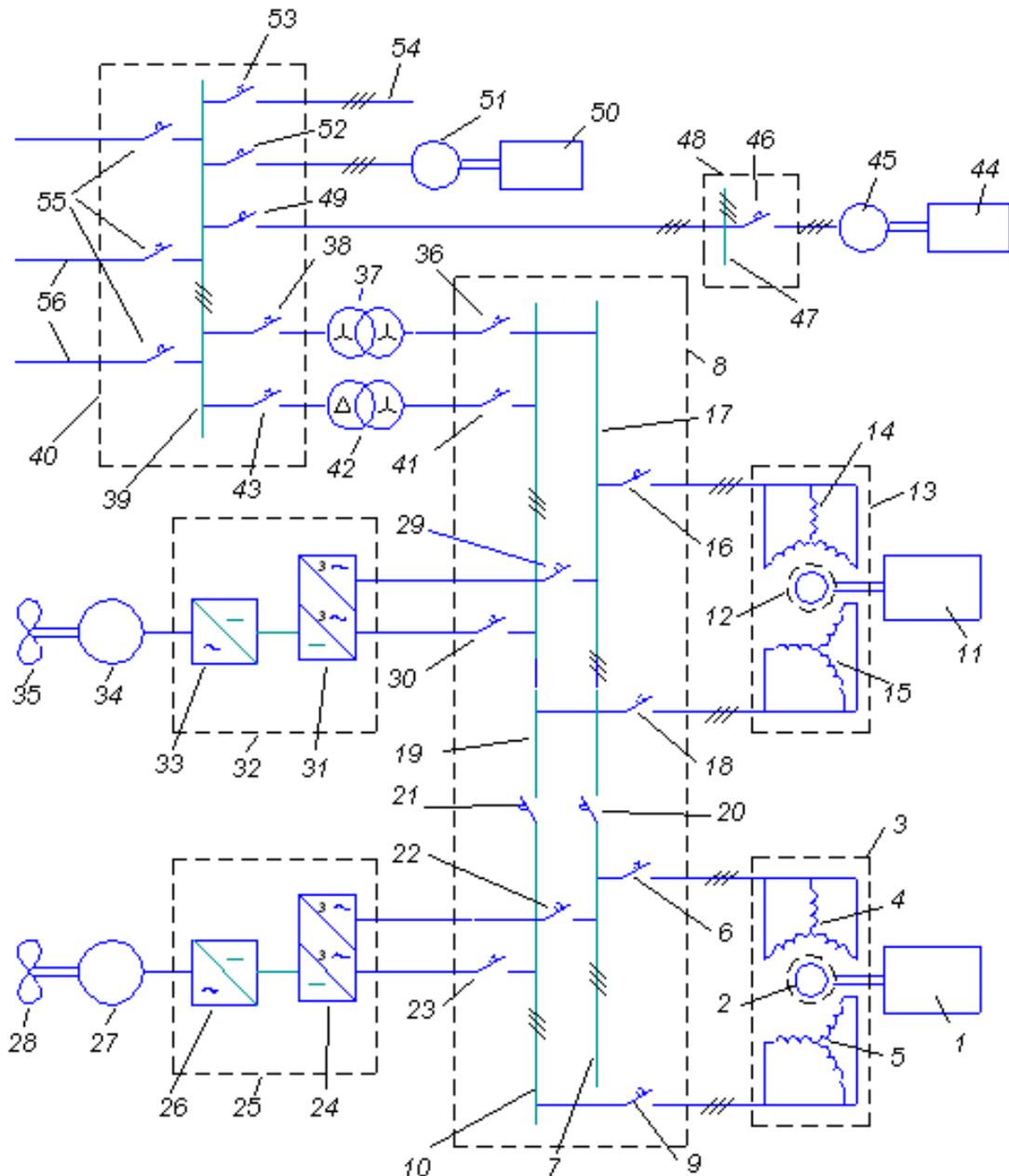


Рисунок 2.2 - Схема бестрансформаторной СЭЭС

## Основные условные обозначения на рисунке 2.2:

- 1, 11 – первичные тепловые двигатели;
- 3, 13 – синхронные генераторы СГ1 и СГ2;
- 2, 12 – роторы СГ1 и СГ2;
- 4 (14) и 5 (15) – две трехфазные обмотки статора СГ1 (СГ2);
- 8 – ГРЩ;
- 7 и 10 – две трехфазные линии ГРЩ;
- 25 и 32 - преобразователи частоты;
- 24 и 31 – выпрямители;
- 27 и 34 – гребные электродвигатели;
- 37 и 42 – трансформаторы;
- 40 – щит судовых потребителей.

Обмотки статора 4 и 5 (соответственно 14 и 15) расположены на статоре СГ1 (СГ2) таким образом, чтобы их одноименные линейные напряжения были смещены на 30 электрических градуса. Трехфазные обмотки 4 и 5 (14 и 15) не связаны гальванически, и каждая из них подключается к отдельным шинам ГРЩ 7 и 10. Синхронизация генераторов 2 и 12 может производиться по напряжениям одной пары трехфазных обмоток 4 и 14, так как напряжения на другой паре обмоток 5 и 15 будут также синхронизированы, поскольку их сдвиг относительно напряжений на обмотках 4 и 14 ровно на 30 эл. градуса обеспечивается конструкцией статоров СГ1 и СГ2. С шин ГРЩ 7 и 10 трехфазные напряжения, смещенные на 30 эл. градусов, поступают на вход выпрямителей 24 и 31, и на выходе выпрямителей вырабатывается 12-пульсное выпрямленное напряжение. Выпрямленное напряжение поступает на входы инверторов 26 и 33, которые вырабатывают переменное напряжение для управления гребными асинхронными двигателями.

По сравнению с СЭЭС судна «Вайгач» в этой схеме исключен трансформатор в цепи передачи главного потока электроэнергии - от синхронных генераторов к гребным электродвигателям. В то же время на выходе выпрямителя обеспечивается высокое качество постоянного напряжения, благодаря размещению на статорах генераторов по две трехфазные обмотки и применению 12-пульсного выпрямителя.

Для питания электроэнергией судовых потребителей используются два трехфазных трансформатора 37 и 42. На первичные обмотки трансформаторов подаются смещенные по фазе на 30 эл. градуса трехфазные напряжения, но так как вторичные обмотки трансформаторов имеют разные схемы соединения, треугольник и звезда, напряжения на выходе трансформаторов совпадают по фазе и могут быть объединены на одной трехфазной линии 39 щита питания 40 судовых потребителей. Таким образом, питание судовых потребителей обеспечивается от всех обмоток синхронных генераторов, и надежность снабжения судовых потребителей электроэнергией не снижается.

Идея применения многофазных синхронных генераторов реализована также в [33] (рисунок 2.3).

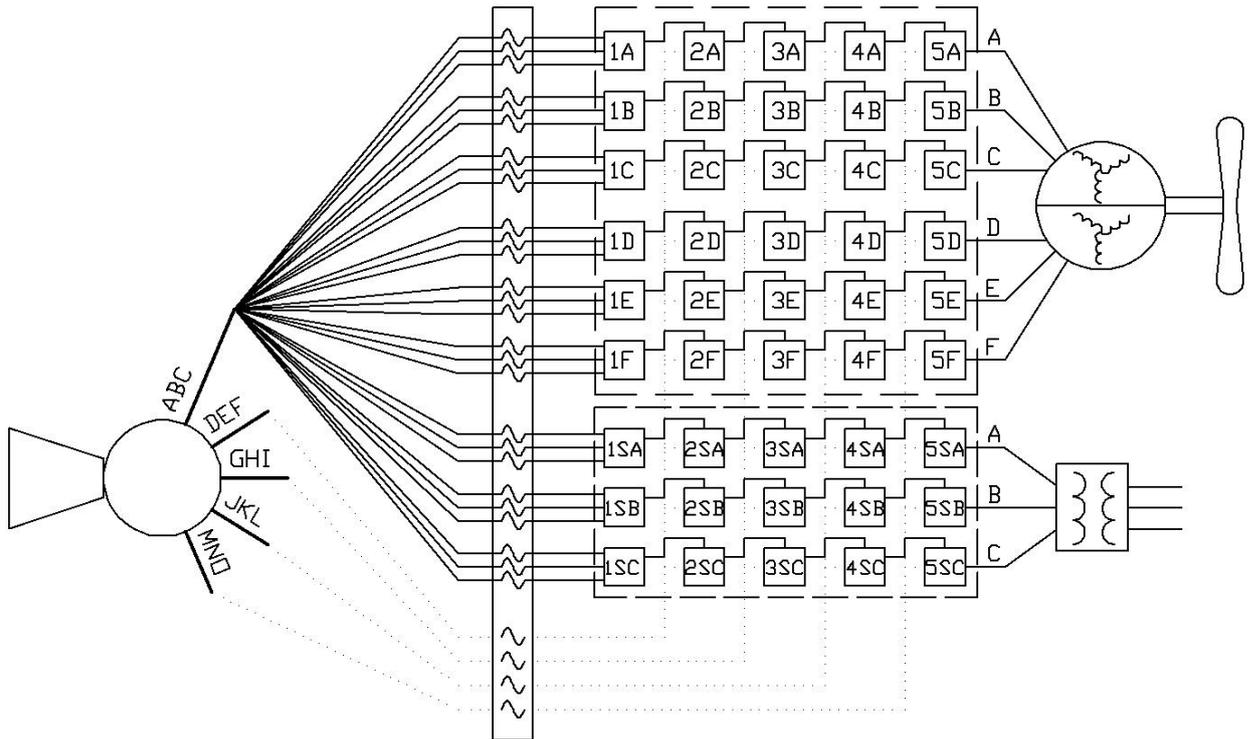


Рисунок 2.3 - Высоковольтная бестрансформаторная ЕЭС

В единой СЭС изображенной на рисунке 2.3, высоковольтный СГ содержит 45 изолированных друг от друга трехфазных обмоток. Одноименные линейные напряжения, которые имеют аналогичные значения, совпадают по фазе. Питание гребного электродвигателя осуществляется от ПЧ, состоящего из пяти, соединенных последовательно ячеек для каждой фазы.

## **2.2 Судовые бестрансформаторные ЭЭС с многоуровневыми инверторами**

В последние годы для питания мощных гребных электродвигателей переменного тока на судах в составе преобразователей частоты применяются многоуровневые инверторы, которые обеспечивают высокое качество напряжения питания электродвигателей. Для питания многоуровневых инверторов необходимо иметь от двух до пяти гальванически не связанных источников постоянного напряжения. Для этого в преобразователе частоты устанавливают выпрямители, число которых равно числу необходимых источников постоянного напряжения, и для питания каждого из этих выпрямителей нужно иметь гальванически не связанные источники переменного тока. Приходится с трехфазной линии ГРЩ подавать питание на первичную обмотку трехфазных трансформаторов, и со вторичных обмоток трансформаторов, число которых должно быть равно числу выпрямителей, подавать питание на каждый из выпрямителей преобразователей частоты. Таким образом, при использовании многоуровневых инверторов в цепь передачи электроэнергии от генераторов к гребным электродвигателям вводится трансформатор большой мощности.

Между тем и в случае использования многоуровневых инверторов применения мощных трансформаторов в цепи питания ГЭД можно избежать. На рисунке 2.4 приведена схема бестрансформаторной СЭЭС, в составе преобразователя частоты которой используются многоуровневые инверторы [34].

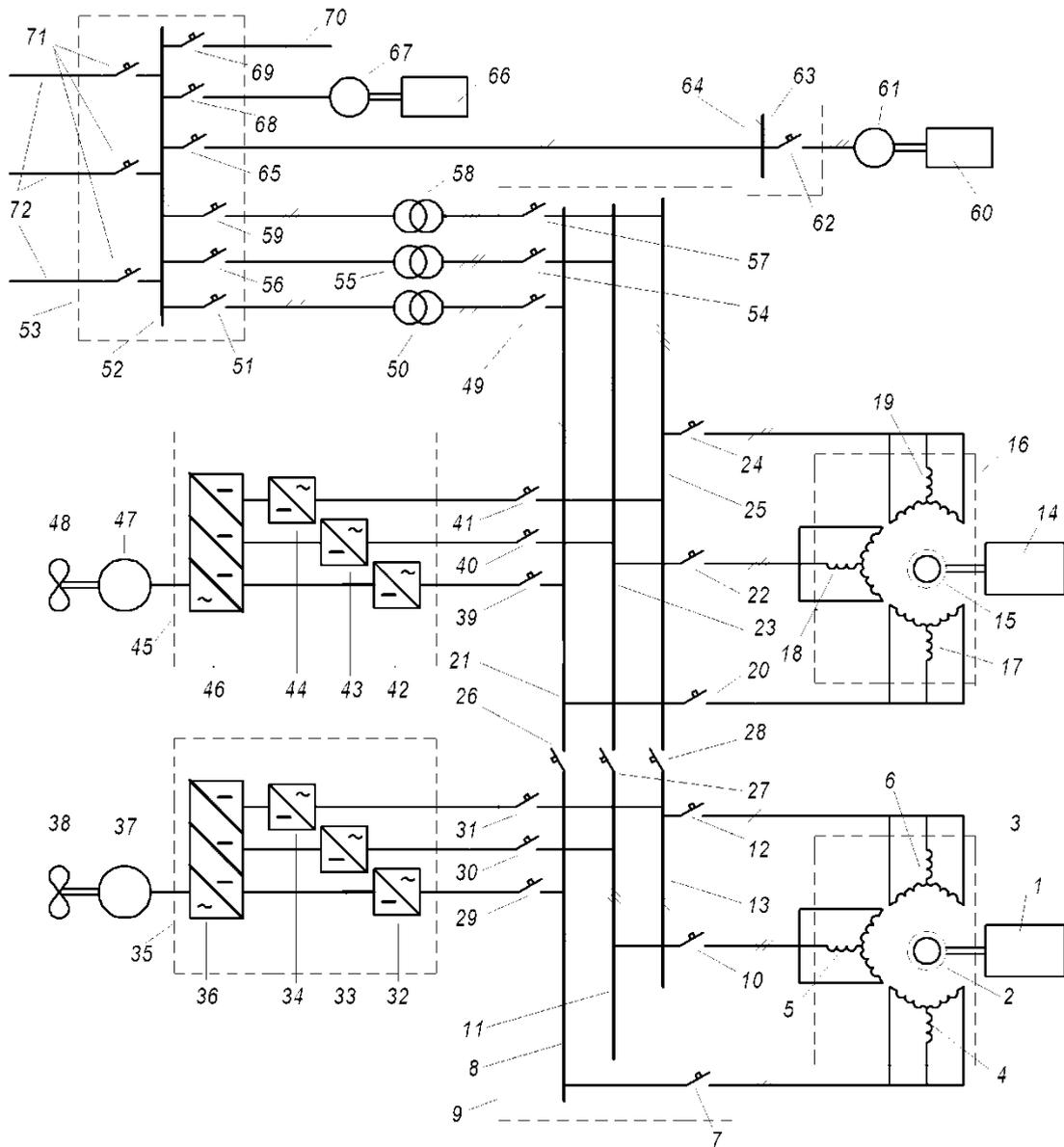


Рисунок 2.4 - Схема бестрансформаторной СЭЭС

Основные условные обозначения на рисунке 2.4:

- 1, 14 – первичные тепловые двигатели;
- 3, 16 – синхронные генераторы СГ1 и СГ2;
- 2, 15 – роторы СГ1 и СГ2;
- 4 (17), 5 (18) и 6 (19) – три трехфазные обмотки статора СГ1 (СГ2);
- 9 – ГРЦ;

8, 11 и 13 – три трехфазные линии ГРЩ;

35 и 45 - преобразователи частоты;

32 (42), 33 (43) и 34 (44) – выпрямители;

36 (46) – многоуровневые инверторы;

37 и 47 – гребные электродвигатели;

50, 55 и 58 – трансформаторы;

53 – щит судовых потребителей.

В изображенной на рисунке 2.4 схеме СЭЭС на статоре каждого синхронного генератора размещены три изолированные друг от друга трехфазные обмотки 4 (17), 5 (18) и 6 (19). Трехфазные обмотки размещены на статорах генераторов таким образом, чтобы одноименные линейные напряжения обмоток 4 (17), 5 (18) и 6(19) совпадали по фазе. Синхронизация генераторов выполняется по напряжениям одной пары обмоток генераторов. Три пары обмоток генераторов после синхронизации подключаются к трем гальванически не связанным трехфазным линиям 8, 11 и 13 ГРЩ 9. От линий 8, 11 и 13 трехфазные напряжения поступают на выпрямители 32 (42), 33 (43) и 34 (44) и с выходов выпрямителей три постоянных напряжения подаются на многоуровневые инверторы 36 (46), вырабатывающие напряжение питания для ГЭД 37 и 47.

Для питания судовых потребителей питание с линий 8, 11 и 13 ГРЩ 9 подается на первичные обмотки трансформаторов 50, 55 и 58, а с вторичных обмоток этих трансформаторов трехфазное напряжение подается на одну трехфазную линию 52 щита 53 судовых потребителей. Применение для питания судовых потребителей трансформаторов 50, 55 и 58 позволяет суммировать потоки электроэнергии от всех обмоток синхронных генераторов и сохранить гальваническую развязку источников питания

выпрямителей 32 (42), 33 (43) и 34 (44) преобразователей частоты 35 и 45. Кроме того трансформаторы 50, 55 и 58 допускают применение синхронных генераторов с повышенным напряжением, более подходящим для мощных гребных электродвигателей.

Еще один вариант бестрансформаторной СЭЭС приведен на рисунке 2.5.

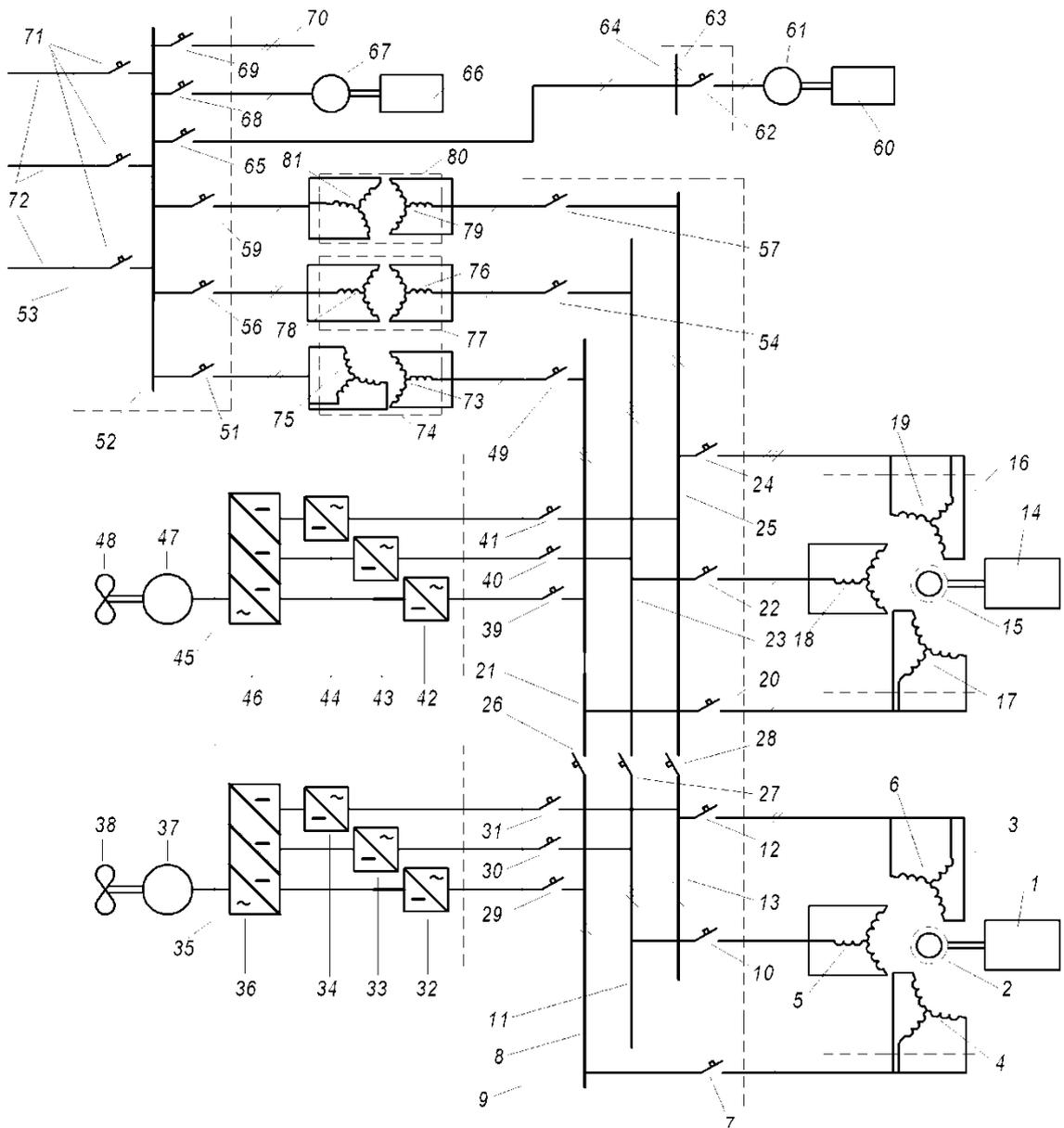


Рисунок 2.5 - Второй вариант схемы бестрансформаторной СЭЭС

Обозначения компонентов на рисунке 2.5 такие же, как и на рисунке 2.4. В схеме по рисунку 2.4 трехфазные обмотки 4 (17), 5 (18) и 6 (19) размещены на статоре генератора 3 (16) аналогичным образом в одних и тех же пазах, поэтому одноименные фазные и линейные напряжения на этих обмотках совпадают по фазе. При таком размещении обмоток статора их взаимно-индуктивная связь максимальна, и коммутационные помехи, возникающие в цепи одной трехфазной обмотке, передаются в другую без подавления, что может вызвать снижение качества напряжения питания ГЭД.

В схеме по рисунку 2.5 трехфазные обмотки 4 (17), 5 (18) и 6 (19), размещены в пазах статора со смещением, и одноименные напряжения на этих обмотках смещены по фазе на определенный угол. Это позволяет уменьшить взаимно-индуктивную связь трехфазных обмоток, размещенных на одном и том же статоре, и снизить уровень коммутационных помех.

Однако суммировать потоки электроэнергии от различных обмоток статора при наличии сдвига по фазе одноименных трехфазных напряжений обмоток для питания судовых потребителей с помощью обычных трансформаторов нельзя. Поэтому в схеме на рисунке 2.5 суммирование потоков электроэнергии различных обмоток статора осуществляется с помощью трансформаторов 50, 55 и 58 с вращающимся магнитным полем, которые позволяют обеспечить фазы одноименных напряжений на вторичных трехфазных обмотках одинаковыми. Это дает возможность суммировать потоки электроэнергии с вторичных обмоток трансформаторов 50, 55 и 58 на одной трехфазной линии 52 щита судовых потребителей 53.

Бестрансформаторные СЭЭС, схемы которых приведены на рисунке 2.4 и 2.5 имеют один существенный недостаток. Если нагрузка на гальванически не связанные трехфазные обмотки одного и того же генератора будет различной, то напряжения на выходе обмоток будет отличаться, и система стабилизации напряжения не сможет обеспечить

стабильность напряжений на всех обмотках генератора. Тогда будут отличаться и напряжения на вторичных обмотках трансформаторов 50, 55 и 58, и подключать их на одну линию 52 щита судовых потребителей 53 будет нельзя.

На рисунке 2.6 приведена схема СЭЭС, в которой стабильность напряжений на обмотках генераторов при различных нагрузках на них обеспечивается [35].

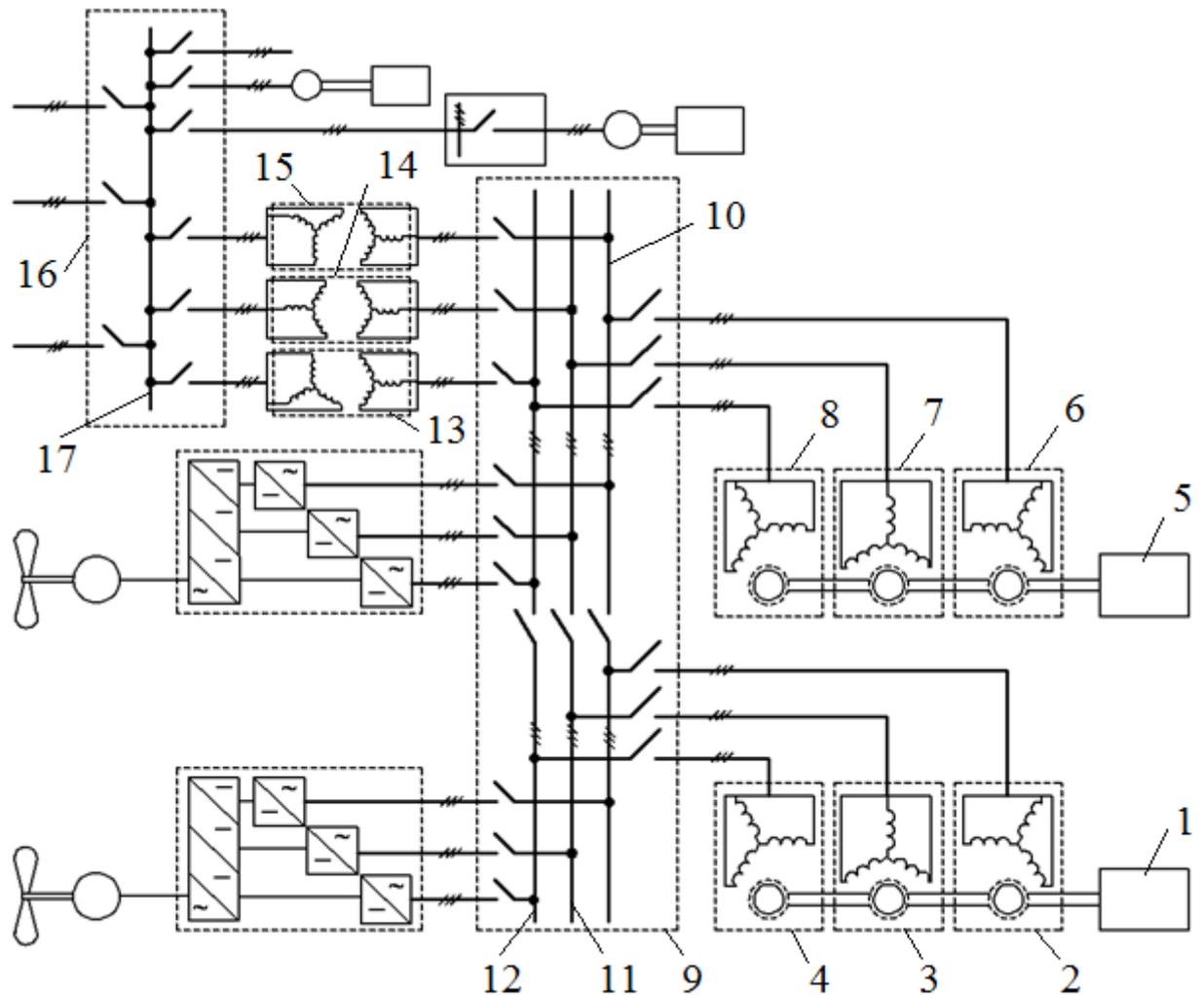


Рисунок 2.6 - Схема бестрансформаторной СЭЭС со стабилизацией выходных напряжений генераторов

В этой СЭЭС вал каждого первичного теплового двигателя 1 (5) соединен одновременно с валами трех синхронных генераторов 2, 3 и 4 (6, 7

и 8). На статоре каждого генератора располагается трехфазная обмотка, напряжение на которой стабилизируется автономной системой стабилизации. Обмотки статоров генераторов, присоединенных к одному и тому же первичному двигателю, гальванически не связаны, и обмотка статора каждого генератора подключается к одной из трех трехфазных линий ГРЩ. Валы трех генераторов в каждой группе могут быть соединены так, чтобы фазы выходных напряжений генераторов совпадали или отличались на определенный угол.

Если фазы выходных напряжений генераторов одной и той же группы совпадают, то при суммировании потоков электроэнергии этих генераторов для питания судовых потребителей можно использовать обычные трансформаторы.

Если фазы выходных напряжений генераторов одной и той же группы отличаются, то при суммировании потоков электроэнергии этих генераторов для питания судовых потребителей нужно применить трансформаторы с вращающимся магнитным полем, которые позволят привести фазы напряжений на вторичных обмотках к одному значению.

На рис. 2.6 изображена схема СЭЭС, в которой фазы напряжений на выходе синхронных генераторов одной и той же группы отличаются. Синхронизацию генераторов двух групп можно выполнять по напряжениям любой пары генераторов, например, 2 и 6, так как валы генераторов соединены таким образом, чтобы при совпадении фаз напряжений одной пары генераторов совпали и напряжения двух других пар генераторов 3 и 7, 4 и 8. После синхронизации фазы аналогичных пар генераторов подключаются к одной из трех трехфазных линий 10, 11 или 12 ГРЩ. От каждой линии ГРЩ напряжение подается на один из трех выпрямителей преобразователя частоты. На выходе выпрямителей получают три гальванически не

связанных постоянных напряжения необходимых для работы многоуровневого инвертора, питающего ГЭД.

Для питания судовых потребителей потоки электроэнергии всех шести генераторов нужно суммировать, но для этого необходимо, чтобы напряжения всех генераторов совпадали по фазе. Выравнивание фаз напряжений генераторов обеспечивается с помощью трансформаторов 13, 14 и 15 с вращающимся магнитным полем. На первичные обмотки трансформаторов 13, 14 и 15 подается питание с одной из трех линий ГРЩ, а вторичные обмотки, фазы напряжений на которых равны, подключаются к общей линии 17 щита судовых потребителей 18.

В схеме СЭЭС по рисунку 2.6 обмотки статоров синхронных генераторов не имеют ни гальванической, ни индуктивной связи. Стабилизация напряжения каждого из шести генераторов обеспечивается автономной системой стабилизации напряжения, поэтому допускается разница нагрузок каждого генератора. СЭЭС обеспечивает высокую надежность снабжения электроэнергией судовых потребителей.

Соединение валами одного первичного теплового с валами трех генераторов одновременно не вызывает принципиальных трудностей. Можно вспомнить, что на атомных ледоколах типа «Арктика» с валом одной паровой турбины, также как и в схеме по рисунку 2.6. соединялись валы трех генераторов.

Число фаз обмоток статоров каждого генератора в СЭЭС по рисунку 2.6 можно увеличить, это снизит пульсации постоянного напряжения на выходе выпрямителей, и повысит качество напряжения на выходе инверторов.

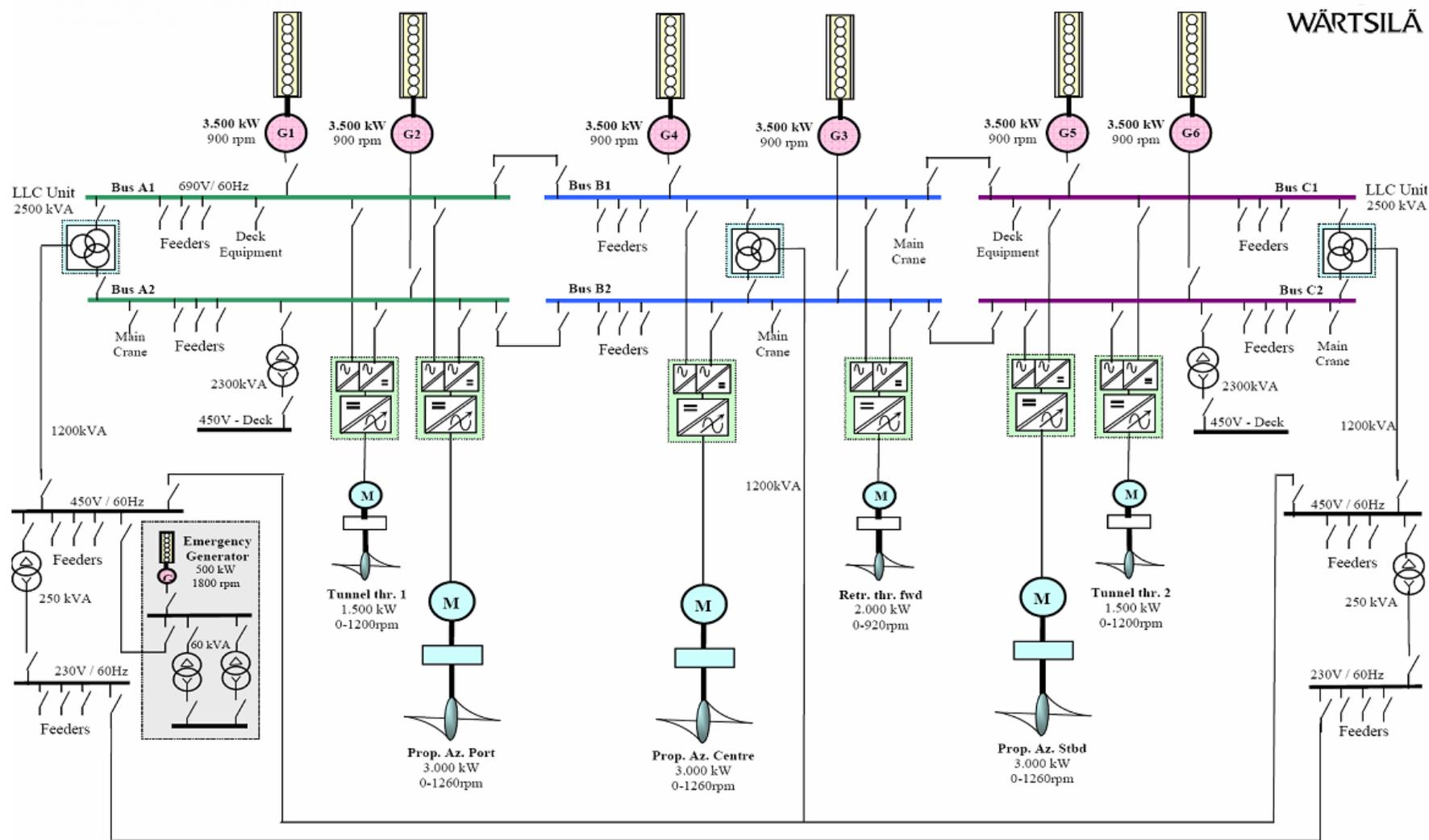
### 2.3 Wärtsilä Low Loss Concept

Новую структуру судовой ЕЭЭС предложила судостроительная фирма «Вяртсиля» [37]. Новую структуру специалисты фирмы «Вяртсиля» назвали LLC – Low Loss Concept (рисунок 2.7).

В соответствии с этой концепцией в составе электростанции используются низковольтные генераторы (690 В), а ГРЩ имеет не одну линию шин, к которой подключаются генераторные агрегаты, а две. Генераторные агрегаты синхронизируются так, чтобы напряжения на двух линиях шин были сдвинуты на  $30^\circ e$ . На преобразователи частоты, питающие основные потребители электроэнергии питание поступает напрямую от линий ГРЩ. На входе преобразователи имеют два выпрямителя, и каждый из них получает питание от одной из двух линий шин ГРЩ, а выходы выпрямителей соединены. Поскольку напряжения на двух линиях шин сдвинуты на  $30^\circ e$ , то на выходе выпрямителей получается выпрямленное 12-пульсное напряжение с минимальными пульсациями.

Для питания остальных судовых потребителей используются трансформаторы, имеющие две первичные обмотки, каждая из которых подключена к одной из двух линий ГРЩ. Первые гармоники напряжения на первичных обмотках смещены на  $30^\circ e$ , а пятая и седьмая гармоники смещены на  $150^\circ$  и  $210^\circ$  и взаимно подавляют друг друга. В результате на вторичной обмотке, с которой снимается напряжение питания для общесудовых потребителей, качество напряжения значительно повышается.

В аварийной ситуации эти же трансформаторы могут использоваться для передачи электроэнергии с одной линии шин на другую, в результате мощность ГЭУ уменьшится только на 25%.



WÄRTSILÄ

Рисунок 2.7 – Схема ЕЭЭС фирмы «Вяртсиля»

При компоновке элементов и узлов ЕЭЭС на судне фирме «Вяртсиля» удалось разместить большую часть энергетического оборудования в носовой части судна, освободив кормовую часть для грузов.

Специалисты «Вяртсиля» отмечают следующие достоинства системы LLC [37]:

- высокая степень резервирования – любой отказ приводит только к уменьшению мощности ГЭУ на 25%, все движители сохраняют 75% мощности;
- передача электроэнергии от генераторов к преобразователям частоты ГЭУ происходит напрямую, без промежуточных трансформаторов – это обеспечивает высокий к.п.д. системы и значительный выигрыш в весе и габаритах;
- низковольтная система более безопасна для экипажа и компактна для размещения на судне;
- уровень гармонических составляющих напряжения сети меньше 5%;
- низкие токи короткого замыкания.

## **2.4 Судовая бестрансформаторная СЭЭС с шестифазными генераторами и многоуровневыми инверторами**

В [36] предложена схема ЕЭЭС, в которой используются главные генераторы с одной многофазной обмоткой на статоре.

Выполнение в судовой электроэнергетической установке каждого главного генератора с одной многофазной обмоткой на статоре с числом фаз более трех, фазы которой соединены звездой или треугольником, а также линий главного распределительного щита с таким же числом фаз, что и обмотки главных синхронных генераторов, позволяет получить две и более системы гальванически развязанных многофазных напряжений, необходимых для работы преобразователя частоты с многоуровневыми инверторами. При этом каждый синхронный генератор имеет собственную автономную систему стабилизации напряжения, поэтому на выходе всех многофазных обмоток и на линиях главного распределительного щита будет обеспечено одинаковое напряжение, что позволяет исключить уравнительные токи во вторичных обмотках трансформаторов, подключенных к одной линии питания распределительного щита остальных судовых потребителей. Кроме того, обмотки разных синхронных генераторов практически не имеют магнитной связи и не создают взаимных искажений выходного напряжения. Таким образом, в рассматриваемой судовой электроэнергетической установке обеспечивается стабильное напряжение на линиях главного распределительного щита и исключаются уравнительные токи во вторичных обмотках трансформаторов, а также исключается взаимное искажение напряжения из-за индуктивной связи между обмотками, вследствие чего повышается к.п.д. электроэнергетической установки.

На рисунке 2.8 показана структурная схема судовой электроэнергетической установки [36], в которой первый главный дизель (или турбина) 1 соединен выходным валом 2 с ротором 3 синхронного

генератора 4, на статоре которого находится многофазная обмотка 5, имеющая число фаз более трех.

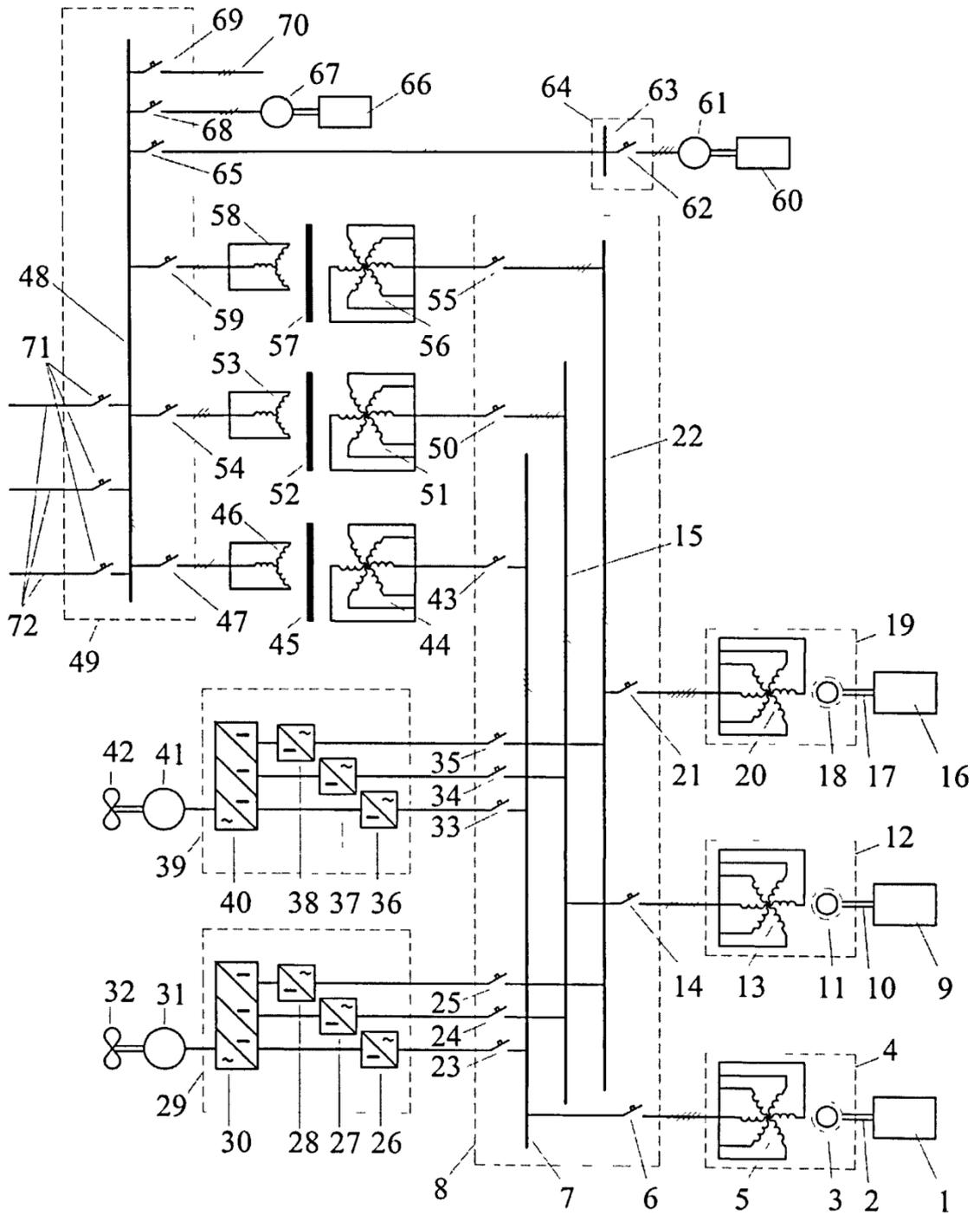


Рисунок 2.8 - Схема бестрансформаторной СЭЭС с шестифазными генераторами и многоуровневыми инверторами

Выводы многофазной обмотки 5 через автоматический выключатель 6 подключаются к многофазной линии 7 главного распределительного щита 8. Число фаз линии 7 равно числу фаз обмотки 5. Второй главный дизель 9 соединен выходным валом 10 с ротором 11 синхронного генератора 12, на статоре которого находится многофазная обмотка 13, аналогичная многофазной обмотке 5. Выводы многофазной обмотки 13 через автоматический выключатель 14 подключаются к многофазной линии 15 главного распределительного щита 8. Третий главный дизель 16 соединен выходным валом 17 с ротором 18 синхронного генератора 19, на статоре которого находится многофазная обмотка 20, аналогичная многофазным обмоткам 5 и 13. Выводы многофазной обмотки 20 через автоматический выключатель 21 подключаются к многофазной линии 22 главного распределительного щита 8. Многофазные линии 7, 15 и 22 гальванически не соединены.

К многофазным линиям 7, 15 и 22 с помощью автоматических выключателей соответственно 23, 24 и 25 подключаются входы многофазных выпрямителей 26, 27 и 28, которые входят в состав преобразователя частоты 29. Выпрямленное напряжение с выхода выпрямителей 26, 27 и 28 подается на вход многоуровневого инвертора напряжения 30, к выходу которого подключен гребной электродвигатель 31, на валу которого установлен гребной винт 32.

К многофазным линиям 7, 15 и 22 с помощью автоматических выключателей соответственно 33, 34 и 35 подключаются входы многофазных выпрямителей 36, 37 и 38, которые входят в состав преобразователя частоты 39. Выпрямленное напряжение с выхода выпрямителей 36, 37 и 38 подается на вход многоуровневого инвертора напряжения 40, к выходу которого подключен гребной электродвигатель 41, на валу которого установлен гребной винт 42.

К многофазной линии 7 с помощью автоматического выключателя 43 подключается многофазная первичная обмотка 44 трансформатора 45 с вращающимся магнитным полем. Трехфазная вторичная обмотка 46 трансформатора 45 с помощью автоматического выключателя 47 подключается к трехфазной линии 48 распределительного щита 49 судовых потребителей электроэнергии.

К многофазной линии 15 с помощью автоматического выключателя 50 подключается многофазная первичная обмотка 51 трансформатора 52 с вращающимся магнитным полем. Трехфазная вторичная обмотка 53 трансформатора 52 с помощью автоматического выключателя 54 подключается к трехфазной линии 48 распределительного щита 49.

К многофазной линии 22 с помощью автоматического выключателя 55 подключается многофазная первичная обмотка 56 трансформатора 57 с вращающимся магнитным полем. Трехфазная вторичная обмотка 58 трансформатора 57 с помощью автоматического выключателя 59 также подключается к трехфазной линии 48 распределительного щита 49.

Аварийный дизель 60 вращает ротор аварийного синхронного генератора 61. Трехфазная обмотка статора синхронного генератора 61 с помощью автоматического выключателя 62 подключается к трехфазной линии 63 аварийного распределительного щита 64, а трехфазная линия 63 с помощью автоматического выключателя 65 подключается к трехфазной линии 48 распределительного щита 49 судовых потребителей электроэнергии.

В состав судовой электроэнергетической установки входят также стояночный дизель 66, вращающий ротор трехфазного стояночного генератора 67, который с помощью автоматического выключателя 68 подключается к трехфазной линии 48 распределительного щита 49. Автоматический выключатель 69 подключает к трехфазной линии 48 кабель

70, с помощью которого на судно подается питание с берега. Автоматические выключатели 71 подают питание от трехфазной линии 48 распределительного щита 49 на фидеры 72, питающие распределительные щиты судовых потребителей электроэнергии.

## **Выводы по Главе II**

1. На судах с электродвижением в схемах СЭЭС целесообразно исключить трансформаторы из цепи питания ГЭД и ввести трансформаторы в цепь питания судовых потребителей. Это дает возможность сократить массу и габариты СЭЭС, повысить к.п.д. СЭЭС, а также выбрать для питания ГЭД оптимальный уровень напряжения и обеспечить стандартный уровень напряжения для питания судовых потребителей.
2. Применение многофазных синхронных генераторов позволяет обеспечить высокое качество выпрямленного напряжения на выходе выпрямителей преобразователей частоты и следовательно повысить качество напряжения питания ГЭД.
3. С помощью трансформаторов с вращающимся магнитным полем можно суммировать потоки электроэнергии, напряжения которых смещены по фазе, и обеспечить надежное снабжение электроэнергией судовых потребителей стандартным трехфазным напряжением.

## Глава 3 Математическое моделирование блоков ЕЭС

### 3.1 Трехфазный синхронный генератор

В качестве генераторов переменного напряжения наиболее часто используются синхронные машины. Они применяются и в качестве двигателей, особенно при большой мощности. Синхронные машины имеют большой воздушный зазор, что во многих случаях является преимуществом.

В данной работе используется математическое описание, которое выполнено при известной (традиционной) идеализации конструкции [38], но представлено несколько в иной форме, которая, по мнению авторов [39], удобна для применяемых методов расчета (моделирование сложных систем путем разделения их на взаимосвязанные подсистемы).

При математическом описании трехфазной синхронной машины принято, что нулевая точка обмотки статора выведена, и в фазах могут существовать токи нулевой последовательности. Ротор явнополюсный или неявнополюсный и содержит обмотку возбуждения и демпферные обмотки по продольной и поперечной осям (или эквивалентные демпферные обмотки). Параметры контуров ротора приведены к обмоткам статора, но при этом определяется коэффициент приведения обмоток для расчета реальных тока и напряжения возбуждения. Распределение магнитодвижущих сил и магнитных потоков вдоль окружности воздушного зазора синусоидально. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток постоянны. Индуктивности намагничивания по продольной и поперечной осям постоянны. Машина приведена к двухполюсному исполнению.

Математическое описание синхронной машины выполнено при разделении ее на взаимосвязанные части по магнитному потоку в воздушном зазоре, как изображено на рисунке 3.1. Взаимные связи подсхем учтены зависимыми источниками напряжения и тока.

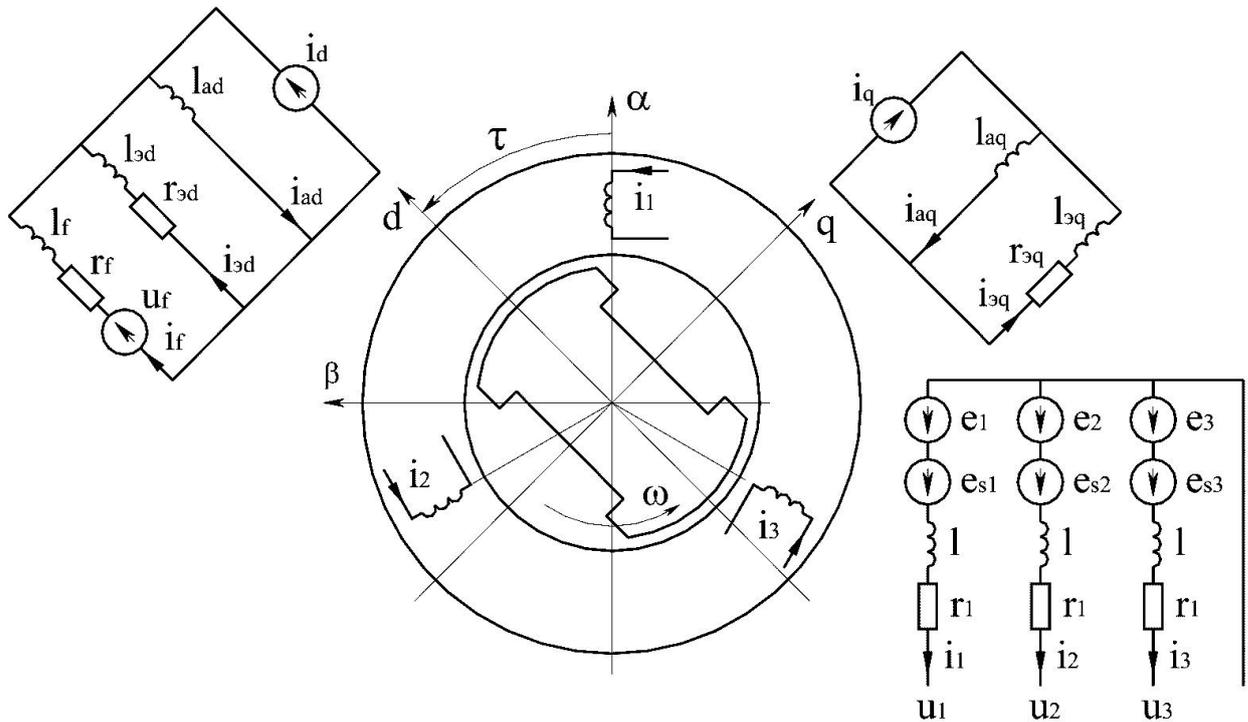


Рисунок 3.1 – Подсхемы трехфазной синхронной машины

Статорная обмотка описана в фазных осях при следующих обозначениях:  $n$  - номер фазы ( $n = 1, 2, 3$ );  $u_n$  - напряжения фаз,  $i_n$  - токи фаз. В подсхемах статорных обмоток в качестве зависимых источников учтены фазные ЭДС  $e_n$  (обусловленные магнитным потоком в зазоре), а также ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{sn}$ . Учтены индуктивности фаз  $l$  и активные сопротивления  $r_1$ . ЭДС  $e_{sn}$  и индуктивность  $l$  определяются при использовании следующих параметров:  $l_{s1}$  - индуктивность рассеяния фаз в симметричном режиме работы трехфазной обмотки,  $l_0$  - индуктивность нулевой последовательности. Если нулевая точка трехфазной обмотки изолирована, то индуктивность  $l_0$  может быть принята равной  $l_{s1}$ .

Роторные контуры описаны в осях  $d$  и  $q$ . В подсхемах роторных контуров в качестве зависимых источников учтены токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ . Учтены индуктивности намагничивания  $l_{ad}$  и  $l_{aq}$ , индуктивности рассеяния демпферных контуров  $l_{\Delta d}$  и  $l_{\Delta q}$ , индуктивность рассеяния обмотки возбуждения  $l_f$ , активные сопротивления демпферных контуров  $r_{\Delta d}$  и  $r_{\Delta q}$  ак-

тивное сопротивление обмотки возбуждения  $r_f$ , напряжение  $u_f$  и ток  $i_f$  возбуждения.

На рисунке 3.1 указаны направления токов и источников напряжения, направления осей  $d$  и  $q$  и промежуточных осей  $\alpha$  и  $\beta$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$ .

В модели машины используются коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} c_n &= \cos \left[ \frac{2\pi}{3} (n-1) \right], \\ s_n &= \sin \left[ \frac{2\pi}{3} (n-1) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Для подсхем статорных обмоток справедливы уравнения:

$$\frac{di_n}{dt} = \frac{l}{l + l_{st}} \left( e_n + e_{sn} - u_n - r_1 i_n + l_{st} \frac{di_n}{dt} \right), \quad (3.2)$$

где  $l_{st}$  – стабилизирующая индуктивность.

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n \frac{di_n}{dt}, \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n \frac{di_n}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ЭДС взаимной индукции фаз статорных обмоток по путям рассеяния:

$$e_{sn} = \frac{l_{s1} - l}{3} \sum_{n=1}^3 \frac{di_n}{dt}. \quad (3.4)$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n i_n, \\ i_\beta &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n i_n. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau, \\ i_q &= i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Производные токов реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau + \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega \cdot i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau - \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega \cdot i_d. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Производные токов в подсхеме роторных обмоток по оси  $d$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{ad}}{dt} &= \frac{l_{\varepsilon d} l_f}{l_{\varepsilon d} l_f + l_{ad} l_f + l_{ad} l_{\varepsilon d}} \left( \frac{u_f - r_f i_f}{l_f} + \frac{di_d}{dt} - \frac{r_{\varepsilon d} i_{\varepsilon d}}{l_{\varepsilon d}} \right), \\ \frac{di_f}{dt} &= \frac{1}{l_f} \left( u_f - r_f i_f - l_{ad} \frac{di_{ad}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Ток в демпферной обмотке по оси  $d$ :

$$i_{\varepsilon d} = i_{ad} - i_d - i_f. \quad (3.9)$$

Производная тока намагничивания по оси  $q$ :

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{l_{\varepsilon q}}{l_{aq} + l_{\varepsilon q}} \left( \frac{di_q}{dt} - \frac{r_{\varepsilon q} i_{\varepsilon q}}{l_{\varepsilon q}} \right). \quad (3.10)$$

Ток в демпферной обмотке по оси  $q$ :

$$i_{\varepsilon q} = i_{aq} - i_q. \quad (3.11)$$

Токи намагничивания роторных подсхем, определенные уравнениями (3.8) и (3.10), при известной частоте вращения ротора  $\omega$  позволяет найти ЭДС по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} e_d &= -\omega \cdot l_{aq} i_{aq} - l_{ad} \frac{di_{ad}}{dt}, \\ e_q &= \omega \cdot l_{ad} i_{ad} - l_{aq} \frac{di_{aq}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} e_\alpha &= e_d \cos \tau + e_q \sin \tau, \\ e_\beta &= e_d \sin \tau - e_q \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

ЭДС зависимых источников в фазах обмоток статора:

$$e_n = e_\alpha c_n + e_\beta s_n. \quad (3.14)$$

Электромагнитный вращающий момент двухполюсной машины:

$$M_{\varepsilon m} = \frac{3}{2} (l_{ad} i_{ad} i_q - l_{aq} i_{aq} i_d). \quad (3.15)$$

Частота вращения двухполюсной машины при моменте инерции  $J$  определяется электромагнитным моментом  $M_{\varepsilon m}$  и противодействующим моментом на валу  $M_c$  (моментом первичного двигателя для генератора или моментом сопротивления для двигателя):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_c - M_{\varepsilon m}). \quad (3.16)$$

Угол поворота оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$  статора:

$$\frac{d\tau}{dt} = \omega. \quad (3.17)$$

В многополюсных машинах  $M_{эм}$  и  $\omega$  определяются с учетом числа пар полюсов.

### 3.2 Двухобмоточный синхронный генератор

В турбогенераторах, работающих на выпрямительную нагрузку, в синхронных двигателях, питающихся от полупроводниковых преобразователей, применяются две трехфазные обмотки, а также обмотки с большим количеством фаз. Многофазные машины используются в гребных установках судов [40] в преобразователях собственных нужд электропоездов [41]. Увеличение количества обмоток синхронных машин позволяет уменьшить потери энергии в самой машине от высших пространственных гармонических составляющих магнитного поля. Например, поверхностные потери энергии в роторе от этих составляющих в двухобмоточном турбогенераторе могут быть уменьшены ориентировочно в 35 раз по сравнению с трехфазной машиной [42]. В многофазных машинах могут быть существенно снижены потери энергии от высших временных гармонических составляющих фазных токов, поскольку ряд гармонических составляющих взаимно компенсируется в магнитном поле. При этом могут быть снижены также пульсации электромагнитного вращающего момента. В двухобмоточной машине по сравнению с трехфазной машиной может быть достигнуто повышение использования активных материалов до 6 % [42]. Применение многофазных машин совместно с полупроводниковыми устройствами позволяет повысить пульсность схем преобразования токов и напряжений. За счет этого улучшается качество электроэнергии, снижается стоимость фильтров, обеспечиваются другие преимущества систем. Вместе с тем, при увеличении числа фаз уменьшается число пазов на полюс и фазу и это отрицательно сказывается на форме ЭДС обмоток. Кроме того, многофазные машины имеют большее количество выводов, и для их

выполнения необходимо дополнительное пространство в области лобовых частей обмоток, усложнение конструкции.

При математическом описании синхронной машины принято, что она имеет несколько одинаковых трехфазных обмоток, взаимно сдвинутых по фазе на угол, равный отношению  $60$  эл. град. к количеству обмоток. Нулевые точки обмоток выведены и в фазах могут существовать токи нулевой последовательности. Ротор явнополюсный или неявнополюсный и содержит обмотку возбуждения и демпферные обмотки по продольной и поперечной осям. Параметры контуров ротора приведены к обмоткам статора, но при этом определяется коэффициент приведения обмоток для расчета реальных тока и напряжения возбуждения. Распределение магнитодвижущих сил и магнитных потоков вдоль окружности воздушного зазора синусоидально. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток постоянны. Индуктивности намагничивания по продольной и поперечной осям постоянны. Машина приведена к двухполюсному исполнению, но приводятся формулы для определения параметров многополюсных машин. Математическое описание синхронной машины выполнено при разделении ее на взаимосвязанные части (подсхемы) по магнитному потоку в воздушном зазоре и по потокам взаимной индукции между трехфазными обмотками, как изображено на рисунке 3.2. Взаимные связи подсхем учтены зависимыми источниками напряжения и тока.

Статорные обмотки описаны в фазных осях при следующих обозначениях:  $n$  - номер фазы ( $n = 1, 2, 3$ );  $m$  - номер обмотки ( $m = 1, \dots, M$ ),  $M$  - количество трехфазных обмоток,  $u_{nm}$  - напряжения фаз,  $i_{nm}$  - токи  $u_{nm}$  фаз. В подсхемах статорных обмоток в качестве зависимых источников учтены фазные ЭДС  $e_{nm}$  (обусловленные магнитным потоком в зазоре), а также ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{snm}$ . Учтены индуктивности фаз  $l$  и активные сопротивления  $r_1$ . ЭДС  $e_{snm}$  и индуктивность  $l$  определяются при использовании следующих параметров:  $l_{sM}$  - индуктивность рассеяния

фаз в симметричном режиме работы всех обмоток,  $l_{sl}$  - индуктивность рассеяния фаз в симметричном режиме работы одной трехфазной обмотки (другие - разомкнуты),  $l_0$  - индуктивность нулевой последовательности.

Роторные контуры описаны в осях  $d$  и  $q$ . В подсхемах роторных контуров в качестве зависимых источников учтены токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ . Учтены индуктивности намагничивания  $l_{ad}$  и  $l_{aq}$ , индуктивности рассеяния демпферных контуров  $l_{\varepsilon d}$  и  $l_{\varepsilon q}$ , индуктивность рассеяния обмотки возбуждения  $l_f$ , активные сопротивления демпферных контуров  $r_{\varepsilon d}$  и  $r_{\varepsilon q}$ , активное сопротивление обмотки возбуждения  $r_f$  напряжение  $u_f$  и ток  $i_f$  возбуждения.

На рисунке 3.2 указаны направления токов и напряжений, направления осей  $\alpha$  и  $\beta$  и промежуточных осей  $d$  и  $q$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$ .

Индуктивности, используемые при математическом описании синхронной машины:

$$\left. \begin{aligned} l &= 2l_{sl} - l_{sM}, \\ l_a &= M(l_{sM} - l_{sl}), \\ l_b &= \frac{1}{3}(l_0 - l). \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

В системе уравнений машины использованы следующие коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} c_{nm} &= \cos \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n - 1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right], & s_{nm} &= \sin \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n - 1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right], \\ c_m &= \cos \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right], & s_m &= \sin \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Для подсхем статорных обмоток справедливы уравнения:

$$\frac{di_{nm}}{dt} = \frac{l}{l + l_{st}} \left( e_{nm} + e_{snm} - u_{nm} - r_1 i_{nm} + l_{st} \frac{di_{nm}}{dt} \right), \quad (3.20)$$

где  $l_{st}$  – стабилизирующая индуктивность.

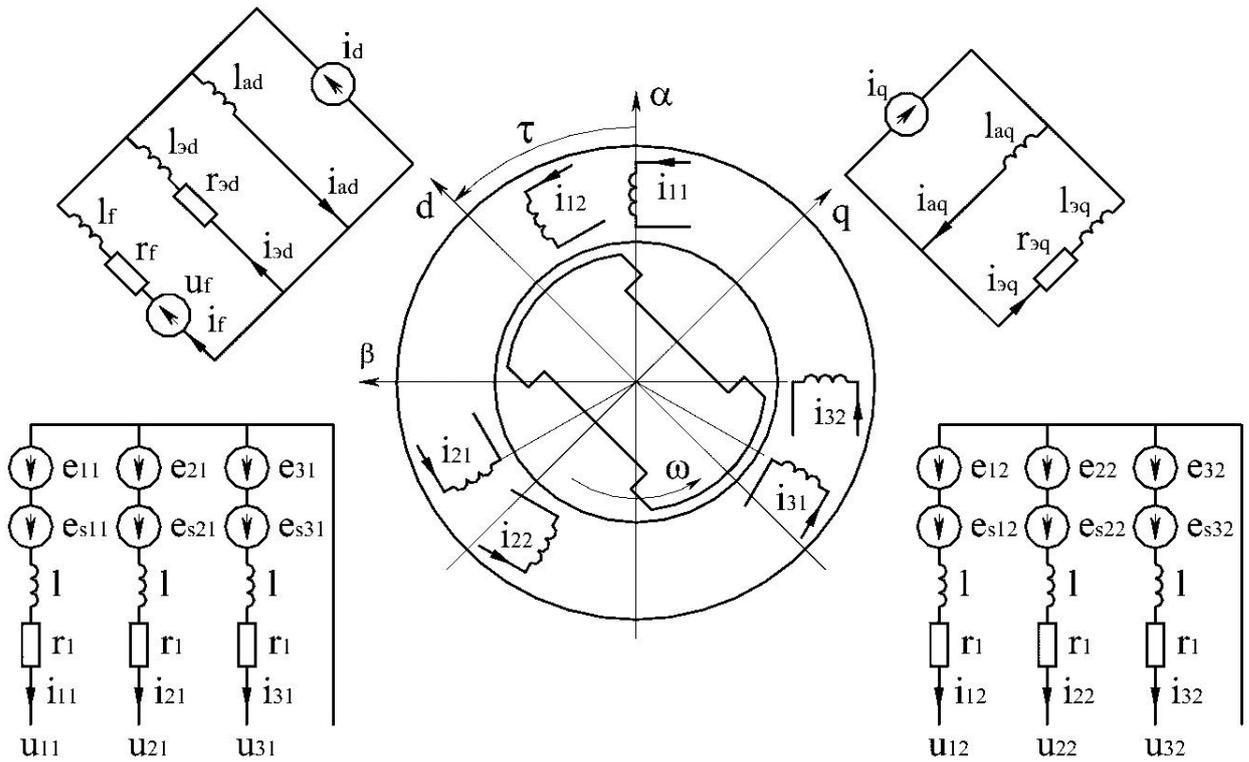


Рисунок 3.2 – Подсхемы многофазной синхронной машины

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}, \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}, \\ \frac{di_{\alpha 0}}{dt} &= \sum_{m=1}^M c_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}, \\ \frac{di_{\beta 0}}{dt} &= \sum_{m=1}^M s_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

ЭДС взаимной индукции статорных обмоток по путям рассеяния:

$$e_{snm} = -l_a \left( c_{nm} \frac{di_\alpha}{dt} + s_{nm} \frac{di_\beta}{dt} \right) - l_b \left( c_m \frac{di_{\alpha 0}}{dt} + s_m \frac{di_{\beta 0}}{dt} \right). \quad (3.22)$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} i_{nm}, \\ i_\beta &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} i_{nm}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau, \\ i_q &= i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Производные токов реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau + \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega \cdot i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau - \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega \cdot i_d. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Производные токов в подсхеме роторных обмоток по оси  $d$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{ad}}{dt} &= \frac{l_{\Delta d} l_f}{l_{\Delta d} l_f + l_{ad} l_f + l_{ad} l_{\Delta d}} \left( \frac{u_f - r_f i_f}{l_f} + \frac{di_d}{dt} - \frac{r_{\Delta d} i_{\Delta d}}{l_{\Delta d}} \right), \\ \frac{di_f}{dt} &= \frac{1}{l_f} \left( u_f - r_f i_f - l_{ad} \frac{di_{ad}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Ток в демпферной обмотке по оси  $d$ :

$$i_{\Delta d} = i_{ad} - i_d - i_f. \quad (3.27)$$

Производная тока намагничивания по оси  $q$ :

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{l_{\Delta q}}{l_{aq} + l_{\Delta q}} \left( \frac{di_q}{dt} - \frac{r_{\Delta q} i_{\Delta q}}{l_{\Delta q}} \right). \quad (3.28)$$

Ток в демпферной обмотке по оси  $q$ :

$$i_{\varepsilon q} = i_{aq} - i_q. \quad (3.29)$$

Токи намагничивания, определенные уравнениями (3.26) и (3.28), при известной частоте вращения ротора  $\omega$  (определена ниже) позволяет найти ЭДС по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} e_d &= -\omega \cdot l_{aq} i_{aq} - l_{ad} \frac{di_{ad}}{dt}, \\ e_q &= \omega \cdot l_{ad} i_{ad} - l_{aq} \frac{di_{aq}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} e_\alpha &= e_d \cos \tau + e_q \sin \tau, \\ e_\beta &= e_d \sin \tau - e_q \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

ЭДС зависимых источников в фазах обмоток статора:

$$e_{nm} = e_\alpha c_{nm} + e_\beta s_{nm}. \quad (3.32)$$

Электромагнитный вращающий момент двухполюсной машины:

$$M_{\varepsilon m} = \frac{3M}{2} (l_{ad} i_{ad} i_q - l_{aq} i_{aq} i_d). \quad (3.33)$$

Частота вращения двухполюсной машины при моменте инерции  $J$  определяется электромагнитным моментом  $M_{\varepsilon m}$  и противодействующим моментом на валу  $M_c$  (моментом первичного двигателя для генератора или моментом сопротивления для двигателя):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_c - M_{\varepsilon m}). \quad (3.34)$$

Угол поворота оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$  статора:

$$\frac{d\tau}{dt} = \omega. \quad (3.35)$$

В многополюсных машинах  $M_{эм}$  и  $\omega$  определяются с учетом числа пар полюсов.

### 3.3 Трехфазный асинхронный электродвигатель

Трехфазная асинхронная машина с короткозамкнутым ротором наиболее широко используется в качестве двигателя. По сравнению с двигателями постоянного тока и синхронными двигателями асинхронные машины обладают рядом преимуществ. Они имеют более простую конструкцию, дешевле и надежнее. В них отсутствуют скользящие электрические контакты, поэтому их эксплуатация менее трудоемка [43].

В модели, описанной в данной работе, используются известные допущения и представления машин с использованием схем замещения.

При математическом описании трехфазной машины принято, что нулевая точка обмотки статора выведена. Ротор короткозамкнутый. Описание асинхронной машины выполнено аналогично описанию синхронной машины при разделении ее на подсхемы, взаимосвязанные через зависимые источники напряжения и тока, как изображено на рисунке 3.3.



намагничивания  $r_m$ , индуктивность рассеяния обмотки ротора  $l_{s2}$  и активное сопротивление обмотки ротора  $r_2$ .

На рисунке 3.3 указаны направления токов и источников напряжения, направления осей  $d$  и  $q$  и промежуточных осей  $\alpha$  и  $\beta$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$ .

В модели машины используются коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} c_n &= \cos \left[ \frac{2\pi}{3} (n-1) \right], \\ s_n &= \sin \left[ \frac{2\pi}{3} (n-1) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

Для подсхем статорных обмоток справедливы уравнения:

$$\frac{di_n}{dt} = \frac{l}{l + l_{st}} \left( e_n + e_{sn} - u_n - r_1 i_n + l_{st} \frac{di_n}{dt} \right), \quad (3.37)$$

где  $l_{st}$  – стабилизирующая индуктивность.

Взаимное влияние фаз по путям рассеяния и токи реакции якоря определяются при использовании следующих переменных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n \frac{di_n}{dt}, \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n \frac{di_n}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

ЭДС взаимной индукции фаз статорных обмоток по путям рассеяния:

$$e_{sn} = \frac{l_{s1} - l_0}{3} \sum_{n=1}^3 \frac{di_n}{dt}. \quad (3.39)$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 c_n i_n, \\ i_\beta &= \frac{2}{3} \sum_{n=1}^3 s_n i_n. \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau, \\ i_q &= i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Производные токов реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau + \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega \cdot i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau - \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega \cdot i_d. \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

Токи роторных контуров по осям  $d$  и  $q$  определяются из следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{ad}}{dt} &= \frac{l_{s2} \frac{di_d}{dt} - r_m i_{ad} + r_2 i_{2d}}{l_m + l_{s2}}, \\ i_{2d} &= i_d - i_{ad}, \\ \frac{di_{aq}}{dt} &= \frac{l_{s2} \frac{di_q}{dt} - r_m i_{aq} + r_2 i_{2q}}{l_m + l_{s2}}, \\ i_{2q} &= i_q - i_{aq}. \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Проекция ЭДС на оси  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} e_d &= -l_m \left( i_{aq} \omega + \frac{di_{ad}}{dt} \right), \\ e_q &= l_m \left( i_{ad} \omega - \frac{di_{aq}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} e_\alpha &= e_d \cos \tau + e_q \sin \tau, \\ e_\beta &= e_d \sin \tau - e_q \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

ЭДС зависимых источников в фазах обмоток статора:

$$e_n = e_\alpha c_n + e_\beta s_n. \quad (3.46)$$

Электромагнитный вращающий момент двухполюсной машины:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3M}{2} l_m (i_{ad} i_q - i_{aq} i_d). \quad (3.47)$$

Частота вращения двухполюсной машины при моменте инерции  $J$  определяется электромагнитным моментом  $M_{\text{эм}}$  и противодействующим моментом на валу  $M_c$  (моментом первичного двигателя для генератора или моментом сопротивления для двигателя):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_c - M_{\text{эм}}). \quad (3.48)$$

Угол поворота оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$  статора:

$$\frac{d\tau}{dt} = \omega. \quad (3.49)$$

В многополюсных машинах  $M_{\text{эм}}$  и  $\omega$  определяются с учетом числа пар полюсов.

### 3.4 Преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения и широтно-импульсной модуляцией

Наиболее распространенным типом преобразователя частоты с ШИМ является преобразователь с неуправляемым выпрямителем напряжения в звене постоянного тока [44]. При этом напряжение на входе инвертора не меняется, а регулирование выходного напряжения осуществляется методом широтно-импульсной модуляции. Такие выпрямители выпускаются рядом электротехнических фирм с начала 90-х годов XX в., когда производители мощных полупроводниковых приборов освоили выпуск биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBT представляют собой  $p-n-p$ -транзистор, управляемый через высоковольтный  $n$ -канальный полевой транзистор. При необходимости используется параллельное соединение транзисторов или гибридные модули. К достоинствам IGBT относятся: высокая допустимая плотность тока; управление напряжением, как у МОП-транзисторов; практически прямоугольная область безопасной работы, исключая необходимость формирования траектории переключения, низкие потери в импульсном режиме. Перечисленные качества обусловили широкое применение IGBT в современных преобразователях с ШИМ.

Принцип ШИМ рассматривается на примере однофазного инвертора, получающего питание от источника постоянного напряжения со средней точкой, структура которого показана на рисунке 3.4. Активно-индуктивная нагрузка  $Z_n$  включена между средней точкой источника питания и точкой соединения электронных ключей 1 и 2, каждый из которых включает в себя транзистор, работающий в ключевом режиме и диод обратного тока. Система управления транзисторными ключами содержит в своем составе нуль-орган (НО) и формирователи  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ . На входе нуль-органа сравниваются задающий сигнал и (здесь и далее индексом «звездочка» отмечены задающие сигналы) и пилообразное опорное напряжение  $u_{оп}$ .

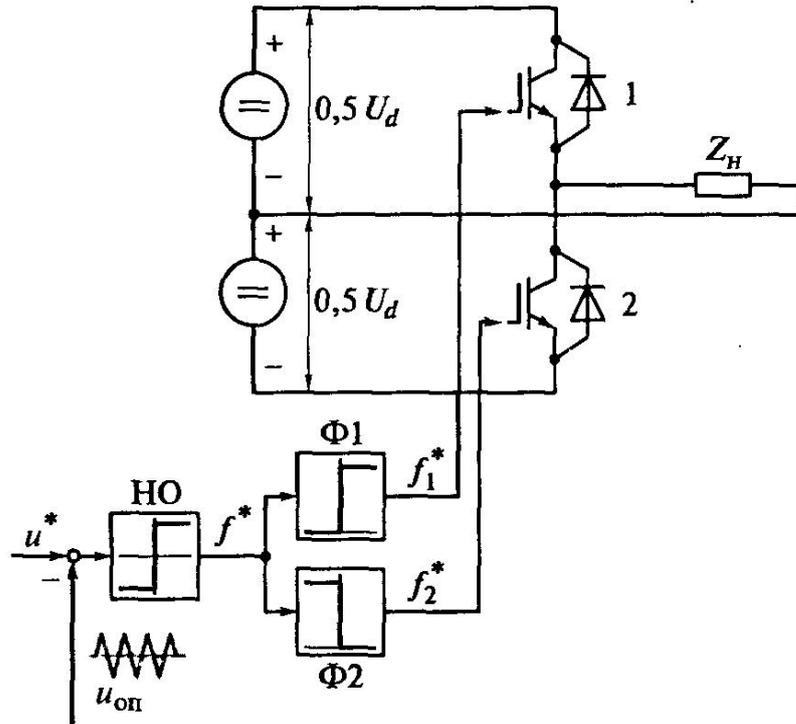


Рисунок 3.4 – Структура однофазного инвертора с широтно-импульсной модуляцией

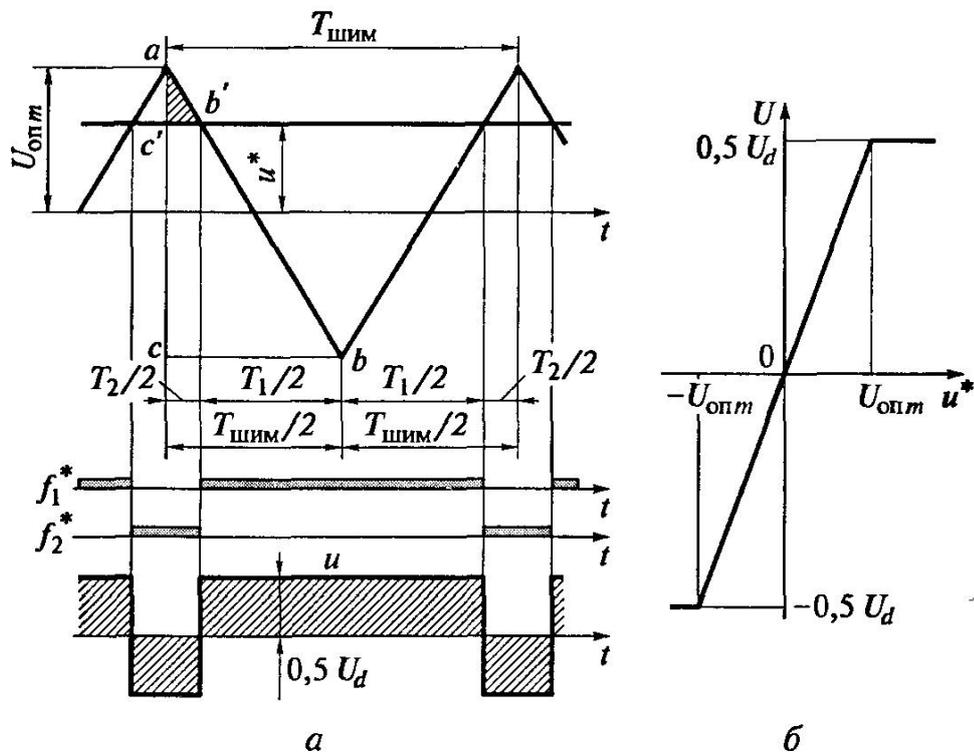


Рисунок 3.5 – Характеристики передаточного коэффициента инвертора

где  $a$  – напряжения опорное и задания;

$b$  – регулировочная характеристика инвертора.

Если  $u^* > u_{оп}$ , т.е. разность  $(u^* - u_{оп})$  положительна, то сигнал на выходе нуль-органа положителен и на выходе формирователя Ф1 существует положительный сигнал  $f_1^*$  замыкающий ключ 1, т.е. открывающий соответствующий транзистор. К нагрузке оказывается приложенным напряжение  $0,5U_d$ , у которого слева «плюс», а справа — «минус» и которое будем считать положительным. При отрицательной разности  $(u^* - u_{оп})$  замыкается ключ 2 и напряжение на нагрузке становится отрицательным и равным  $-0,5U_d$ .

На рис. 3.5, а показаны симметричное пилообразное опорное напряжение с максимальным значением  $U_{опm}$  и напряжение задания  $u^*$ , которое предполагается постоянным в течение периода  $T_{ШИМ}$  опорного напряжения. В нижней части рисунка приведены состояния сигналов  $f_1^*$  и  $f_2^*$  и форма напряжения на выходе инвертора  $u$ . Среднее значение напряжения на выходе определяется следующим образом:

$$U = 0,5U_d(1 - 2T_2/T_{ШИМ}); \quad (3.50)$$

$$T_{ШИМ} = T_1 + T_2 = f_{ШИМ}^{-1}, \quad (3.51)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – интервалы замкнутого состояния ключей 1 и 2 соответственно;

$T_{ШИМ}$  – период широтно-импульсной модуляции, с;

$f_{ШИМ}$  – частота ШИМ, Гц.

Из подобия треугольников  $abc$  и  $ab'c'$  для рабочей части характеристики инвертора, когда  $|u^*| \leq U_{\text{опт}}$ , может быть записано:

$$\frac{T_2}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{U_{\text{опт}} - u^*}{2U_{\text{опт}}}. \quad (3.52)$$

Отсюда с учетом приведенного выше выражения для  $U$  следует, что

$$U = \frac{0,5U_d}{U_{\text{опт}}} u^* = k_{\text{и}} u^*, \quad (3.53)$$

где  $k_{\text{и}}$  – передаточный коэффициент инвертора в линейной части характеристики, когда  $|u^*| \leq U_{\text{опт}}$ .

Из регулировочной характеристики инвертора  $U = f(u^*)$  (рисунок 3.5, б) видно, что должно быть предусмотрено ее ограничение на уровне  $0,5U_d$ , так как для получения неискаженного напряжения на выходе задающий сигнал и не должен превышать максимального значения опорного напряжения  $U_{\text{опт}}$ . В системе управления инвертором должна существовать кратковременная задержка между размыканием одного ключа и замыканием другого для восстановления запирающих свойств транзистора, выходящего из работы.

Если управляющий сигнал представляет собой синусоиду с частотой  $\omega_{\text{оэл}}$ , то напряжение на выходе инвертора, рассматриваемое за время  $t \geq 2\pi/\omega_{\text{оэл}}$ , будет представлять собой гармоническую кривую, содержащую наряду с первой гармоникой, которая имеет частоту управляющего сигнала, ряд гармонических составляющих более высокого порядка. Таким образом, если амплитуда  $u^*$  не превышает значения  $U_{\text{опт}}$ , то первая гармоника напряжения на выходе инвертора в определенном масштабе повторяет управляющий сигнал. Изменение его частоты приводит к изменению частоты на выходе инвертора. Изменение амплитуды управляющего сигнала при неизменной частоте будет приводить к изменению соотношения

длительностей положительных и отрицательных импульсов напряжения на выходе, т.е. изменению амплитуды его первой гармоники. Это иллюстрирует рисунок 3.6. Для его упрощения и наглядности построения принято, что частота опорного напряжения всего в 12 раз превышает частоту управляющего сигнала. На самом деле в современных инверторах частота опорного напряжения (частота ШИМ) составляет от единиц до десятков килогерц при номинальной частоте напряжения на выходе инвертора  $f_n = \omega_{0эл}/(2\pi) = 50$  Гц. При высокой частоте ШИМ и активно-индуктивной нагрузке, какой является обмотка статора, ток нагрузки оказывается практически синусоидальным.

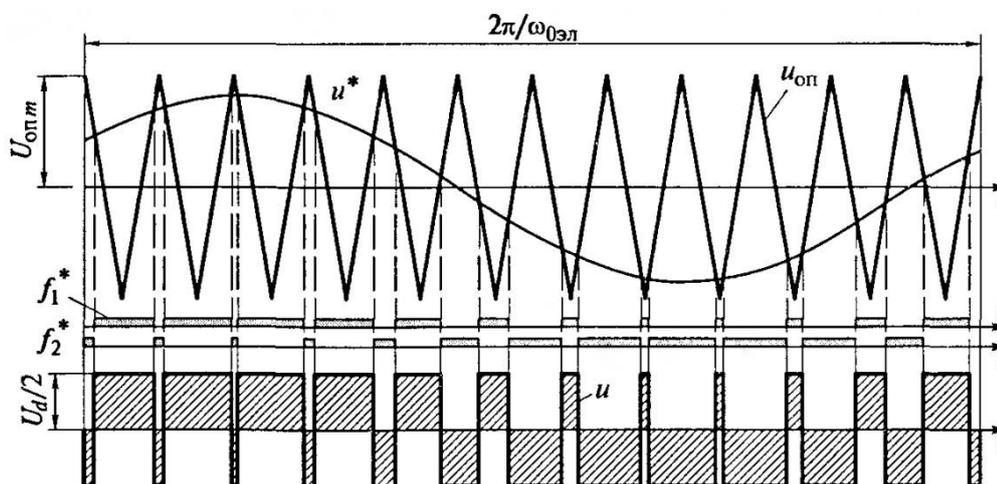


Рисунок 3.6 – Принцип широтно-импульсной модуляции на примере однофазного инвертора

Однако надо учитывать и ряд отрицательных эффектов, связанных с повышением частоты ШИМ, а именно наличие электромагнитных помех, воздействующих на другие электротехнические и радиотехнические устройства, и возникновение перенапряжений в цепи нагрузки, что опасно для изоляции обмоток двигателя. Средства борьбы с этими явлениями состоят в использовании двигателей с повышенным качеством изоляции, в применении экранированных кабелей и специальных фильтров, в

ограничении длины коммуникаций, а также в отдельной прокладке силовых кабелей и кабелей системы управления.

Схема трехфазного мостового инвертора (рисунок 3.7, а) включает в себя три плеча с транзисторными ключами, каждое из которых выполнено аналогично плечу однофазного инвертора (см. рисунок 3.4). К средним точкам каждого из плеч подключено начало фазной обмотки статора двигателя, если обмотки статора соединены звездой, как это показано на рисунке 3.7, а, или угол треугольника, если обмотки соединены треугольником. Схема включает в себя общий для всех трех фаз источник пилообразного опорного напряжения  $u_{оп}$ . Управляющие сигналы  $u_{1A}^*$ ;  $u_{1B}^*$ ;  $u_{1C}^*$  представляют собой трехфазную систему синусоидальных напряжений, сдвинутых между собой на  $120^\circ$ . Изменение частоты напряжения на выходе инвертора достигается изменением частоты управляющих сигналов, а изменение амплитуды - изменением их амплитуды.

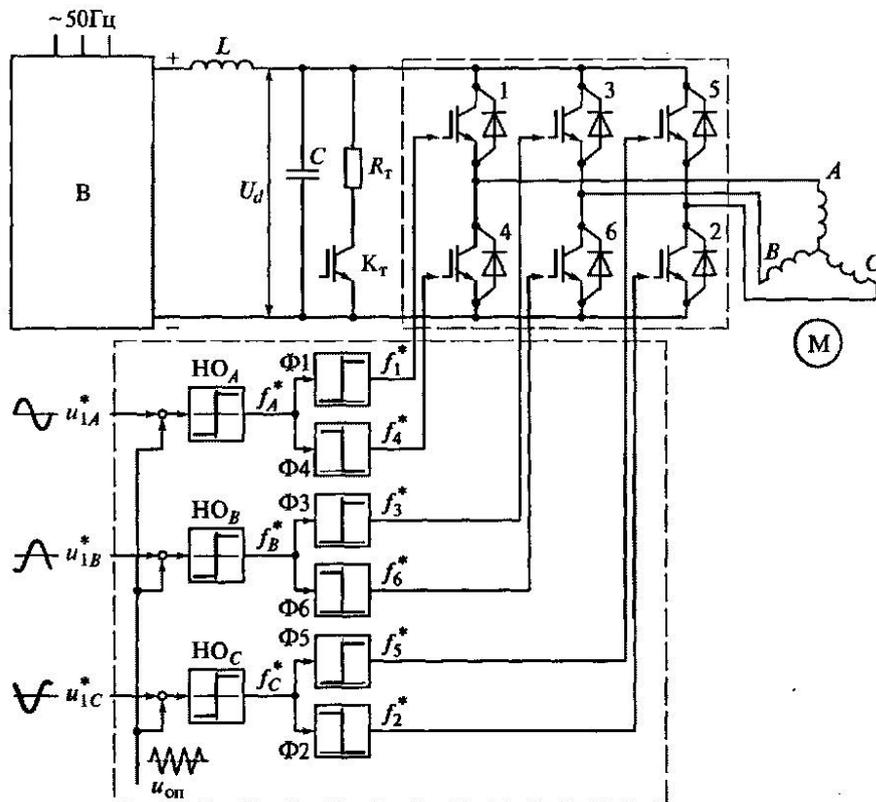


Рисунок 3.7, а – Структура ПЧ с трехфазным АИН

На рисунке 3.7, б показано, как формируется трехфазное напряжение на фазах нагрузки, соединенной в звезду. На рисунке заштрихованными горизонтальными линиями отмечены состояния сигналов  $f_1^* - f_6^*$ , а следовательно, и замкнутые состояния ключей 1-6. Их зависимость от знаков разностей  $u_{1A}^* - u_{оп}$ ,  $u_{1B}^* - u_{оп}$ ,  $u_{1C}^* - u_{оп}$  определена так же, как это сделано при рассмотрении однофазного инвертора. Фазные напряжения на выходе могут принимать пять разных значений:  $+(2/3)U_d$ ;  $+(1/3)U_d$ ;  $0$ ;  $-(1/3)U_d$ ;  $-(2/3)U_d$ . Можно отметить, что алгоритм работы рассматриваемой схемы, так же как и алгоритм работы однофазного инвертора, исключает возможность одновременного замыкания обоих ключей одного плеча моста. Кроме того, в графиках напряжения имеются участки, на которых замкнуты одновременно все четные или все нечетные ключи, в результате чего значения напряжения на этих участках равны нулю.

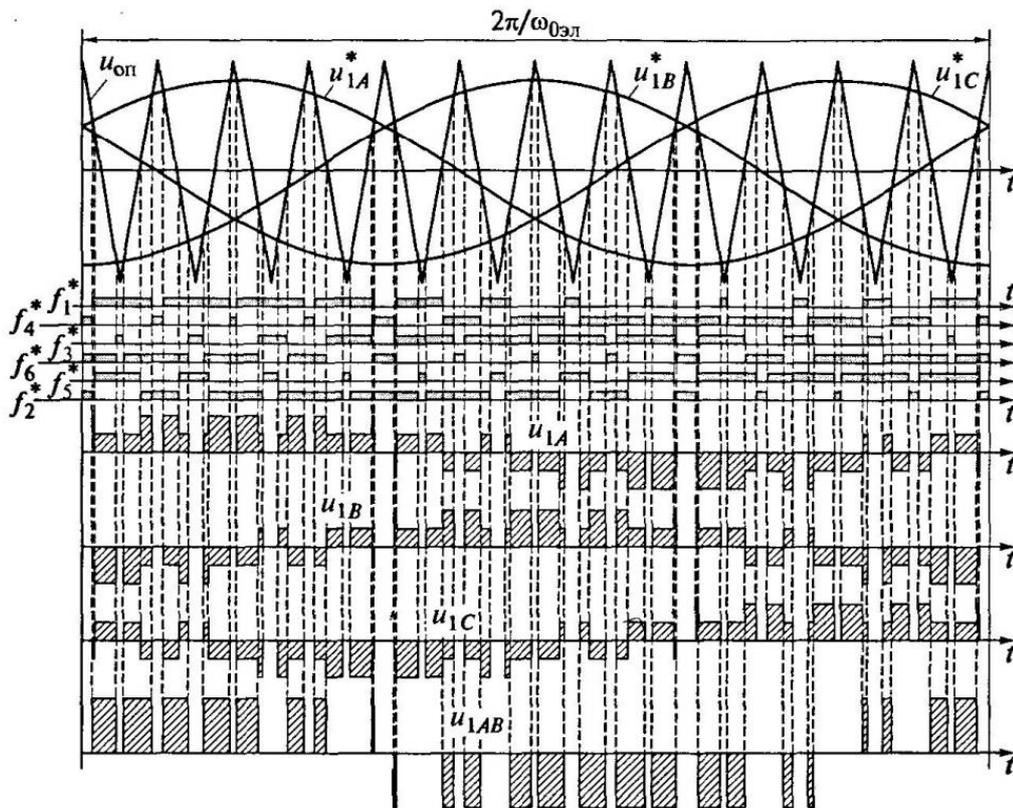


Рисунок 3.7, б – Формирование напряжения на выходе АИН

При равенстве амплитуды задающего сигнала  $u^*$  максимальному значению опорного напряжения  $U_{опт}$  амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора равна  $0,5U_d$ .

Для наглядности график напряжений построен при том же соотношении частоты ШИМ и частоты напряжения на выходе инвертора  $\omega_{0эл}$ , что и при рассмотрении однофазного инвертора (см. рисунок 3.6). Сказанное ранее о влиянии высокой частоты ШИМ справедливо и для трехфазного инвертора.

Описанная схема инвертора с явно выраженным пилообразным опорным напряжением может быть реализована как в аналоговой форме, так и в цифровой форме с применением микропроцессорной техники. Наряду с ней разработаны и применяются алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции, специально ориентированные на микропроцессорную технику.

### **Выводы по Главе III**

- 1 Разработана математическая модель трехфазного синхронного генератора.
- 2 Разработана математическая модель двухобмоточного синхронного генератора.
- 3 Разработана модель асинхронного электродвигателя.
- 4 Разработана модель преобразователя на базе автономного инвертора напряжения.

## Глава 4 Компьютерное моделирование схем СЭЭС

### 4.1 Моделирование типичной схемы СЭЭС

Как было отмечено в главе 1, судовая электроэнергетическая система современных судов различного назначения строится по типовой или типичной структуре.

В типичной структуре, ГЭУ переменного тока получает питание от судовой электростанции судна переменного тока через согласующие трансформаторы. Согласующие трансформаторы необходимы для:

- согласования уровня напряжения судовой электростанции и ГЭУ;
- получения двух систем изолированных напряжений трехфазных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов;
- обеспечение электромагнитной совместимости ГЭУ с потребителями собственных нужд.

На рисунке 4.1 представлена схема питания одного ГЭД по типичной структуре.

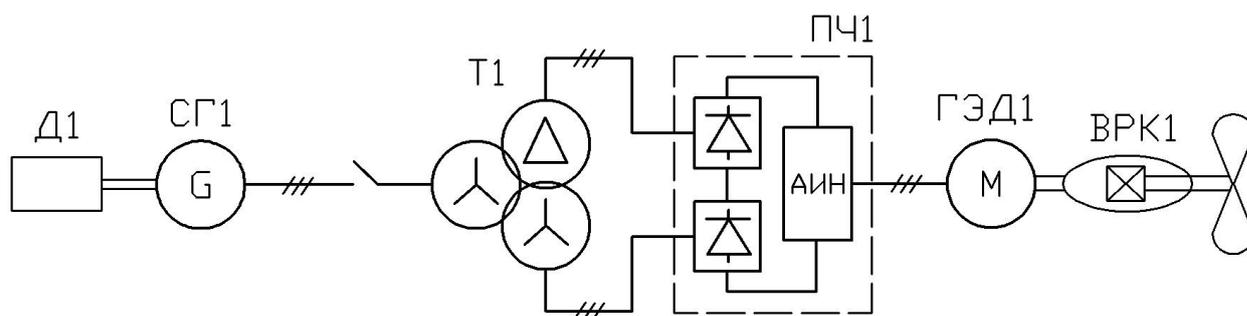


Рисунок 4.1 – Схема питания одного ГЭД

По рисунку 4.1 трехфазный асинхронный электродвигатель ГЭД1 получает питание от преобразователя частоты ПЧ1, состоящего из двухуровневого автономного инвертора напряжения и двух трехфазных неуправляемых выпрямителей. Питание на ПЧ1 поступает от двух вторичных обмоток согласующего трансформатора Т1. Первичная обмотка

трансформатора Т1 через автоматический выключатель подключается к дизель-генератору, состоящему из дизельного двигателя Д1 и трехфазного синхронного генератора СГ1.

Одним из важнейших показателей СЭЭС является ее КПД, от которого зависят, например, объемы потребляемого топлива и соответственно его расходы. Повышение КПД СЭЭС возможно как за счет исключения некоторых узлов, например, согласующего трансформатора, так и за счет повышения КПД составных частей СЭЭС, например, гребного электродвигателя.

Гребной электродвигатель, входящий в СЭЭС, запитывается от преобразователя частоты, который формирует напряжение отличное от синусоидальной формы, что создает в обмотках ГЭД высокочастотные гармоники тока. Наличие высших гармоник тока обмотках ГЭД, создает дополнительные потери:

- на вихревые токи в магнитопроводе ГЭД;
- в обмотках ГЭД, вызванные эффектом вытеснения тока.

Одним из показателей качества тока, является коэффициент гармоник  $K_2$ , %, расчет которого осуществляется по формуле:

$$K_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (4.1)$$

- где  $I_i$  - действующее значение тока соответствующей гармоники.

### 4.1.1 Оценка качества тока ГЭД

Для оценки качества тока протекающего через обмотки ГЭД, выполнено моделирование ГЭУ по типичной структуре на примере гидрографического судна «Вайгач». На рисунке 4.1 представлена схема ГЭУ гидрографического судна «Вайгач».

По рисунку 4.1, ГЭД1 получает питание от двухзвенного ПЧ1 на базе двухуровневого АИН с 12-пульсным выпрямителем. На рисунке 4.2 представлена модель ГЭУ «Вайгач», в которой синхронный генератор и согласующий трансформатор, заменены на два источника трехфазной ЭДС.

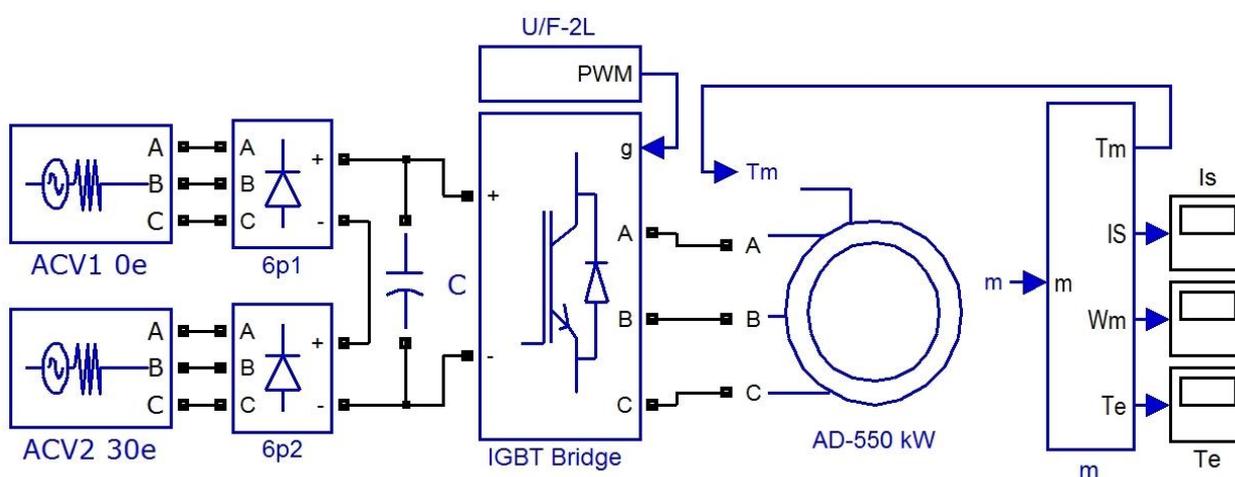


Рисунок 4.2 – Модель ГЭУ «Вайгач»

Модель по рисунку 4.2 состоит из следующих блоков:

- двух изолированных источников переменного тока напряжением 480 В и частотой 50 Гц, имеющих сдвиг фаз одноименных напряжений в 30 электрических градусов;
- двух шестипульсных выпрямителей «Звезда-Ларионова», выполненных на выпрямительных диодах;
- емкостного фильтра звена постоянного тока;
- 2-уровневого автономного инвертора напряжения;
- генератора импульсов для 2-уровневого АИН;
- электродвигателя асинхронного мощностью 550 кВт.

На рисунке 4.3 представлена зависимость частоты вращения ротора АД от времени.

На рисунке 4.4 представлена зависимость тока фазы статора АД от времени.

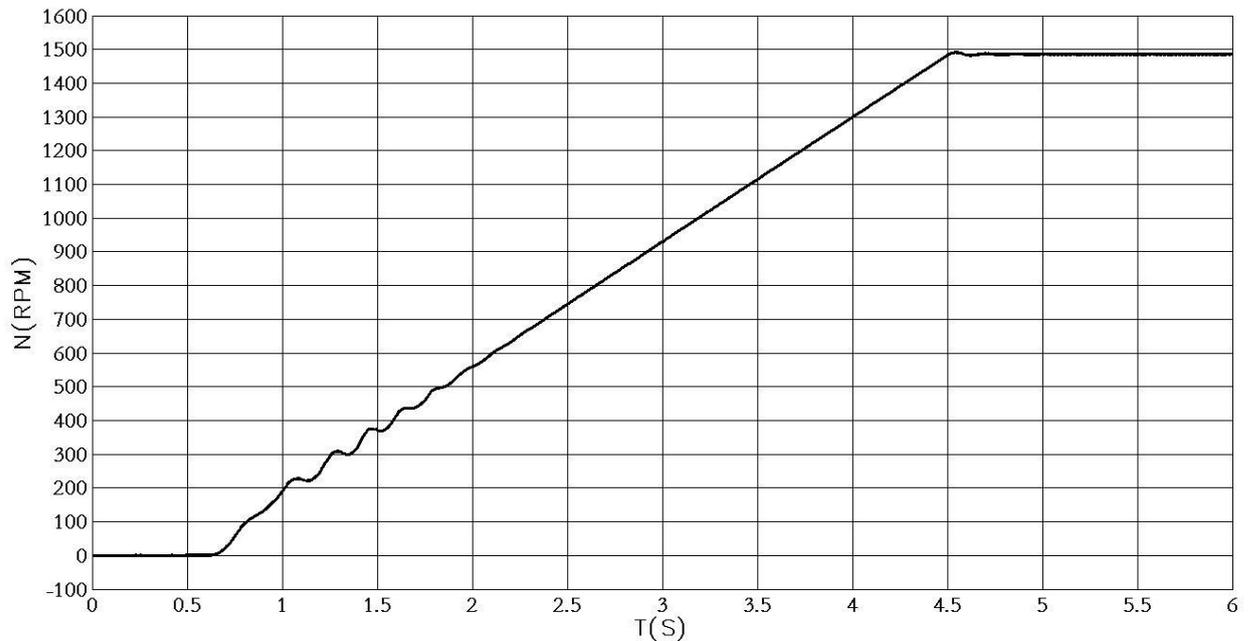


Рисунок 4.3 – Частота вращения вала АД

На рисунке 4.5 представлена зависимость тока фазы статора АД от времени в установившемся режиме.

На рисунке 4.6 представлена зависимость напряжения на выходе АИН и тока фазы статора АД от времени в установившемся режиме.

На рисунке 4.7 изображен электромагнитный момент АД.

На рисунке 4.8 представлен момент на валу АД.

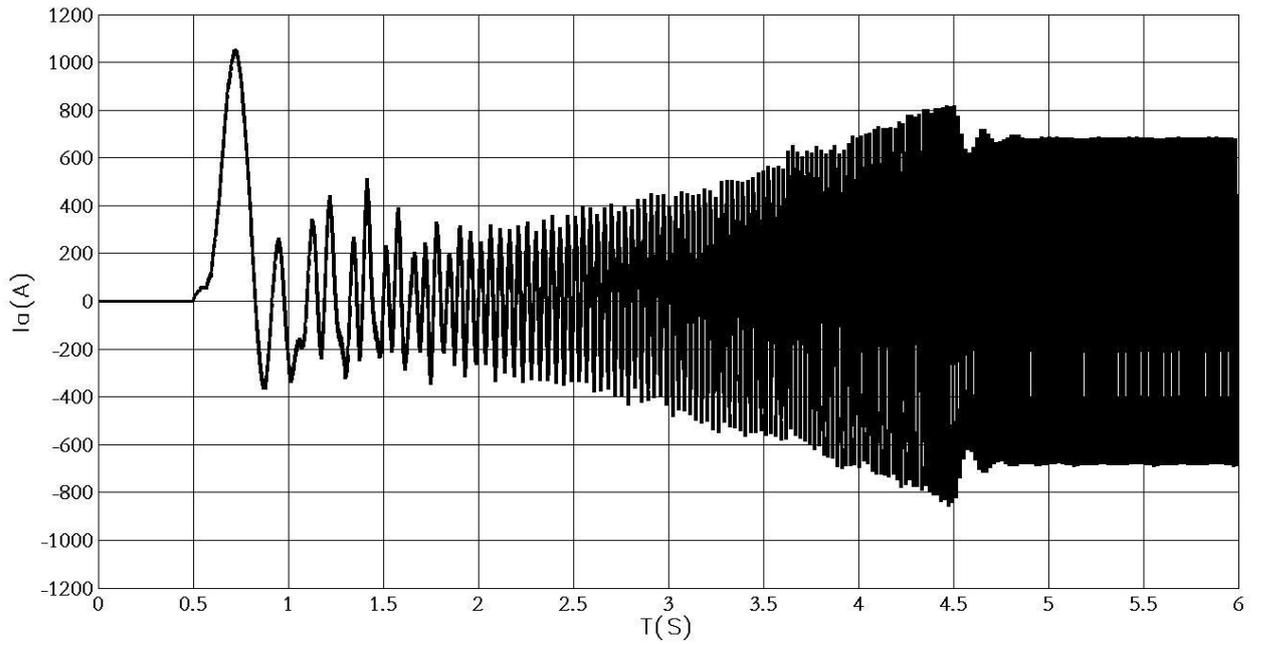


Рисунок 4.4 – Ток фазы АД

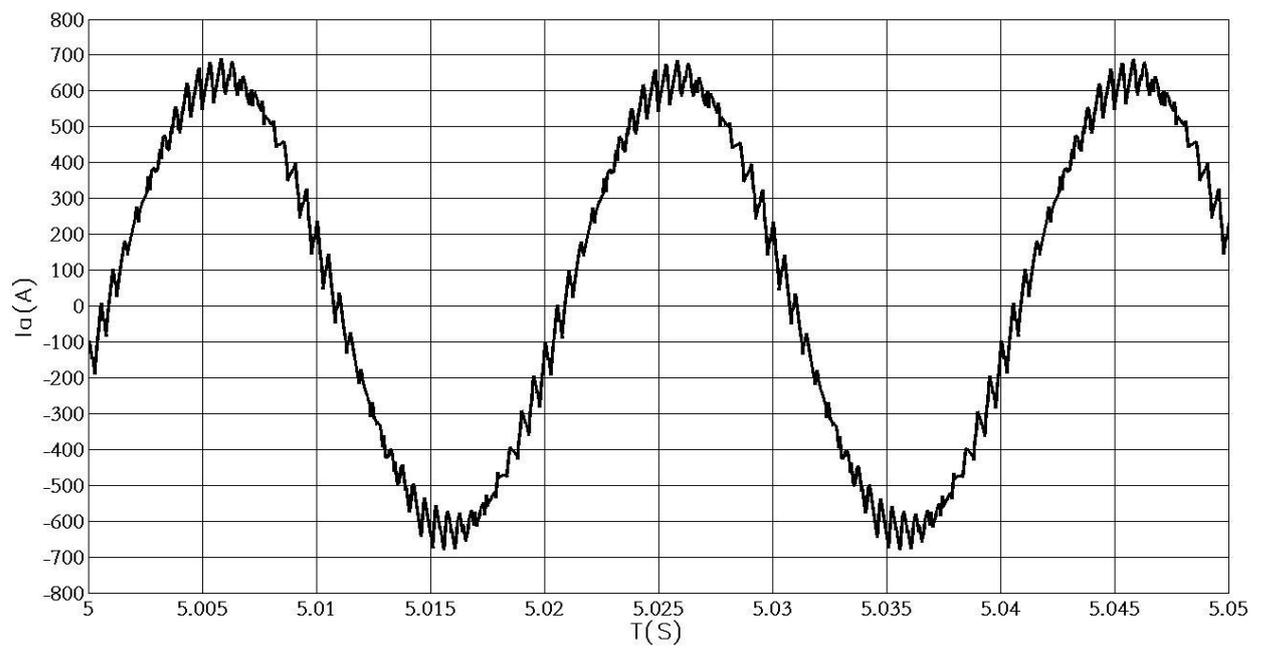


Рисунок 4.5 – Ток фазы АД в установившемся режиме

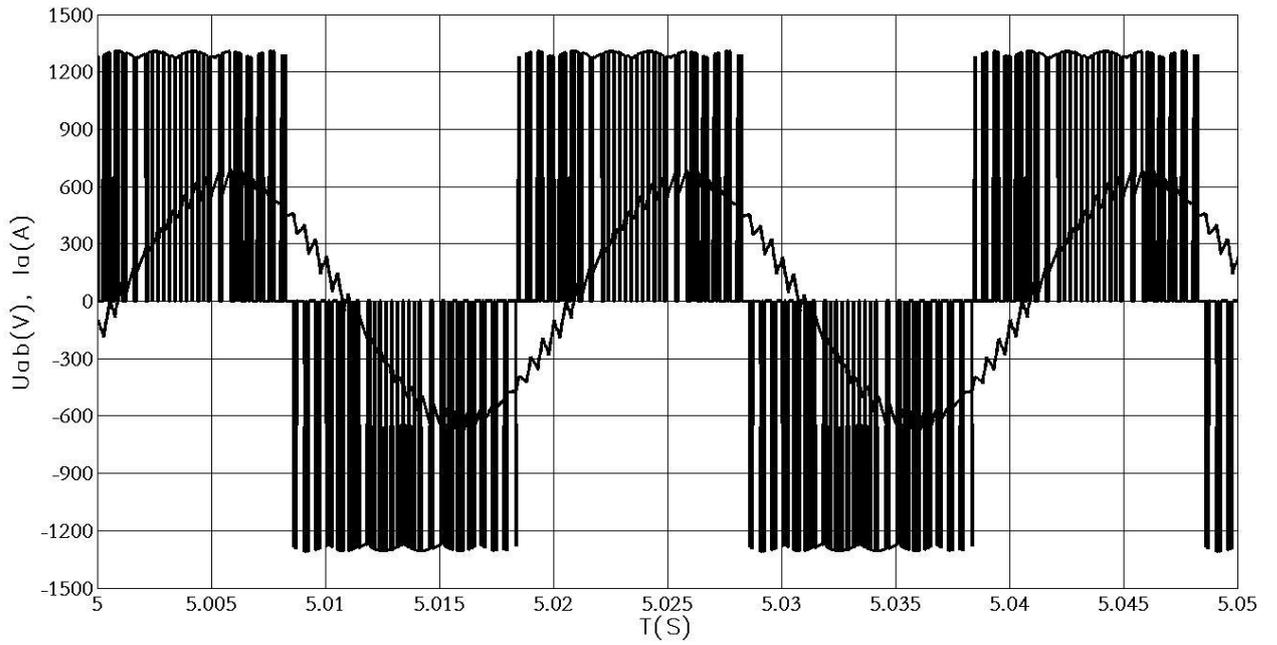


Рисунок 4.6 – Выходные линейное напряжение и фазный ток

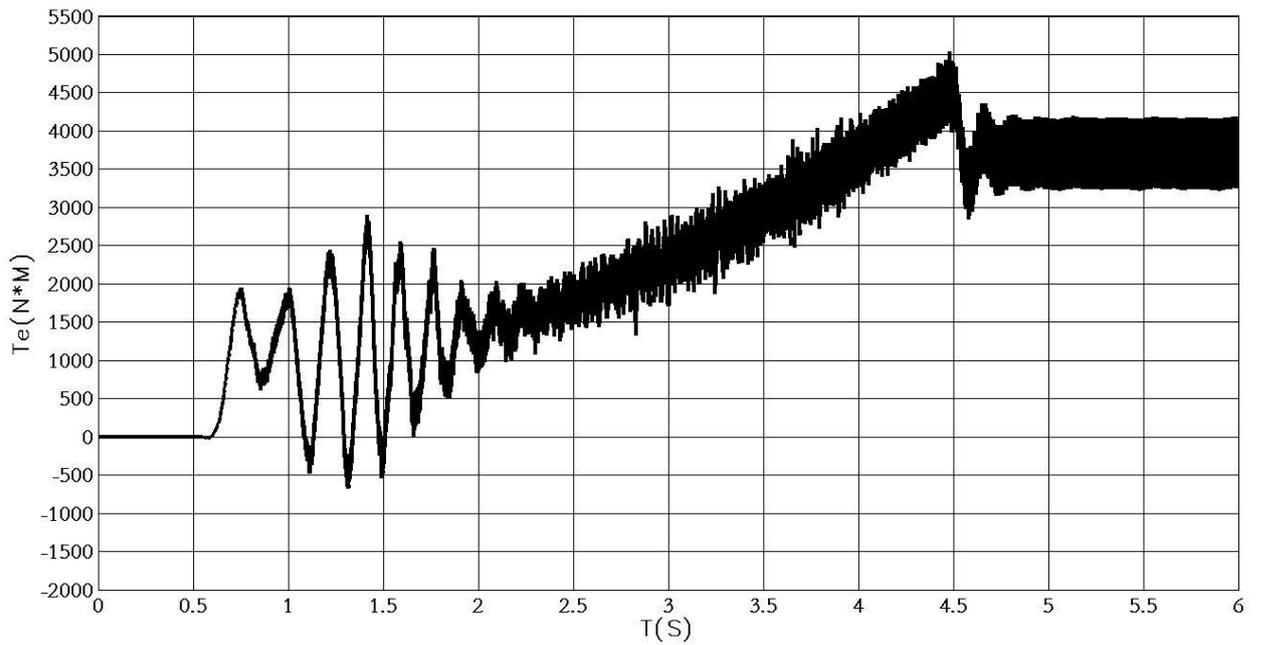


Рисунок 4.7 – Электромагнитный момент АД

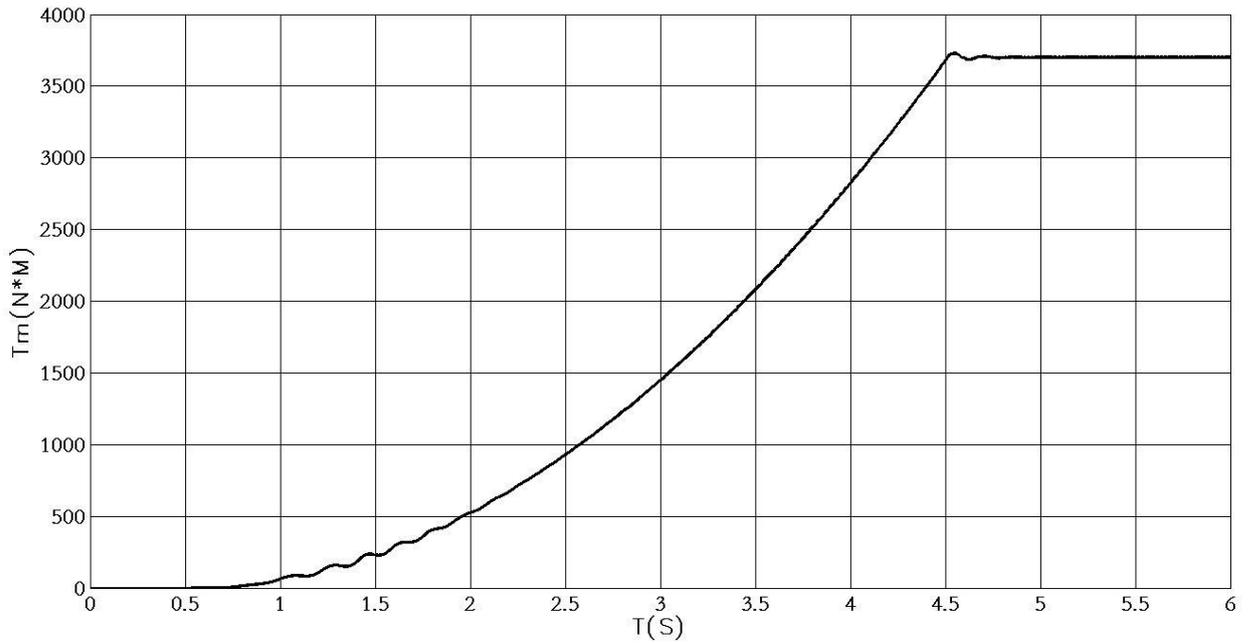


Рисунок 4.8 – Момент на валу АД

Для оценки качества тока АД, используется гармонический анализ «FFT», содержащийся в MATLAB Simulink. На рисунке 4.9 представлен гармонический анализ тока фазы АД, из которого следует, что значение коэффициента гармоника тока составляет  $K_r = 6,09\%$ .

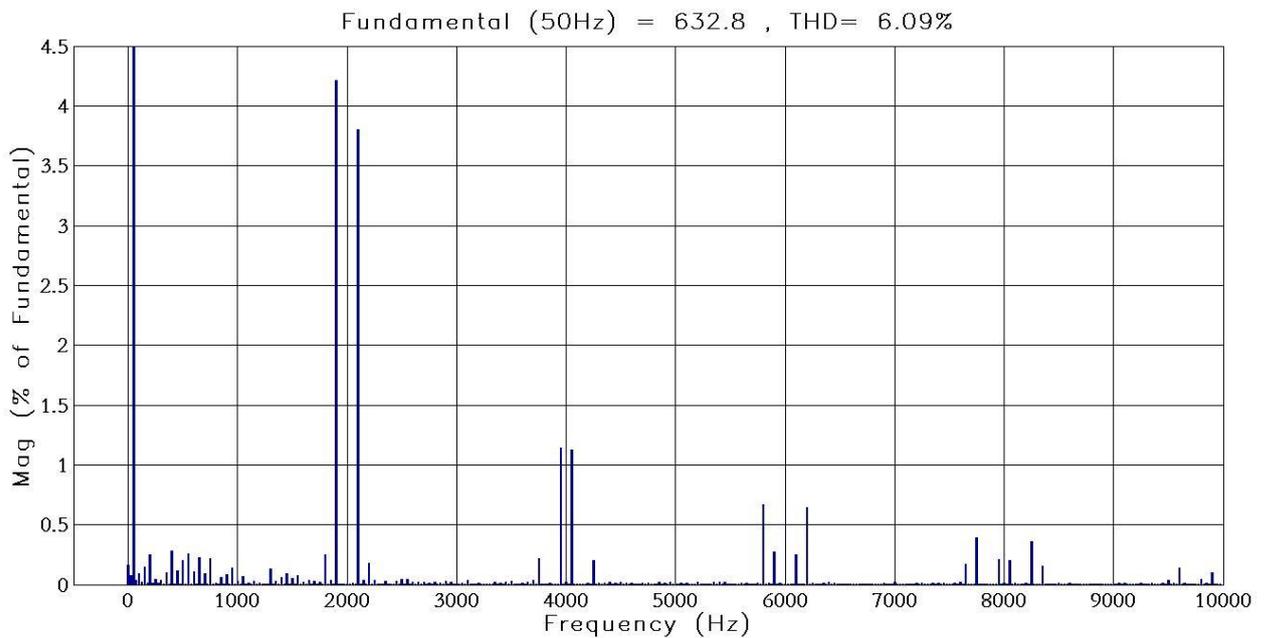


Рисунок 4.9 – Спектр тока фазы АД

### 4.1.2 Оценка качества напряжения на ГРЩ

Для оценки влияния выпрямителей на качество напряжения в судовой сети используется модель, изображенная на рисунке 4.10.

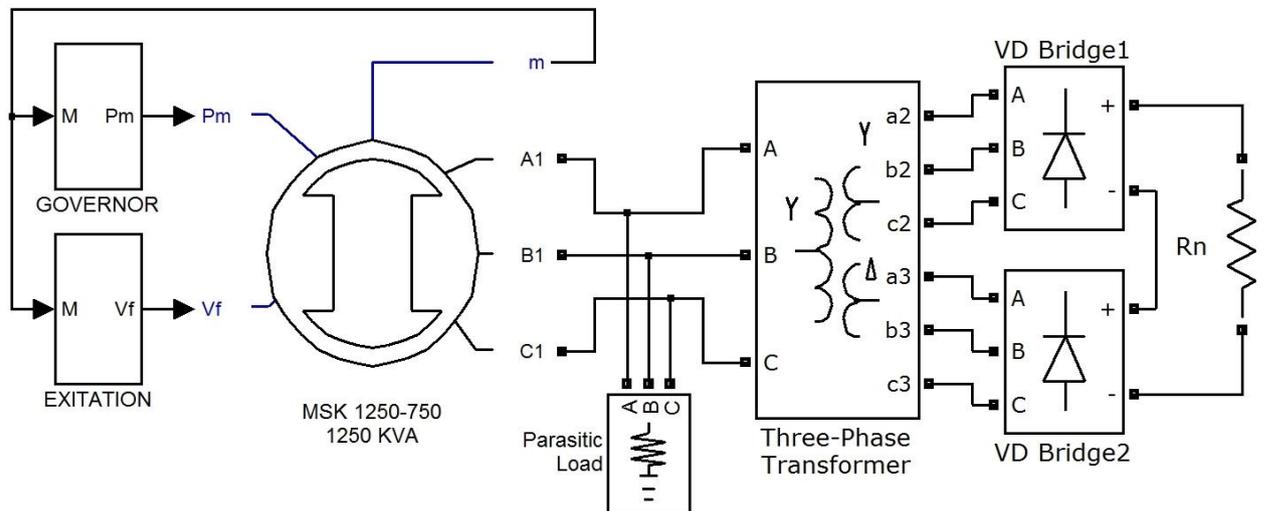


Рисунок 4.10 – Модель СЭЭС

Модель по рисунку 4.10 состоит из следующих блоков:

- генератора синхронного трехфазного;
- трансформатора трехфазного согласующего;
- двух шестипульсных выпрямителей;
- емкостного фильтра;
- активно-индуктивной нагрузки.

Гармонический состав тока, потребляемый шестипульсным выпрямителями, представлен на рисунке 4.11.

На рисунке 4.12 представлен гармонический состав тока первичной обмотки трансформатора согласующего.

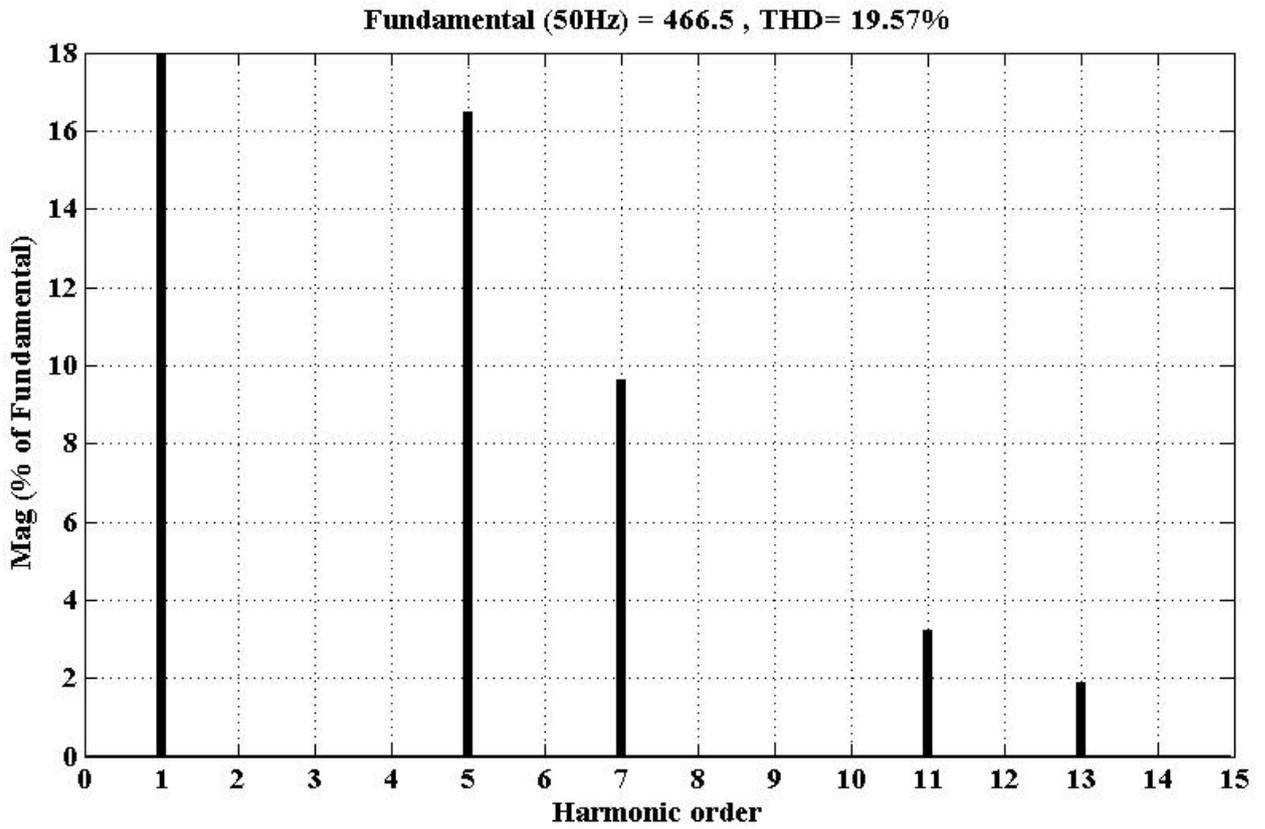


Рисунок 4.11 – Гармонический состав тока шестипульсных выпрямителей

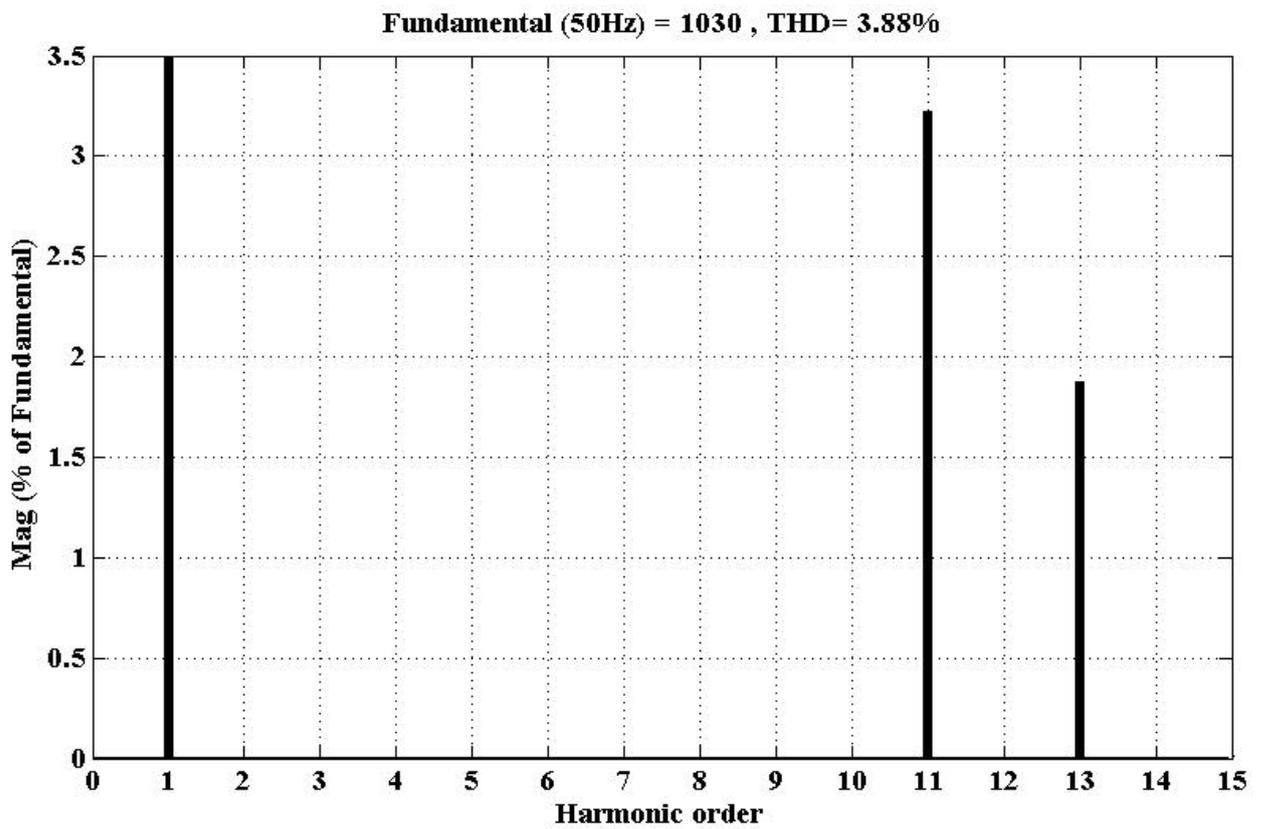


Рисунок 4.12 – Гармонический состав тока первичной обмотки

По рисунку 4.11, в спектре тока выпрямителей содержатся 5,7 и 11,13 гармонические составляющие.

Из рисунка 4.12 следует, что включение вторичных обмоток трансформатора согласующего по схеме «Звезда-треугольник», позволяет подавить 5 и 7 гармонические составляющие, что снижает искажения напряжения на ГРЩ, к которому подключаются потребители собственных нужд.

Таким образом, схема ГЭУ малого гидрографического судна «Вайгач» обеспечивает высокое качество тока в ГЭД. Наличие согласующего трехобмоточного трансформатора позволяет подавить 5 и 7 гармонические составляющие тока, при работе шестипульсных выпрямителей, что обеспечивает высокое качество напряжения на шинах главного распределительного щита, от которого получают питание потребители собственных нужд судна.

Как было указано выше, согласующий трансформатор обеспечивает согласование уровней напряжения судовой электростанции судна и гребной электрической установки, обеспечивает электромагнитную совместимость ГЭУ и ПСН, а также осуществляет гальваническую развязку судовой электростанции судна и гребной электрической установки.

Однако согласующий трансформатор обладает значительными массой, габаритами и стоимостью. При преобразовании напряжений в требуемый уровень, на трансформаторе происходят потери мощности, что снижает общий КПД системы. Сниженный КПД системы, из-за наличия согласующего трансформатора, ведет к увеличению расхода топлива при эксплуатации судна, что ведет к увеличению затрат.

## 4.2 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с многоуровневым АИН. Вариант 1

На рисунке 4.13 представлена схема СЭЭС, в которой гребная электрическая установка запитывается непосредственно от генераторных агрегатов. Гребной электродвигатель получает питание от преобразователя частоты на базе трехуровневого АИН. Два изолированных источника постоянного тока, получены путем применения двух трехфазных генераторных агрегатов.

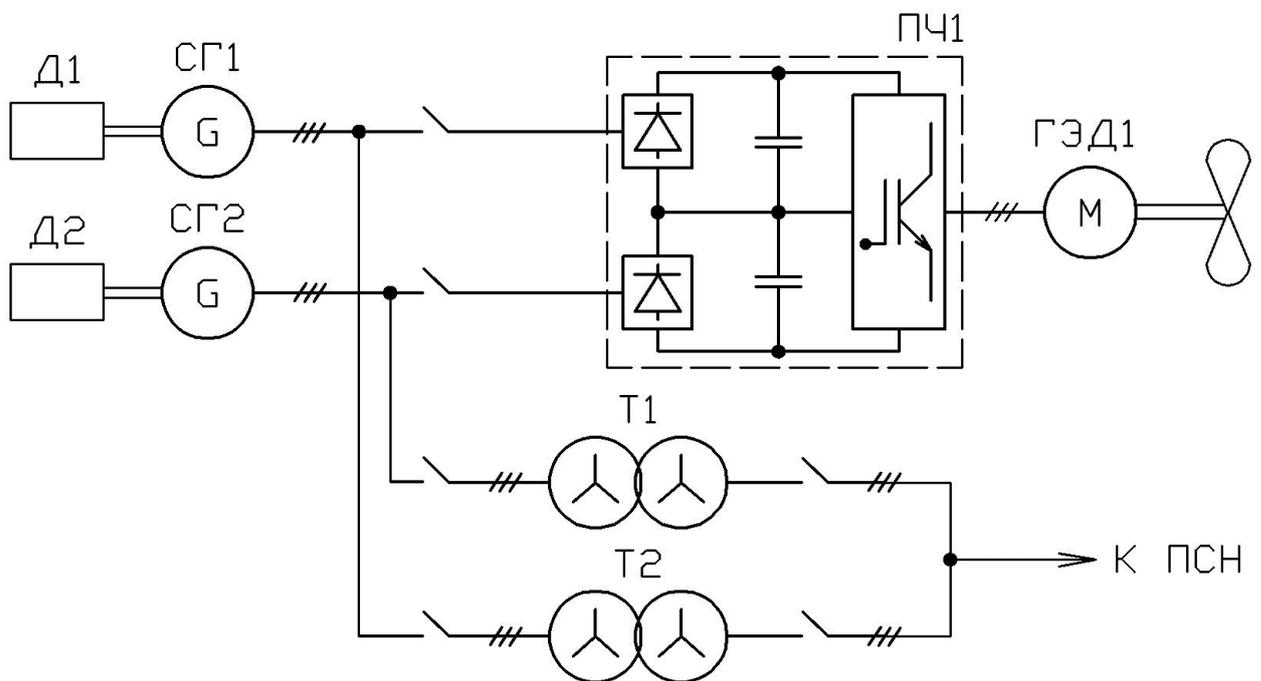


Рисунок 4.13 – Бестрансформаторная СЭЭС

Потребители собственных нужд подключаются к вторичным обмоткам трансформаторов Т1 и Т2. Первичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2 подключаются к трехфазным обмоткам генераторов СГ1 и СГ2.

Первичные и вторичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2 соединены звездой. Параллельное соединение вторичных обмоток Т1 и Т2 обеспечивает синхронизацию генераторов СГ1 и СГ2 с углом в 0 электрических градусов.

На основе схемы по рисунку 4.13, разработана модель бестрансформаторной СЭЭС, которая представлена на рисунке 4.14.

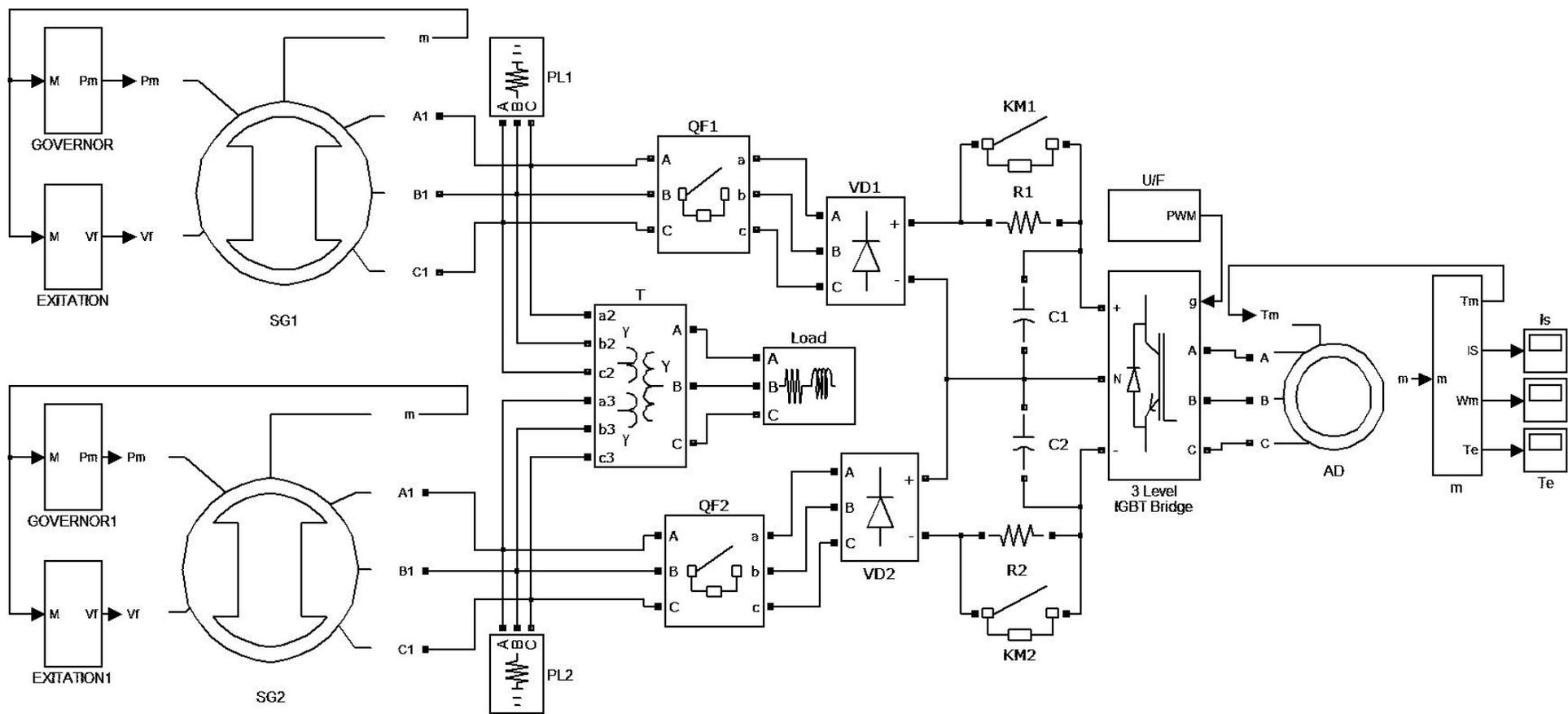


Рисунок 4.14 – Модель бестрансформаторной СЭЭС в Matlab Simulink

Представленная модель состоит из следующих основных блоков:

- синхронных генераторов SG1 и SG2;
- трехобмоточного согласующего трансформатора Т;
- автоматических выключателей QF1 и QF2;
- трехуровневого автономного инвертора напряжения на IGBT транзисторах;
- системы управления АИН;
- асинхронного электродвигателя.

На рисунках 4.15 и 4.16 представлен график напряжения  $U_{AB}$  на генераторах SG1 и SG2.

На рисунках 4.17 и 4.18 представлен график тока  $I_A$  на генераторах SG1 и SG2.

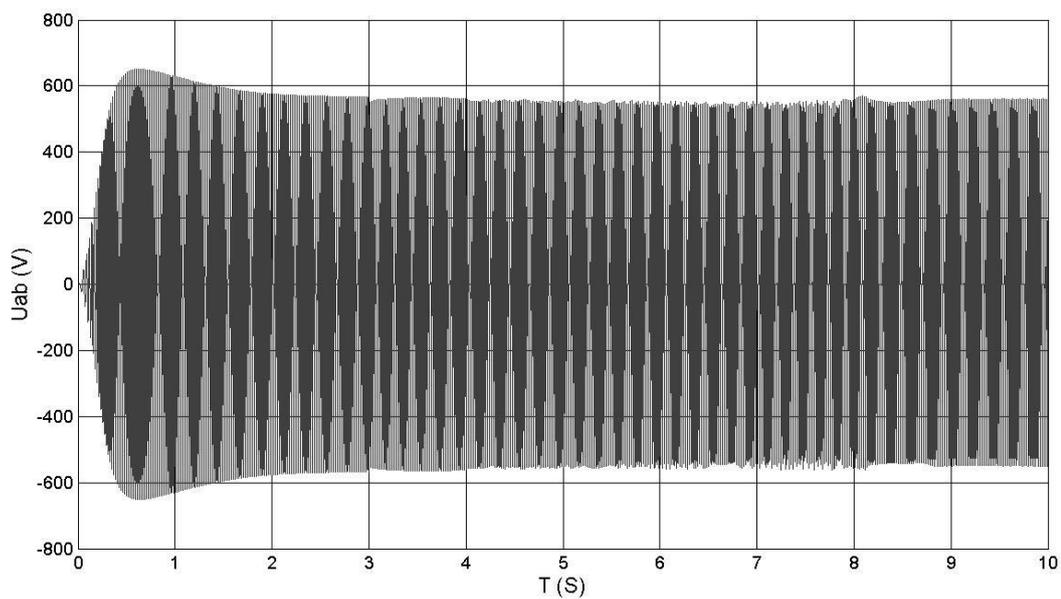
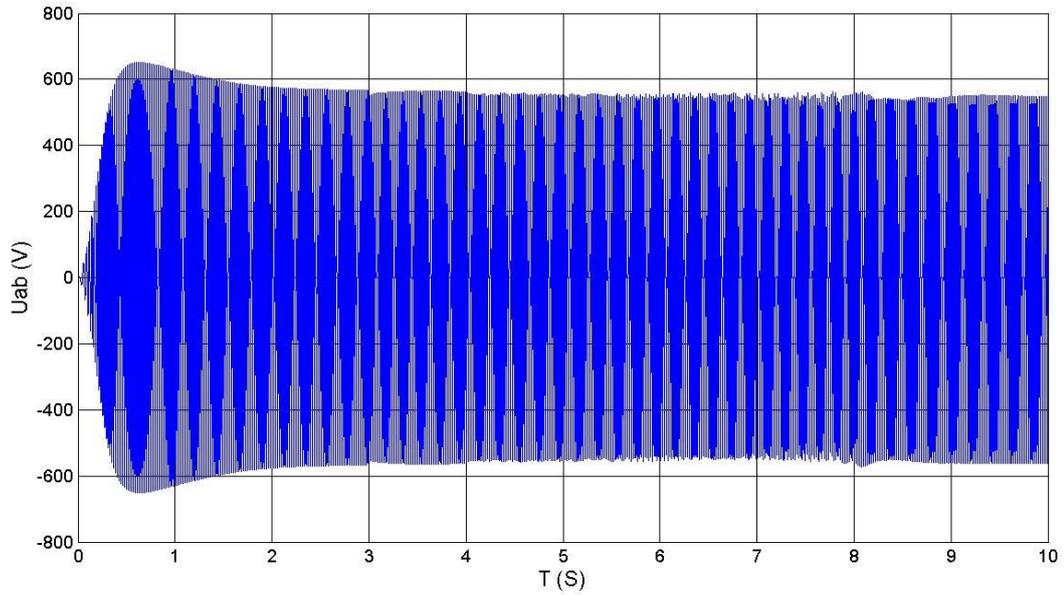
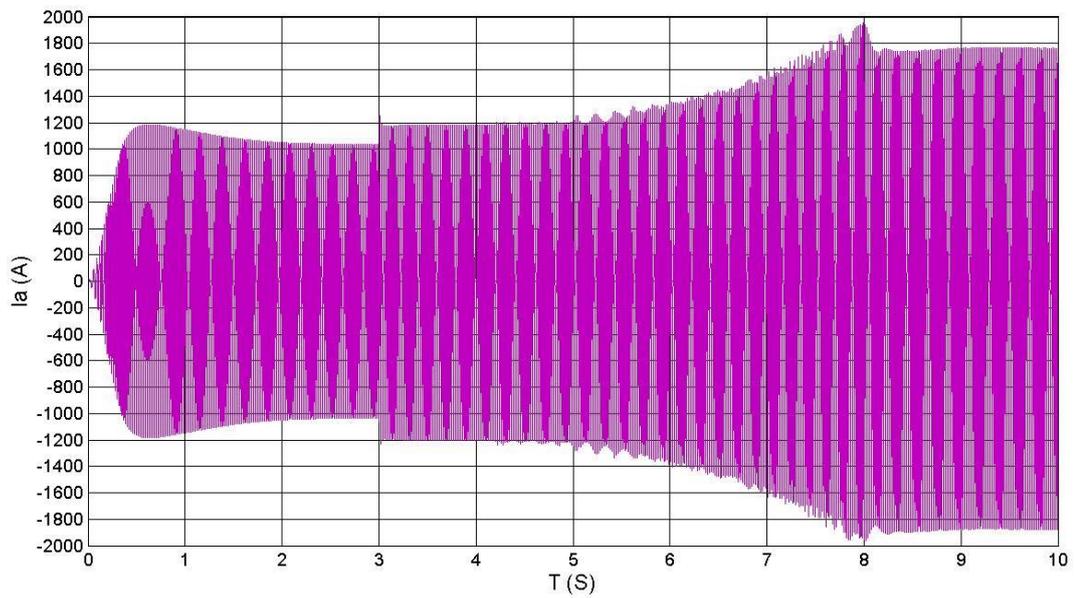


Рисунок 4.15 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG1

Рисунок 4.16 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG2Рисунок 4.17 – График линейного тока  $I_A$  на генераторе SG1

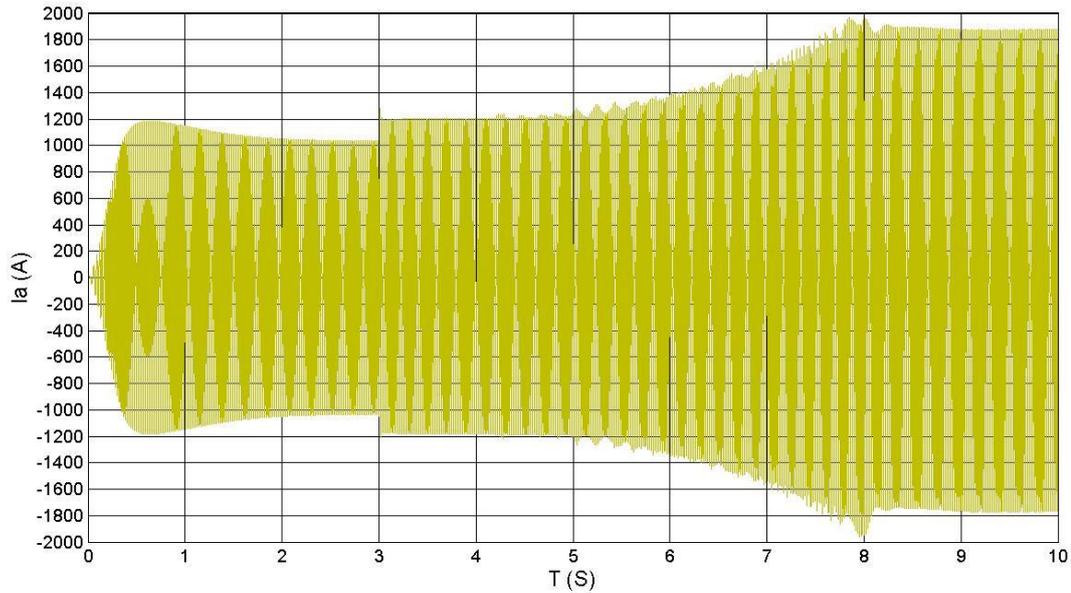


Рисунок 4.18 – График линейного тока  $I_A$  на генераторе SG2

На рисунке 4.19 представлен график линейного напряжения  $U_{AB}$  на обмотке SG1. Генераторные агрегаты работают, исключительно на общесудовую нагрузку.

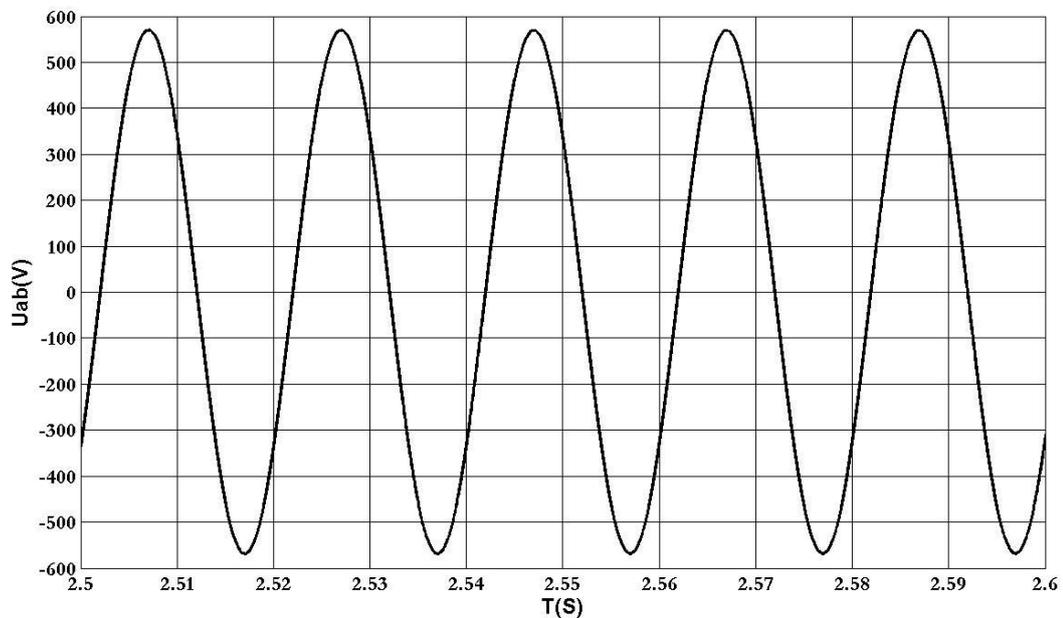


Рисунок 4.19 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG1

На рисунке 4.20 изображен график напряжения  $U_{AB}$  вторичных обмотках трансформаторов T1 и T2. При этом гребной электродвигатель

работает на номинальную мощность. По рисунку 4.20 заметны значительные искажения напряжения, вносимые в судовую сеть, трехфазными выпрямителями, входящими в состав преобразователя частоты.

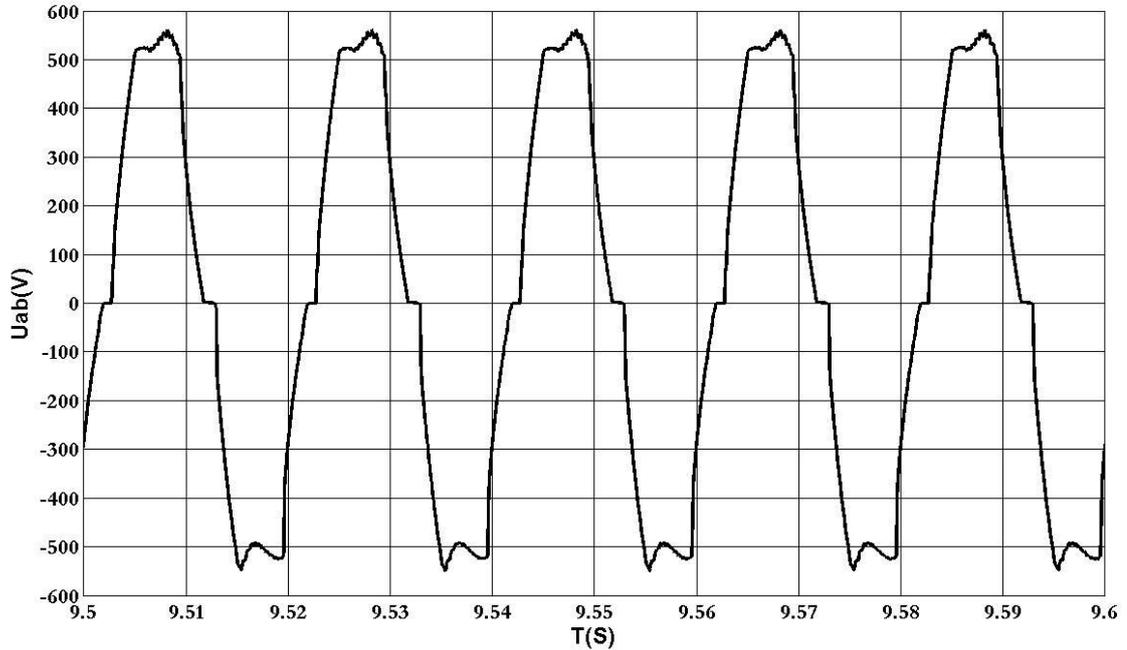


Рисунок 4.20 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  при работе ГЭУ

На рисунке 4.21 представлен гармонический состав линейного напряжения  $U_{AB}$  на вторичных обмотках трансформаторов Т1 и Т2.

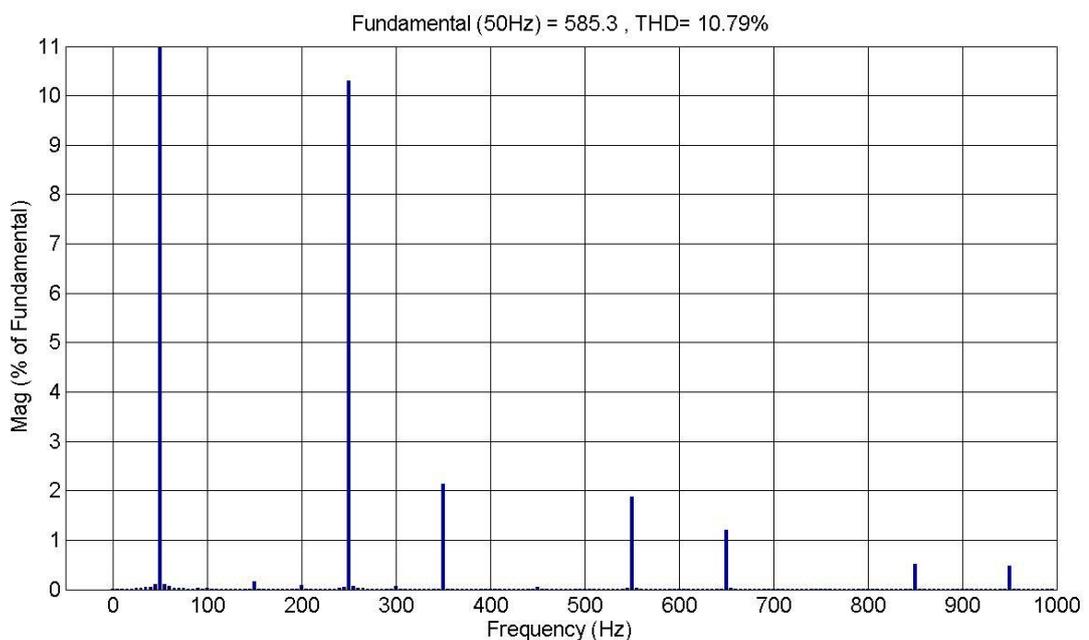


Рисунок 4.21 – Гармонический состав напряжения  $U_{AB}$

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_T = 10,79\%$ , что превышает допустимое значение по правилам РМРС.

На рисунке 4.22 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

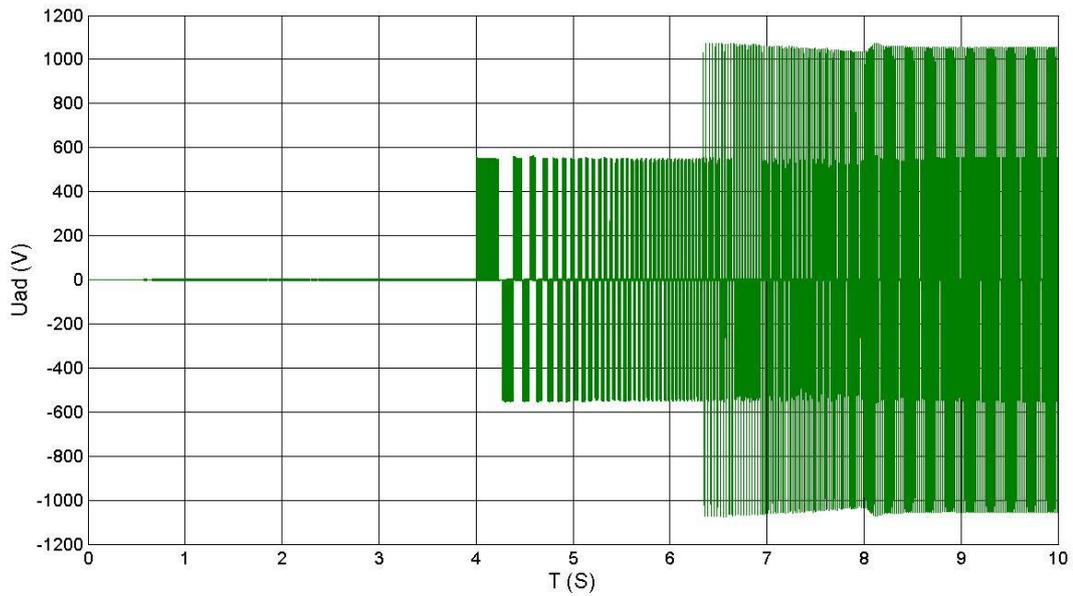


Рисунок 4.22 – Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.23 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

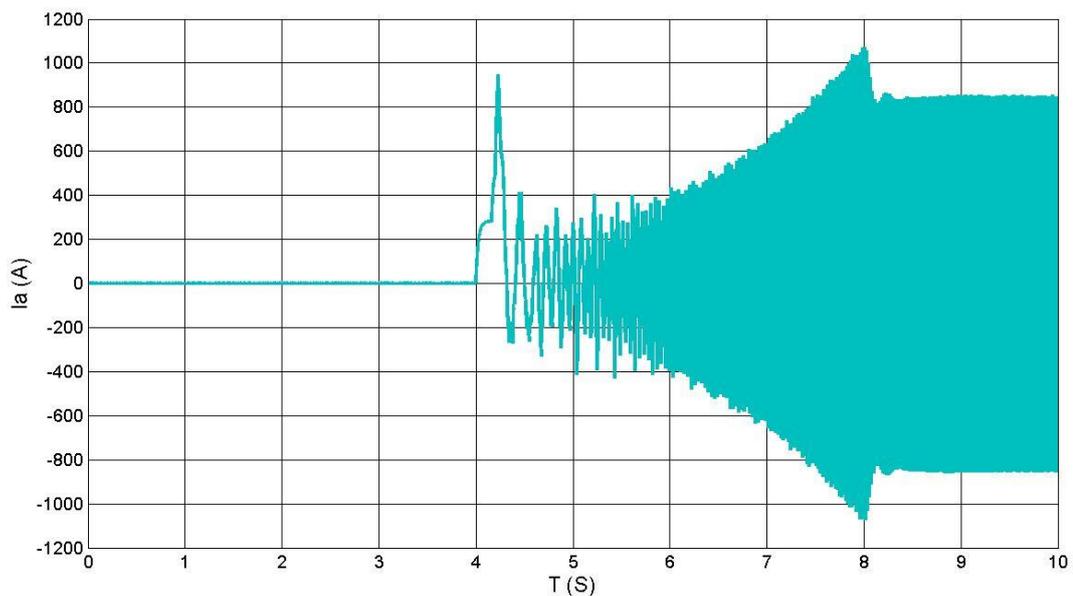


Рисунок 4.23 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.24 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

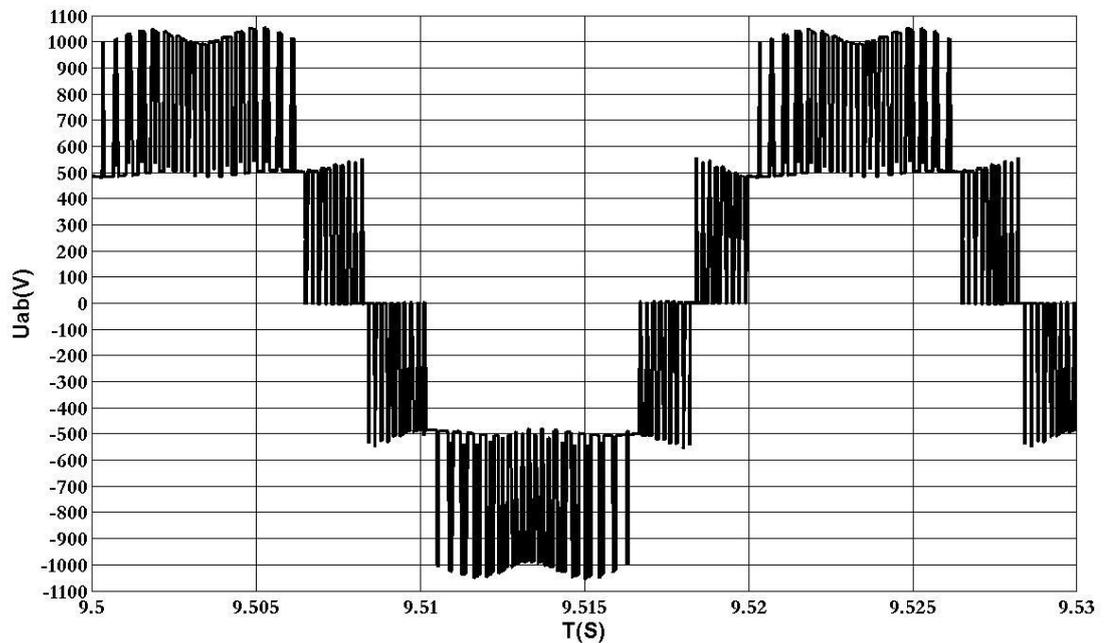


Рисунок 4.24 –Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.25 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

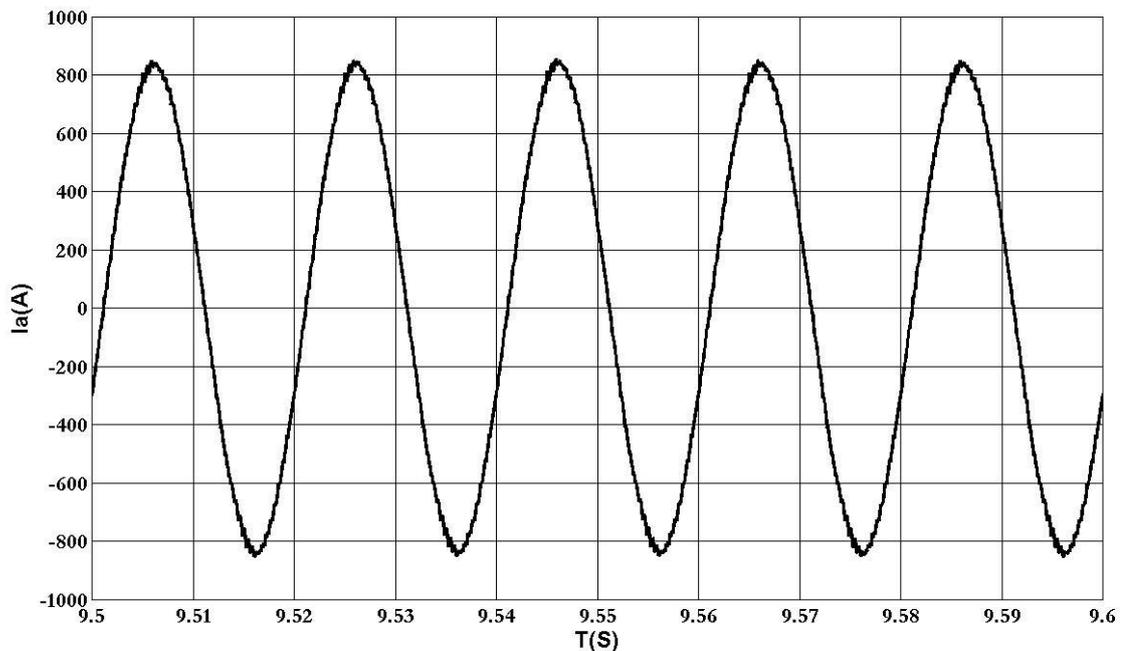


Рисунок 4.25 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.26 представлен гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя.

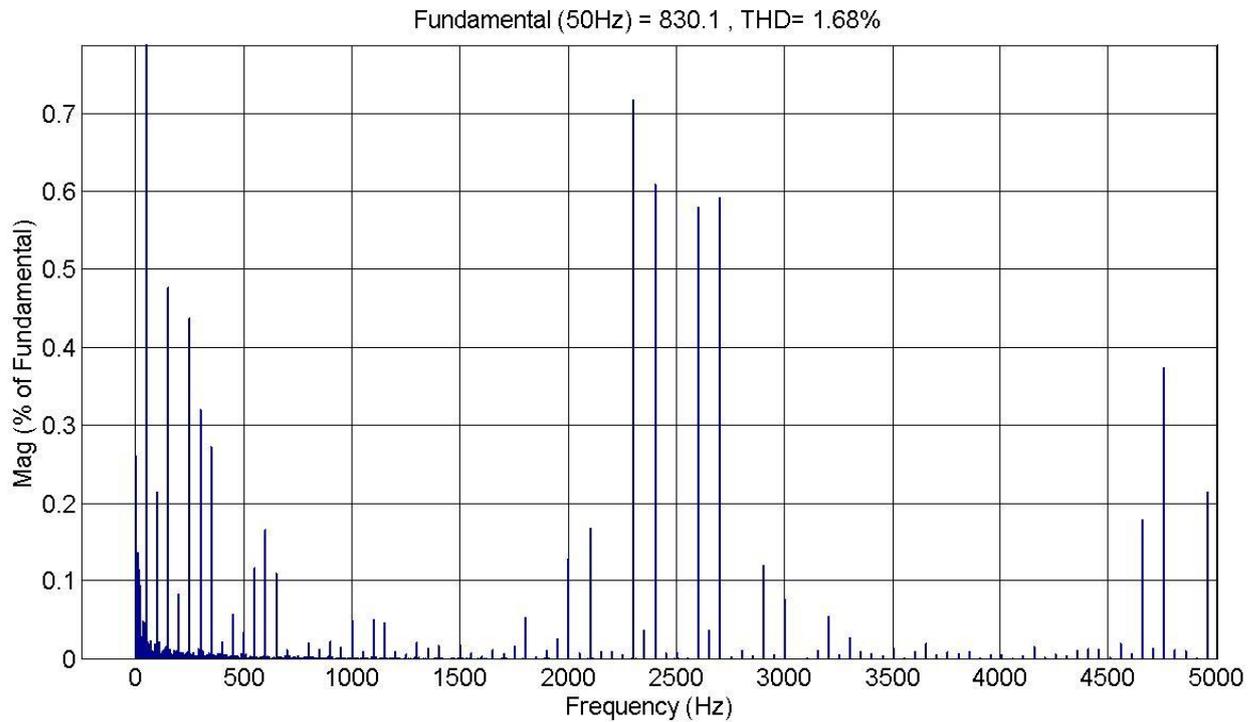


Рисунок 4.26 – Гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_T = 1,68\%$ , что значительно меньше, чем при работе гребного электродвигателя от преобразователя частоты на базе двухуровневого АИН.

Таким образом, бестрансформаторная схема СЭЭС по рисунку 4.13 обеспечивает высокое качество тока протекающего через обмотки гребного электродвигателя. Однако, качество напряжения, поступающего на потребители собственных нужд, не соответствует требованиям правил РМРС.

### 4.3 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с многоуровневым АИН. Вариант 2

На рисунке 4.27 представлена схема СЭЭС, в которой гребная электрическая установка запитывается непосредственно от генераторных агрегатов. Гребной электродвигатель получает питание от преобразователя частоты на базе трехуровневого АИН. Два изолированных источника постоянного тока, получены путем применения двух трехфазных генераторных агрегатов.

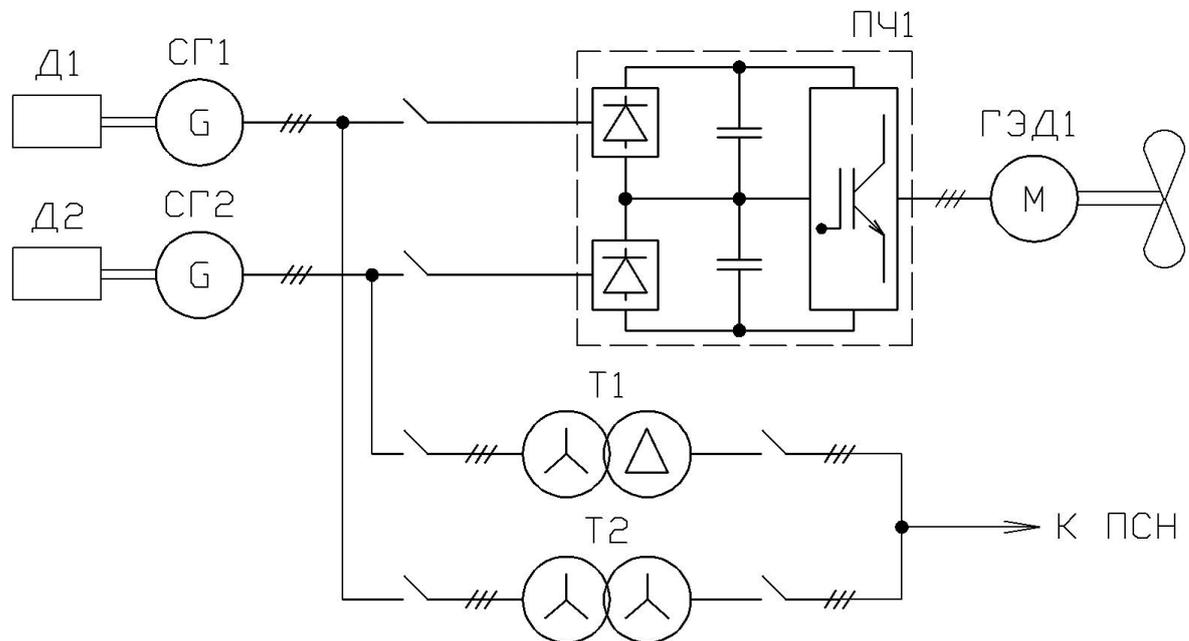


Рисунок 4.27 – Схема бестрансформаторной СЭЭС

В данной СЭЭС потребители собственных нужд подключаются к вторичным обмоткам трансформаторов Т1 и Т2. Первичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2 подключаются к трехфазным обмоткам генераторов Г1 и Г2.

Первичные обмотки обоих трансформаторов соединены звездой, а вторичные звездой и треугольником. Такое соединение вторичных обмоток Т1 и Т2 обеспечивает синхронизацию генераторов Г1 и Г2 с углом в 30 электрических градусов. На основе схемы по рисунку 4.27, разработана модель бестрансформаторной СЭЭС, которая представлена на рисунке 4.28.

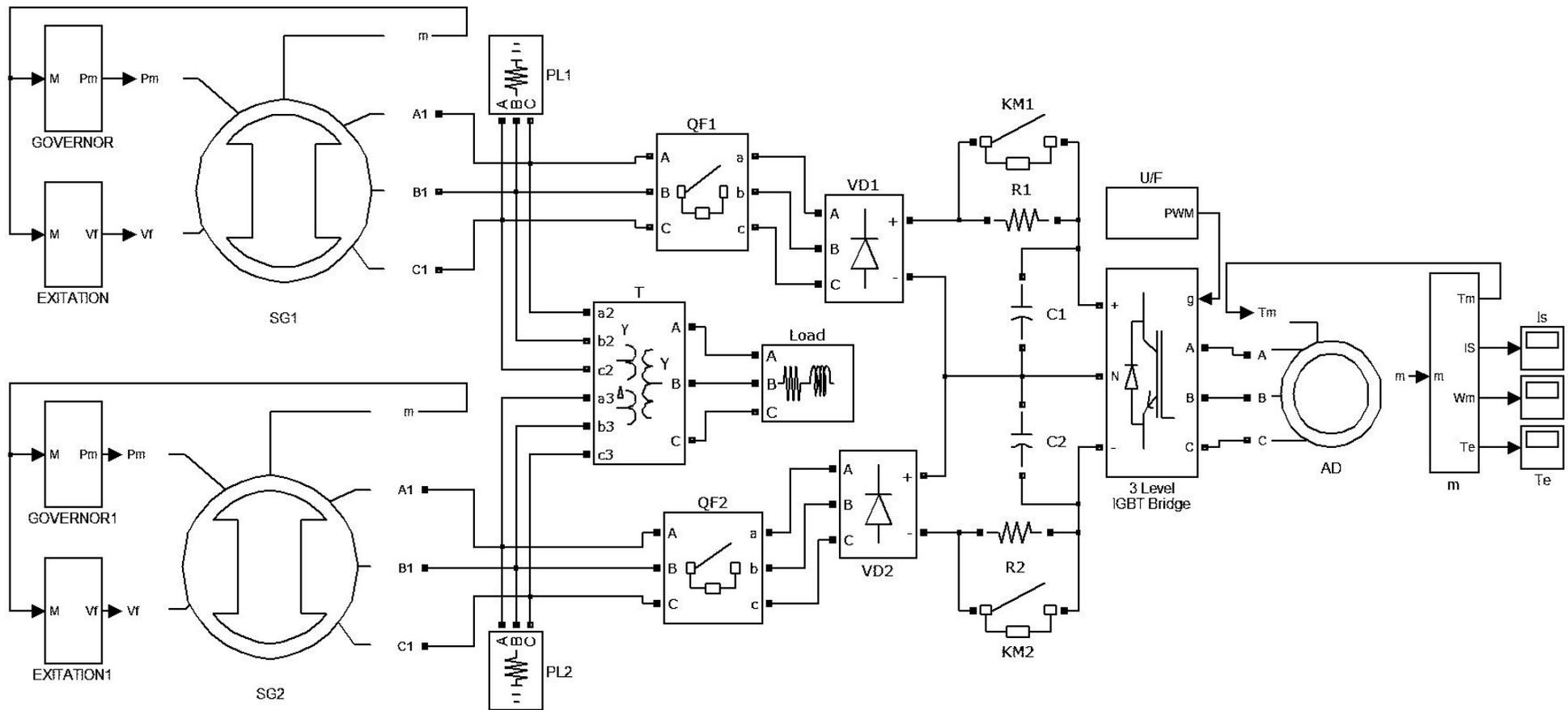


Рисунок 4.28 – Модель бестрансформерной СЭЭС в Matlab Simulink

Представленная модель состоит из аналогичных блоков, что и модель по рисунку 4.14.

На рисунках 4.29 и 4.30 представлен график напряжения  $U_{AB}$  на генераторах SG1 и SG2.

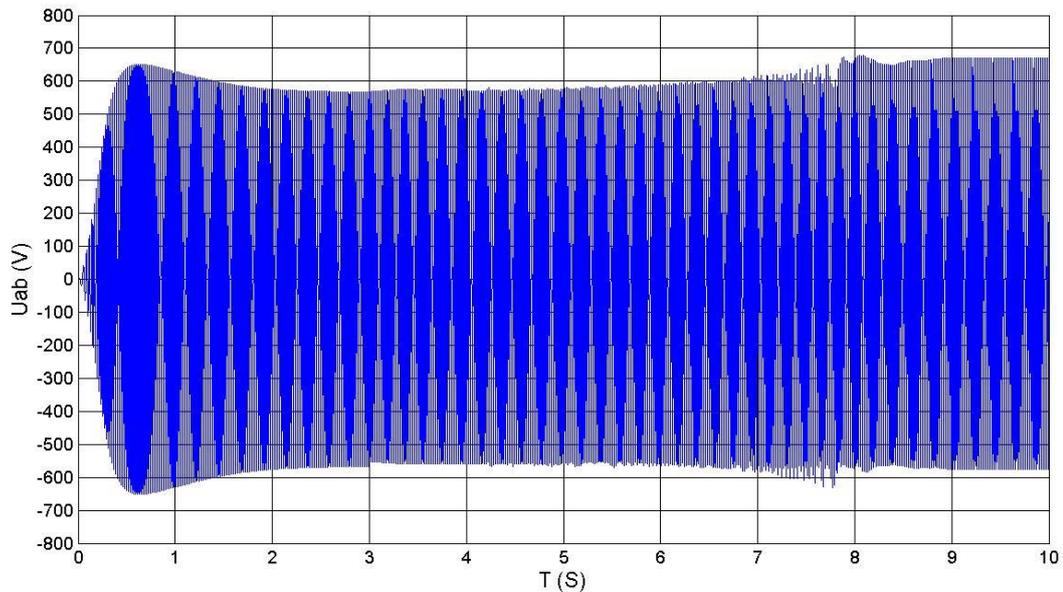


Рисунок 4.29 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG1

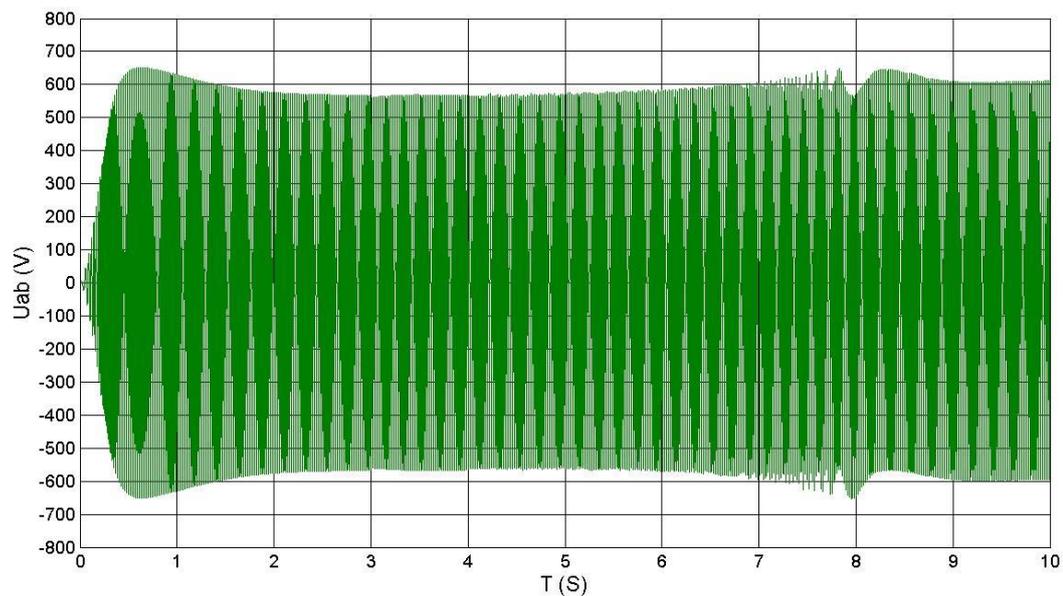


Рисунок 4.30 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG1

На рисунках 4.31 и 4.32 представлен график тока  $I_A$  на генераторах SG1 и SG2.

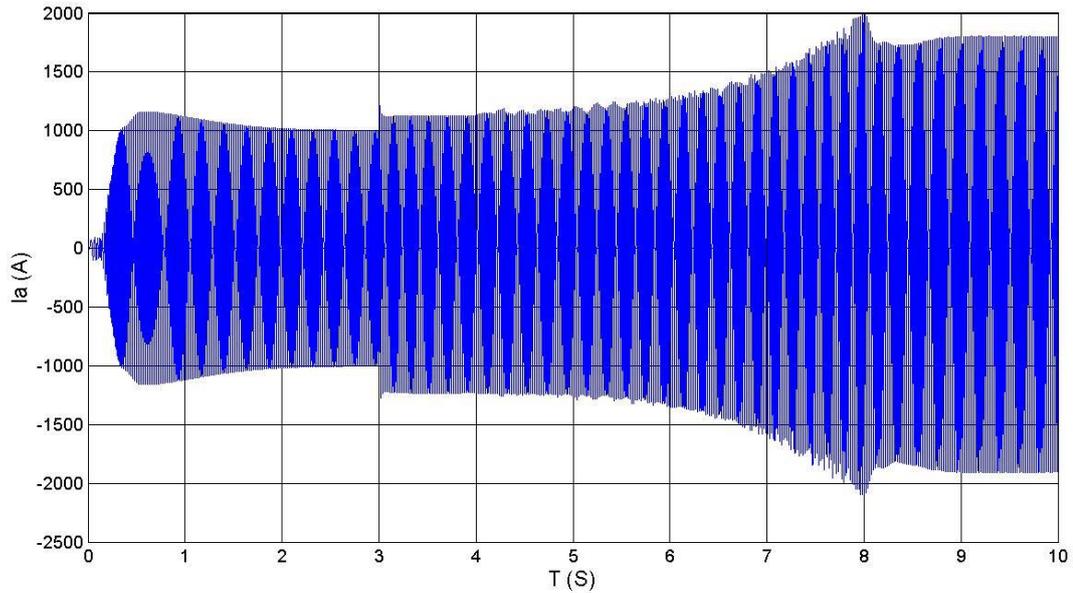


Рисунок 4.31 – График линейного тока  $I_A$  на генераторе SG1

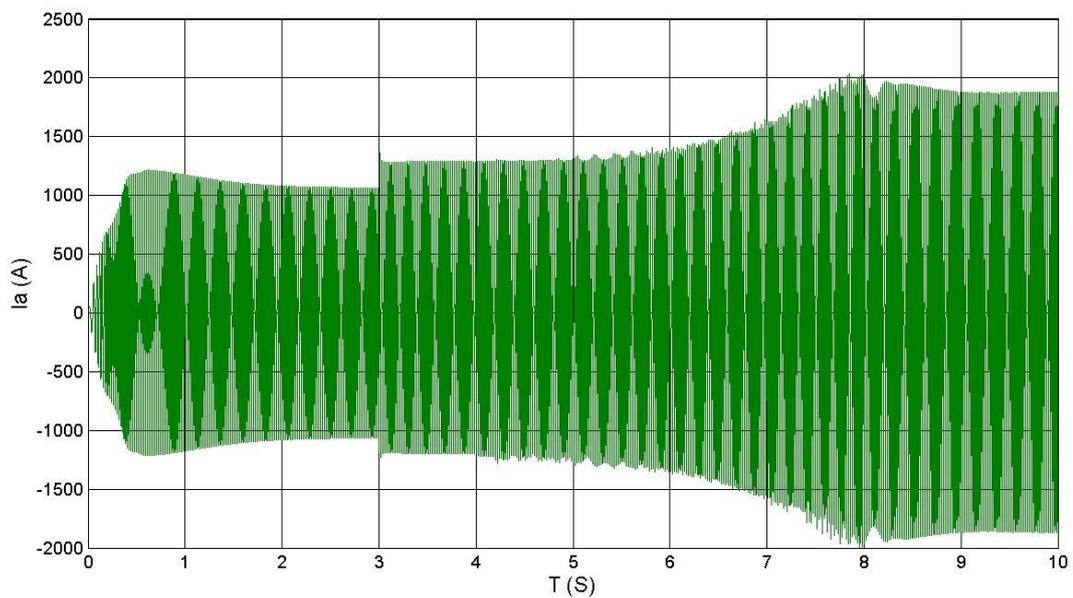


Рисунок 4.32 – График линейного тока  $I_A$  на генераторе SG2

На рисунке 4.33 представлен график линейного напряжения  $U_{AB}$  на обмотке SG1. При этом гребной электродвигатель работает на номинальную мощность. По рисунку 4.33 заметны значительные искажения напряжения, вносимые в судовую сеть, трехфазными выпрямителями, входящими в состав преобразователя частоты.

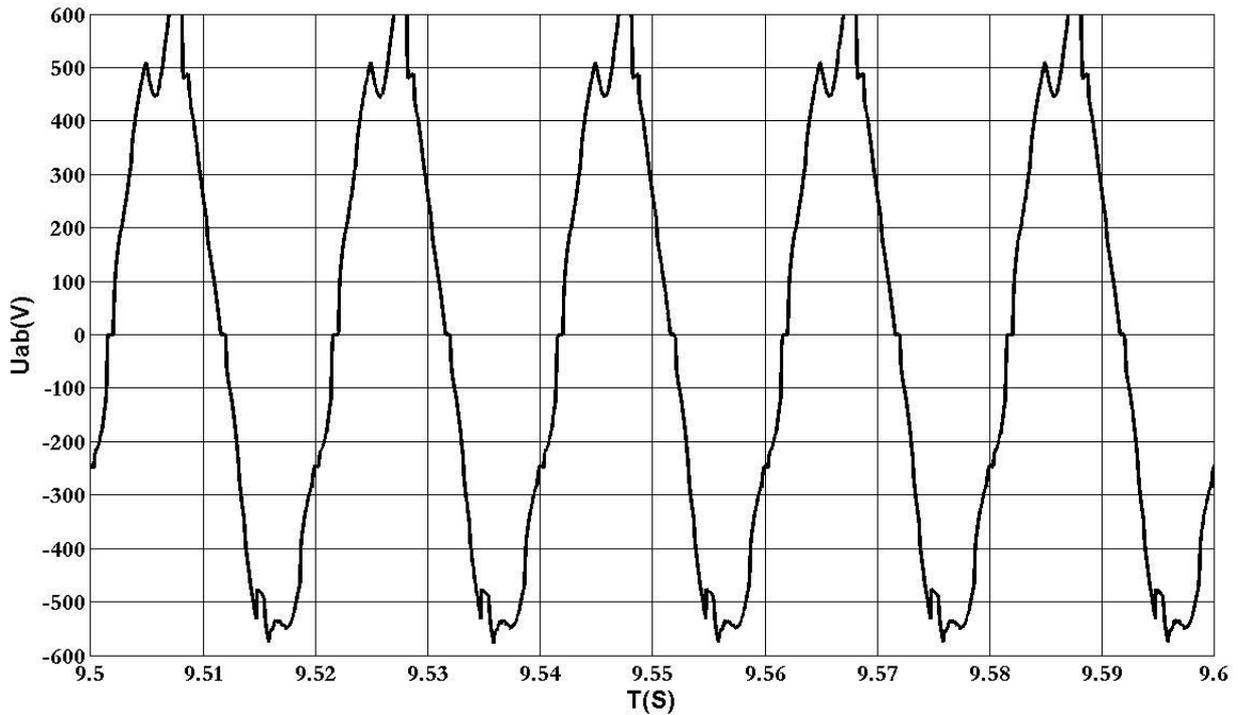


Рисунок 4.33 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на генераторе SG1

На рисунке 4.34 изображен график линейного напряжения  $U_{AB}$  на вторичной обмотке трансформатора Т, к которому подключаются общесудовые потребители.

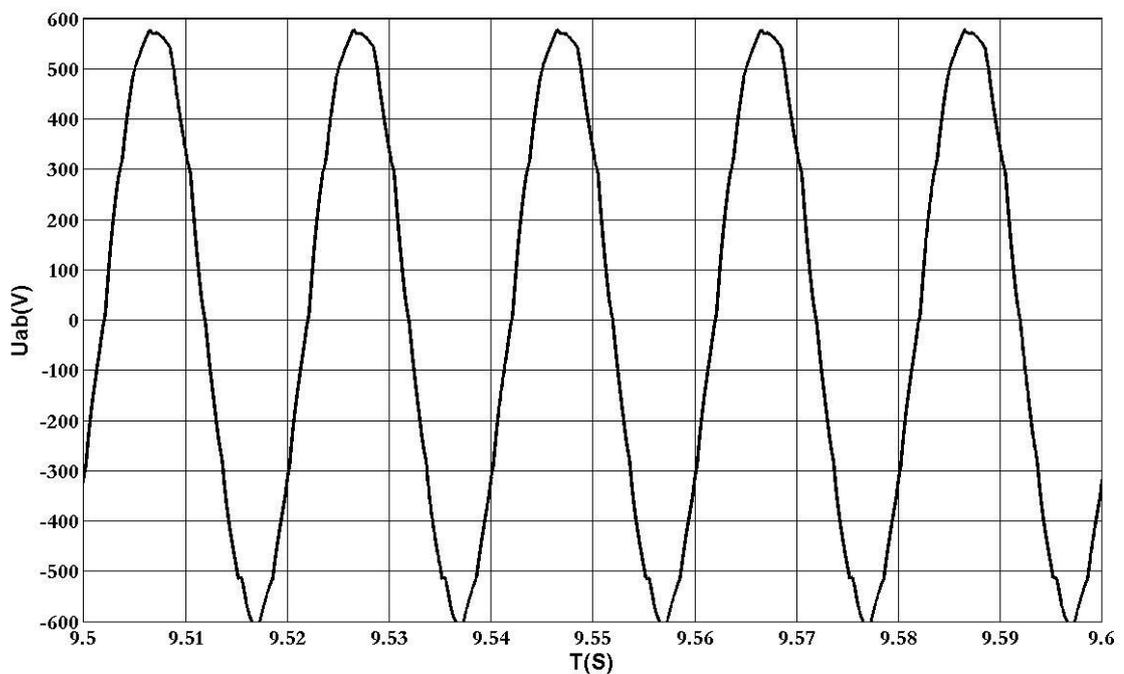


Рисунок 4.34 – Линейное напряжение на  $U_{AB}$  на общесудовой нагрузке

На рисунке 4.35 представлен гармонический состав линейного напряжения  $U_{AB}$  на вторичных обмотках трансформаторов Т1 и Т2.

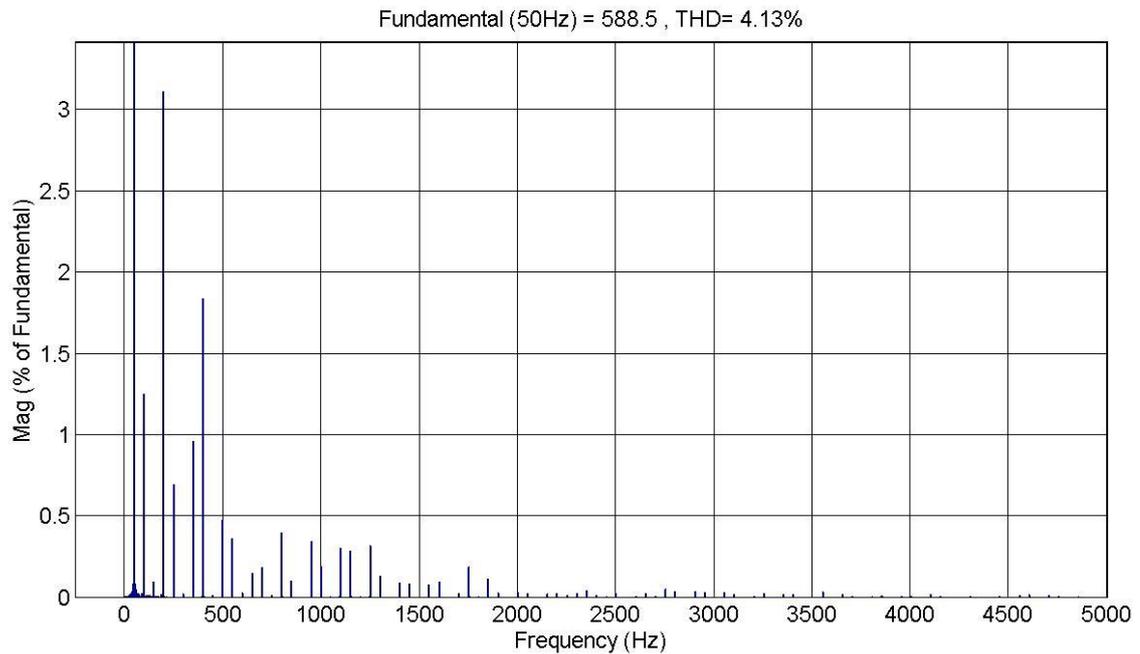


Рисунок 4.35 – Гармонический состав напряжения на общесудовой нагрузке

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_T = 4,13\%$ , что не превышает допустимого значения по правилам РМРС.

На рисунке 4.36 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

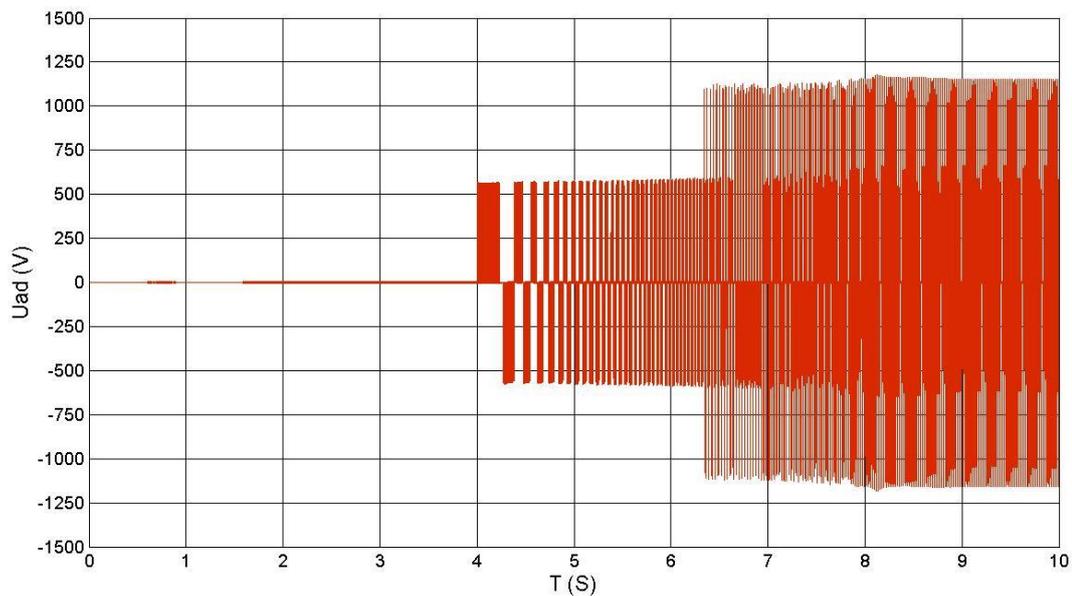


Рисунок 4.36 – Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.37 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

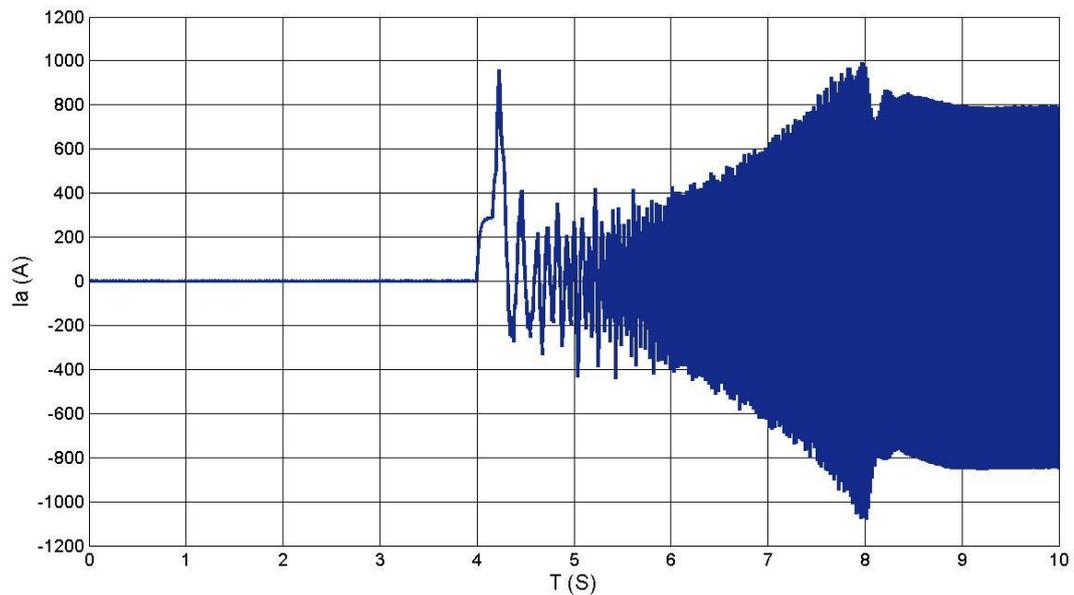


Рисунок 4.37 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.38 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

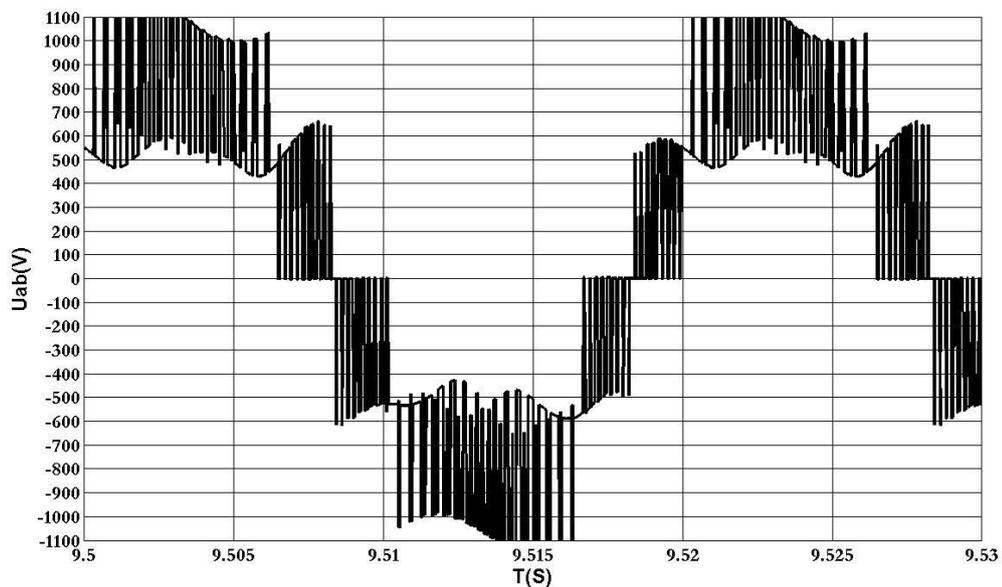


Рисунок 4.38 – Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.39 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

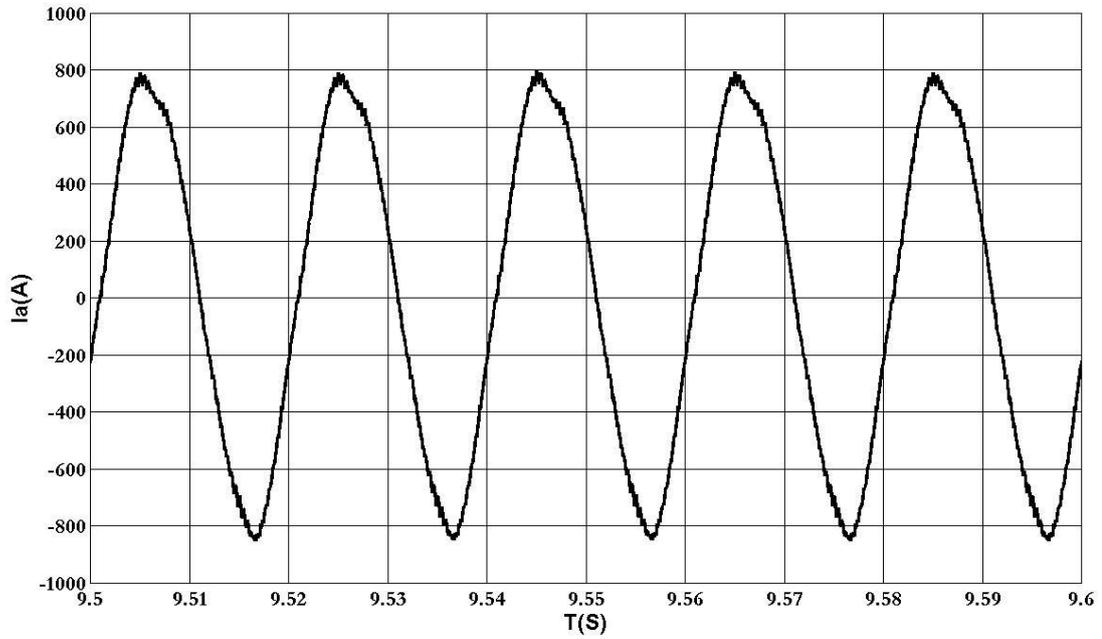


Рисунок 4.39 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.40 представлен гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя.

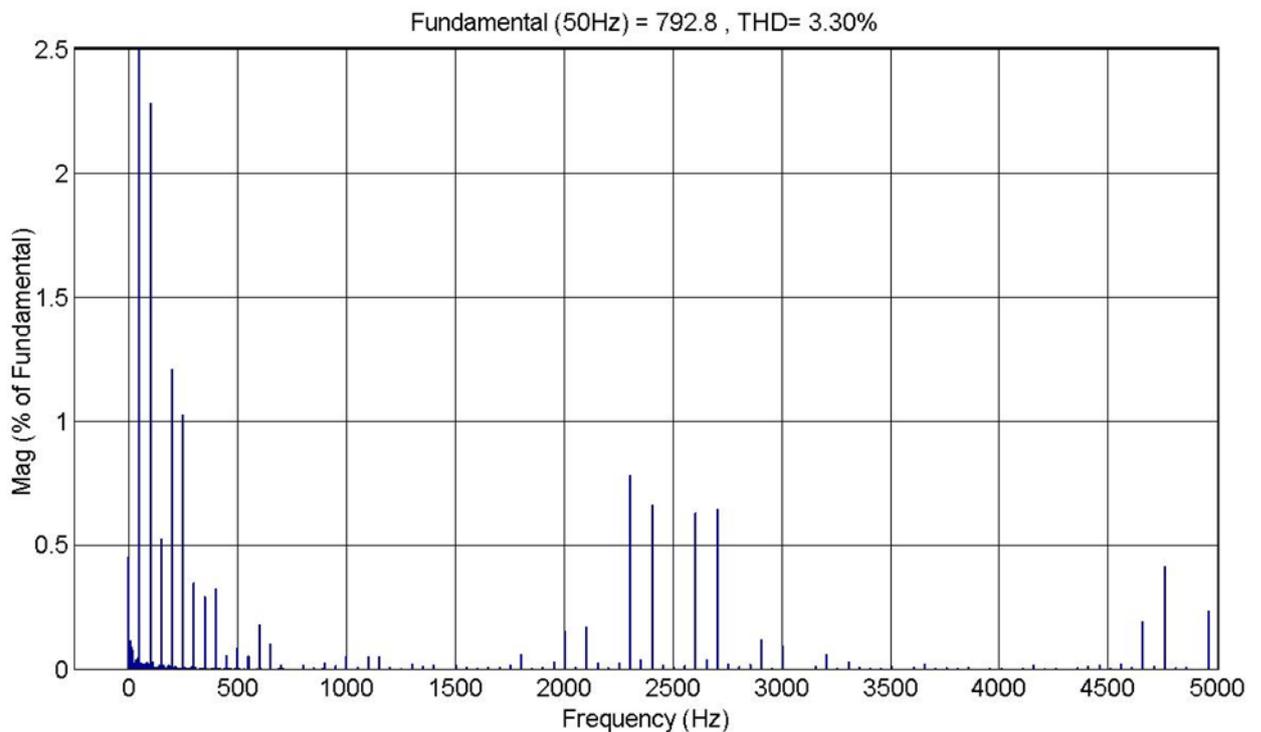


Рисунок 4.40 - Гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_r = 3,30\%$ , что по-прежнему меньше, чем при работе гребного электродвигателя от преобразователя частоты на базе двухуровневого АИН.

Таким образом, бестрансформаторная схема СЭЭС по рисунку 4.27 обеспечивает высокое качество тока ( $K_r = 3,30\%$ ), протекающего через обмотки гребного электродвигателя. А также хорошее ( $K_r = 4,13\%$ ) качество напряжения, поступающего на потребители собственных нужд.

#### 4.4 Моделирование бестрансформаторной СЭЭС с двухобмоточным генератором

На рисунке 4.41 представлена схема СЭЭС, в которой гребная электрическая установка запитывается непосредственно от двухобмоточного генераторного агрегата. Гребной электродвигатель получает питание от преобразователя частоты на базе трехуровневого АИН.

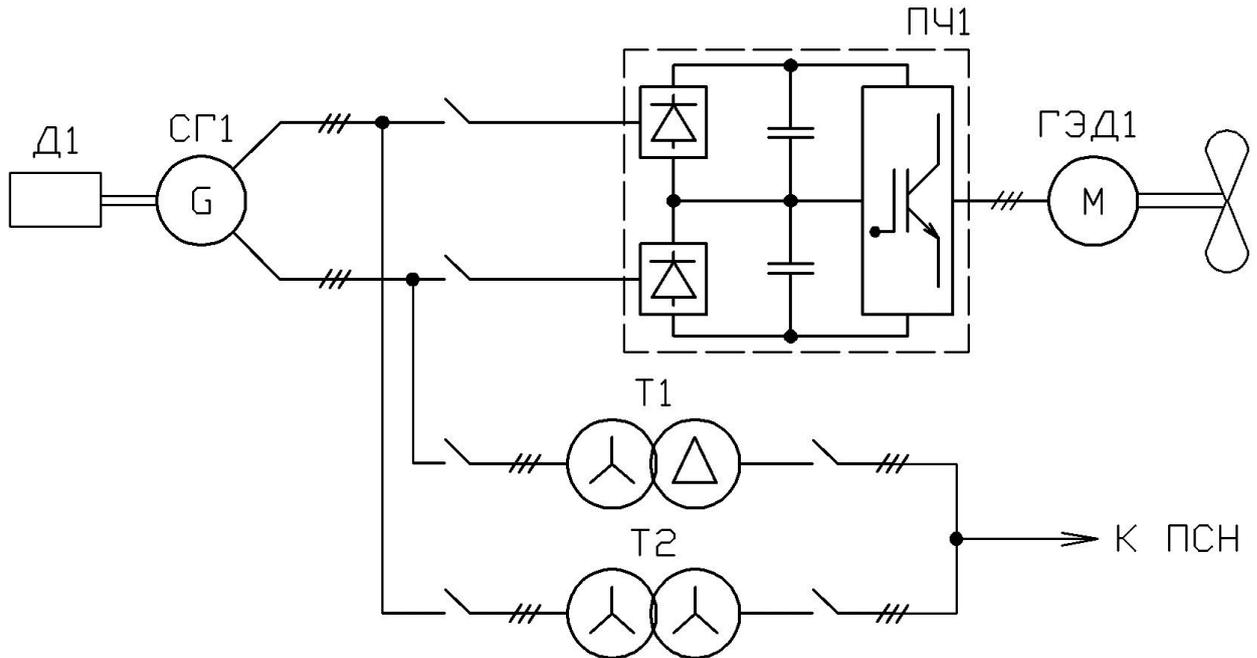


Рисунок 4.41 – Схема бестрансформаторной СЭЭС

В данной СЭЭС потребители собственных нужд подключаются к вторичным обмоткам трансформаторов Т1 и Т2. Первичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2 подключаются к двухобмоточному генератору СГ1.

Первичные обмотки обоих трансформаторов соединены звездой, а вторичные звездой и треугольником. На основе схемы по рисунку 4.41, разработана модель бестрансформаторной СЭЭС, которая представлена на рисунке 4.42.

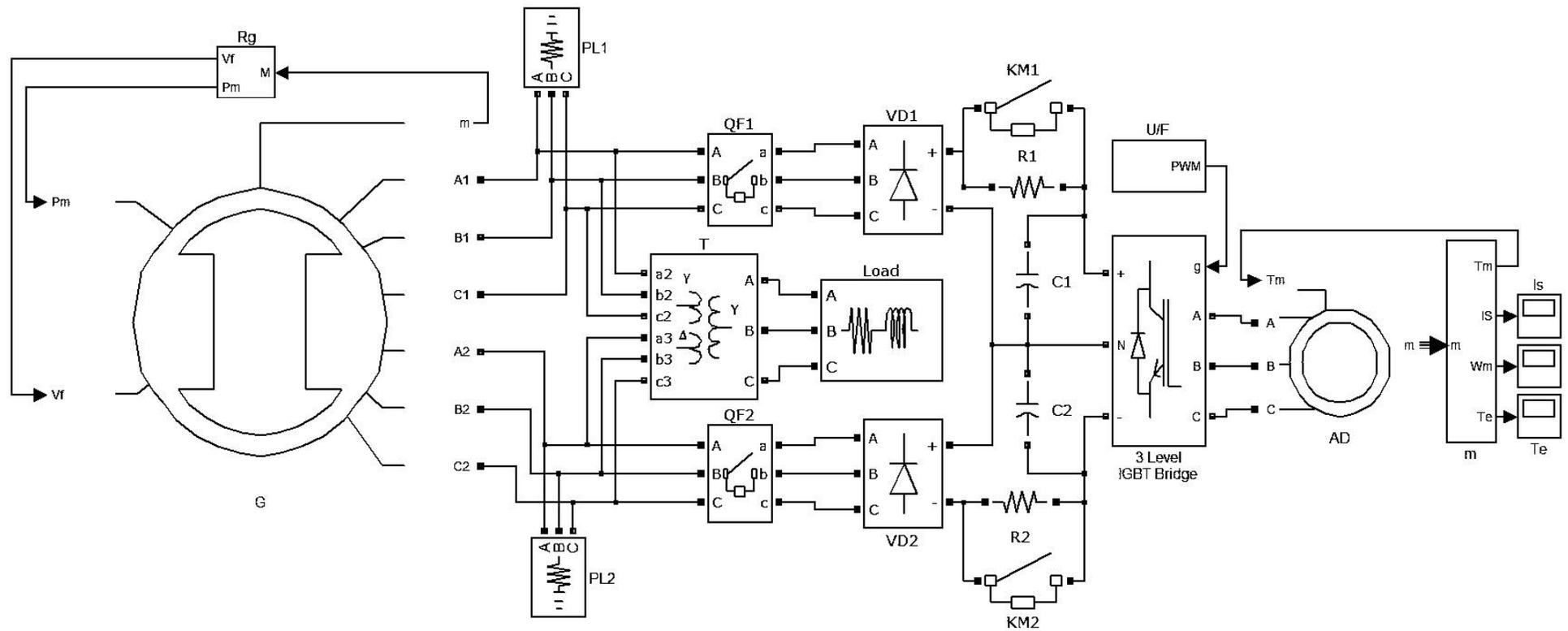


Рисунок 4.42 – Модель бестрансформаторной СЭЭС в Matlab Simulink

На рисунках 4.43 и 4.44 представлен график напряжения  $U_{AB1}$  и  $U_{AB2}$  на генераторе SG.

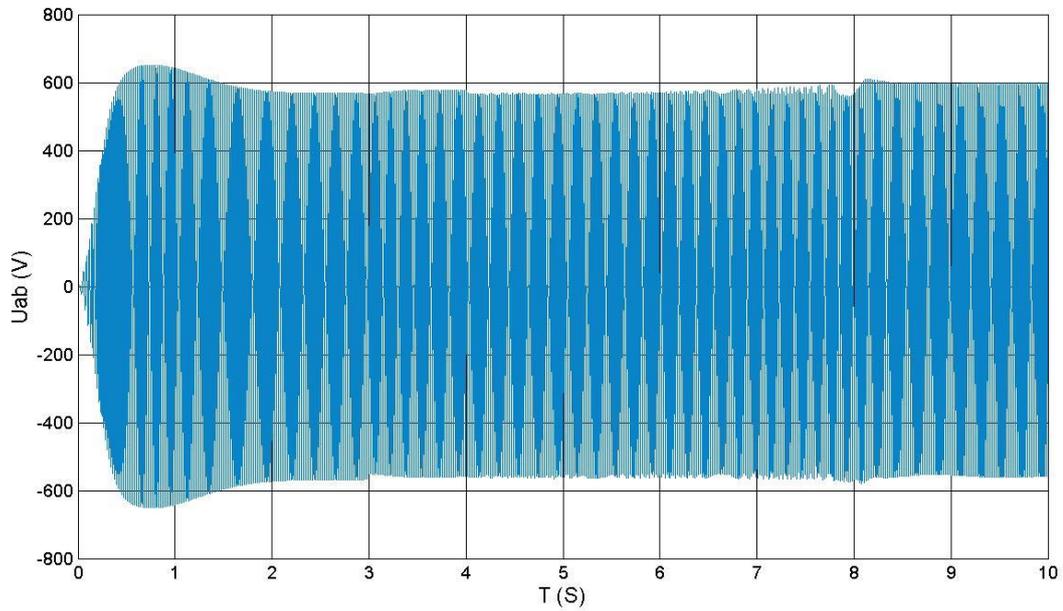


Рисунок 4.43 – График линейного напряжения  $U_{AB1}$  на генераторе SG

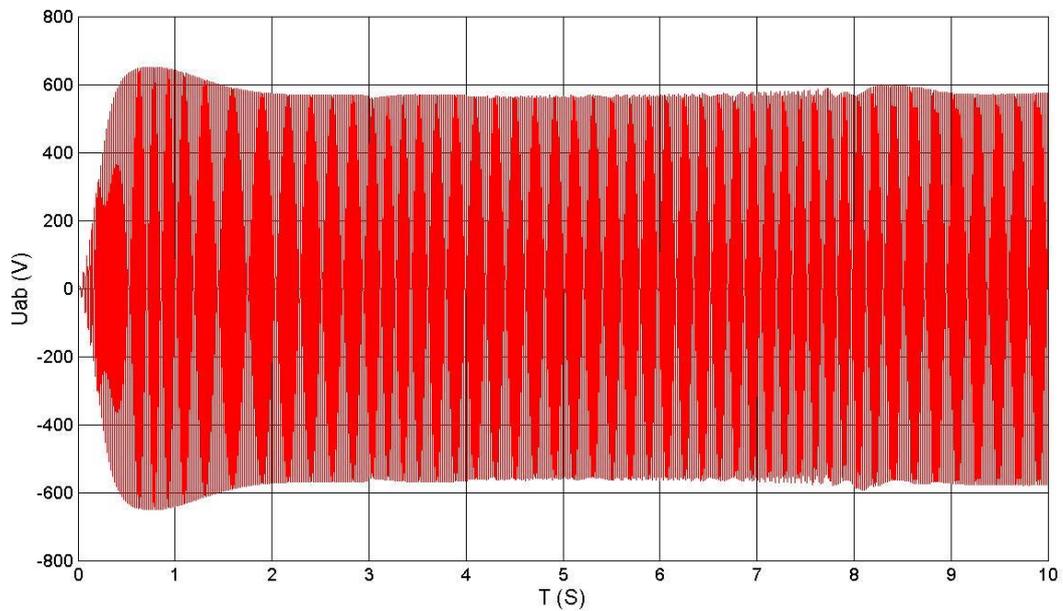


Рисунок 4.44 – График линейного напряжения  $U_{AB2}$  на генераторе SG

На рисунках 4.45 и 4.46 представлен график тока  $I_{A1}$  и  $I_{A2}$  на генераторе SG.

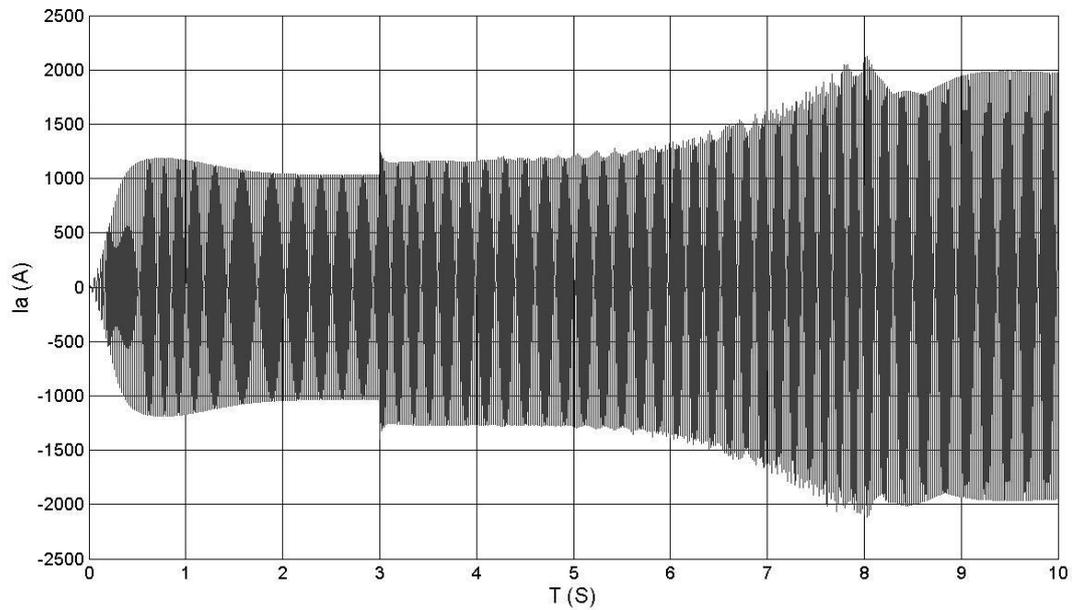


Рисунок 4.45 – График линейного тока  $I_{A1}$  на генераторе SG

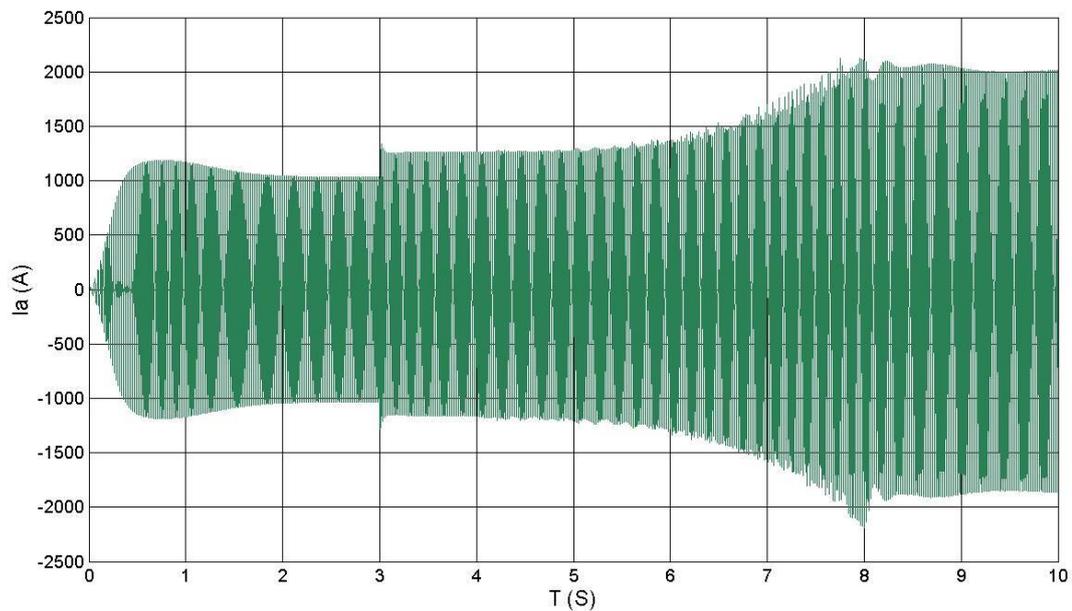


Рисунок 4.46 – График линейного тока  $I_{A2}$  на генераторе SG

На рисунке 4.47 изображен график напряжения  $U_{AB}$  вторичных обмотках трансформаторов T1 и T2. При этом гребной электродвигатель

работает на номинальную мощность. По рисунку 4.47 заметны значительные искажения напряжения, вносимые в судовую сеть, трехфазными выпрямителями, входящими в состав преобразователя частоты.

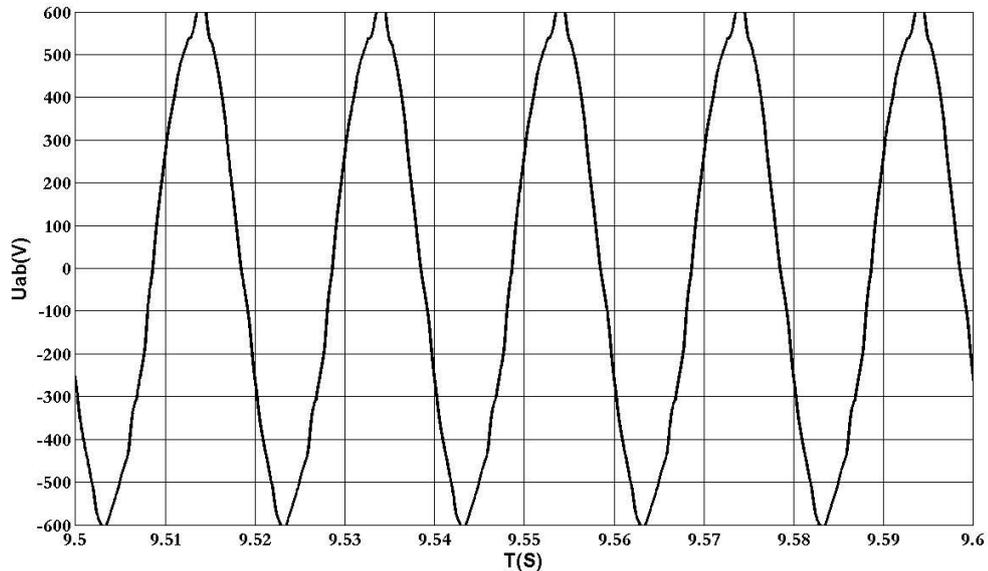


Рисунок 4.47 – График линейного напряжения  $U_{AB}$  на общесудовой нагрузке

На рисунке 4.48 представлен гармонический состав линейного напряжения  $U_{AB}$  на вторичных обмотках трансформаторов Т1 и Т2.

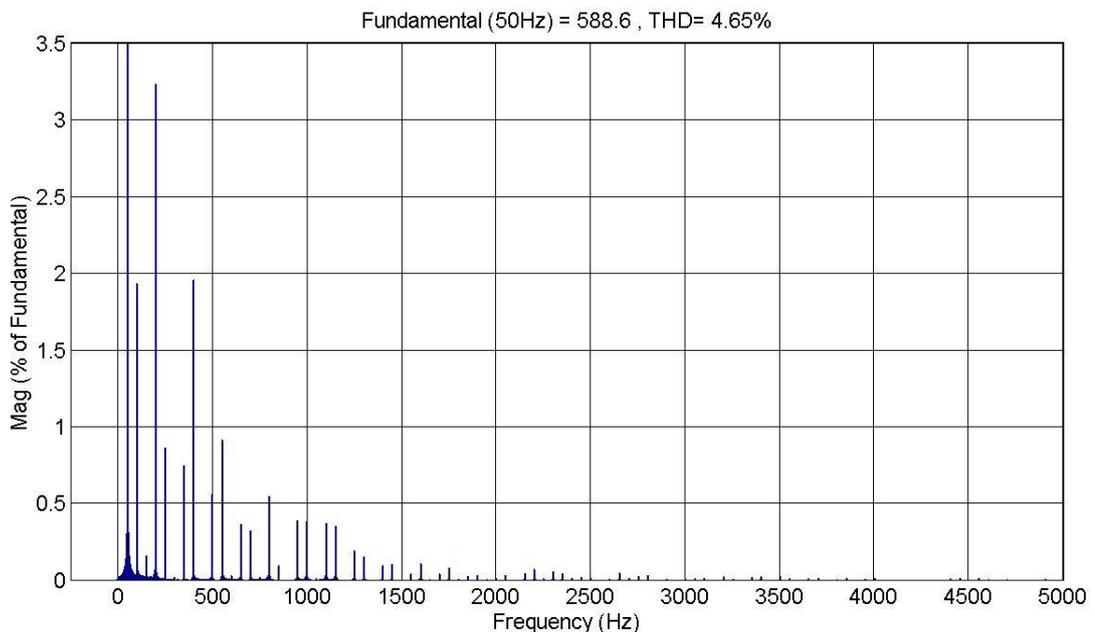


Рисунок 4.48 – Линейное напряжение на  $U_{AB}$  на общесудовой нагрузке

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_T = 4,65\%$ , что не превышает допустимого значения по правилам РМРС.

На рисунке 4.49 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

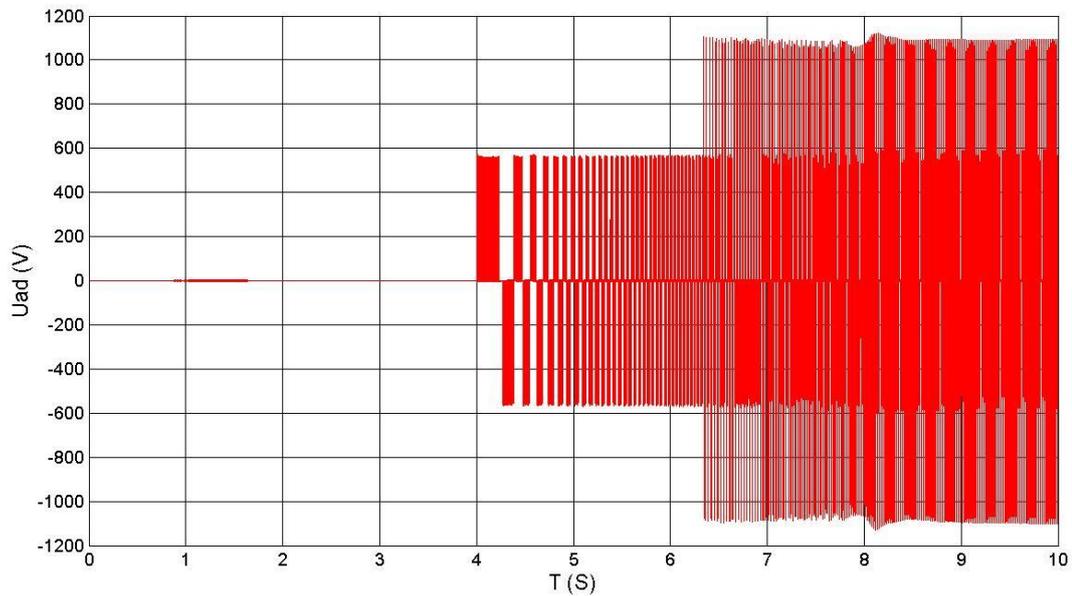


Рисунок 4.49 – Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.50 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

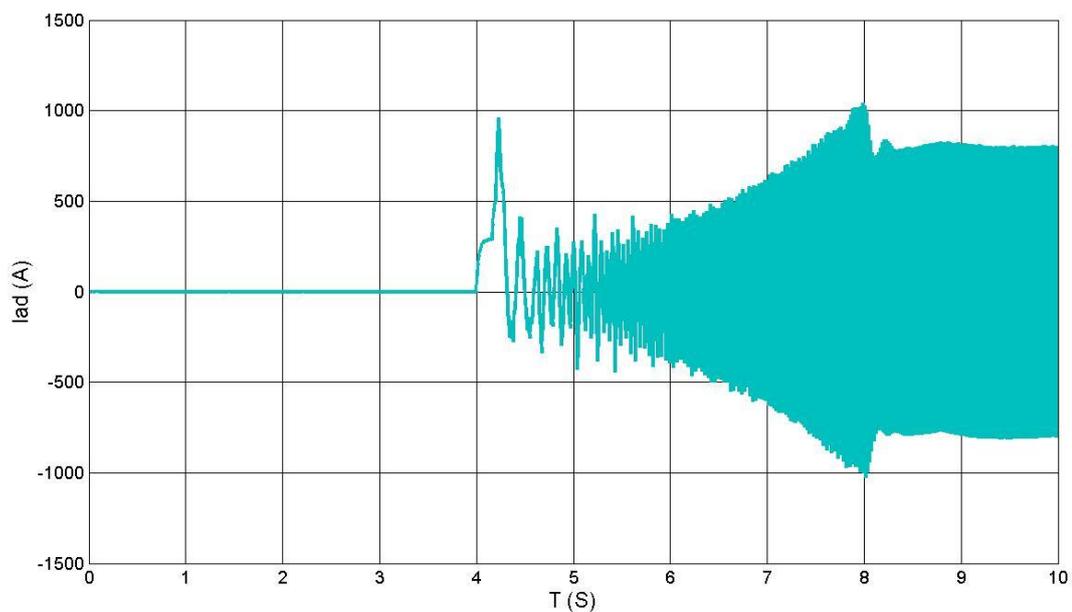


Рисунок 4.50 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.51 изображен график линейного выходного напряжения трехуровневого АИН, входящего в состав преобразователя частоты.

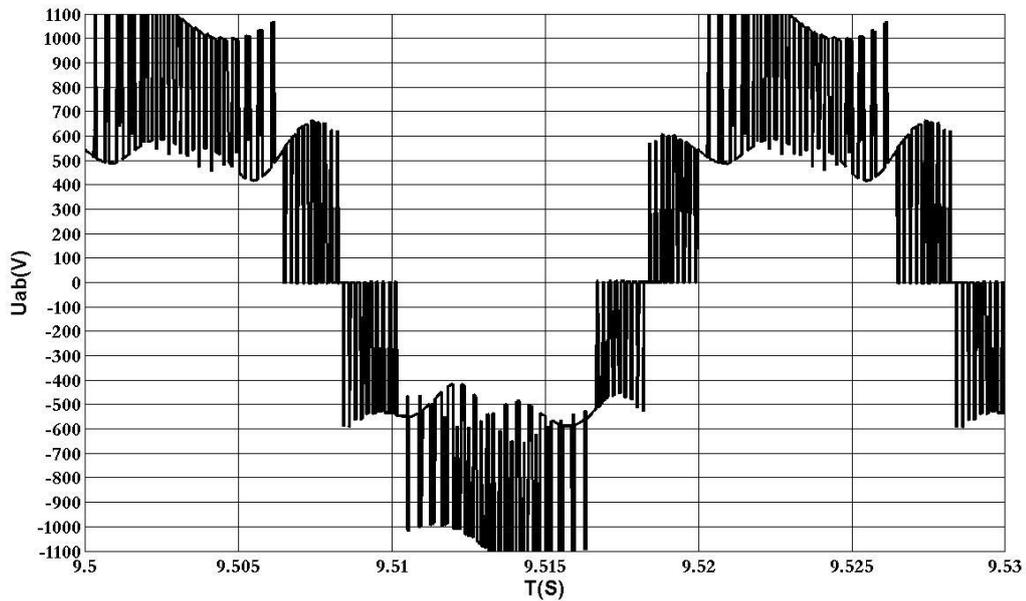


Рисунок 4.51 – Линейное напряжение на выходе трехуровневого АИН

На рисунке 4.52 представлен график фазного тока гребного электродвигателя.

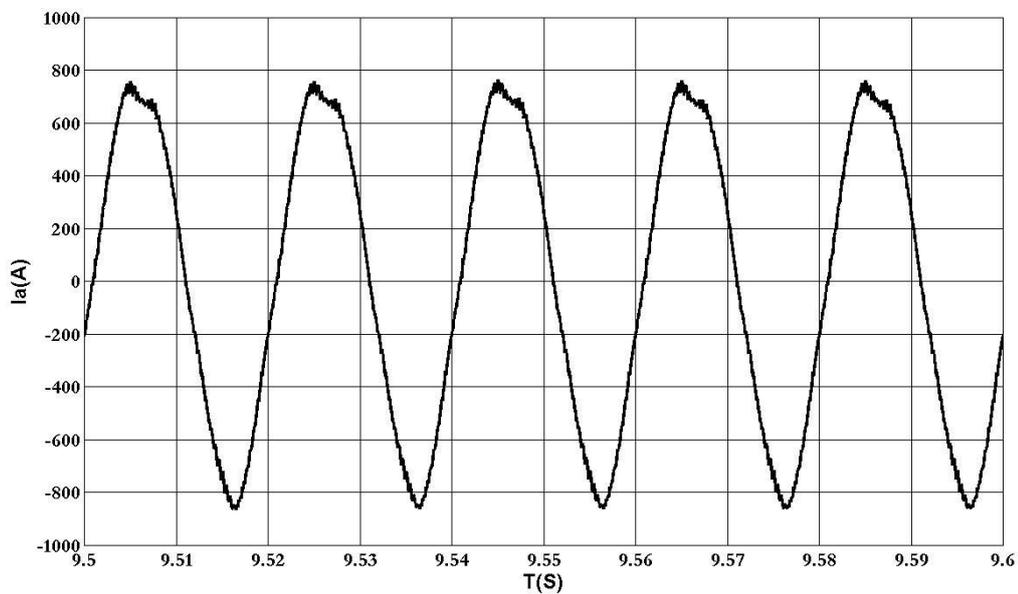


Рисунок 4.52 – Ток фазы гребного электродвигателя

На рисунке 4.53 представлен гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя.

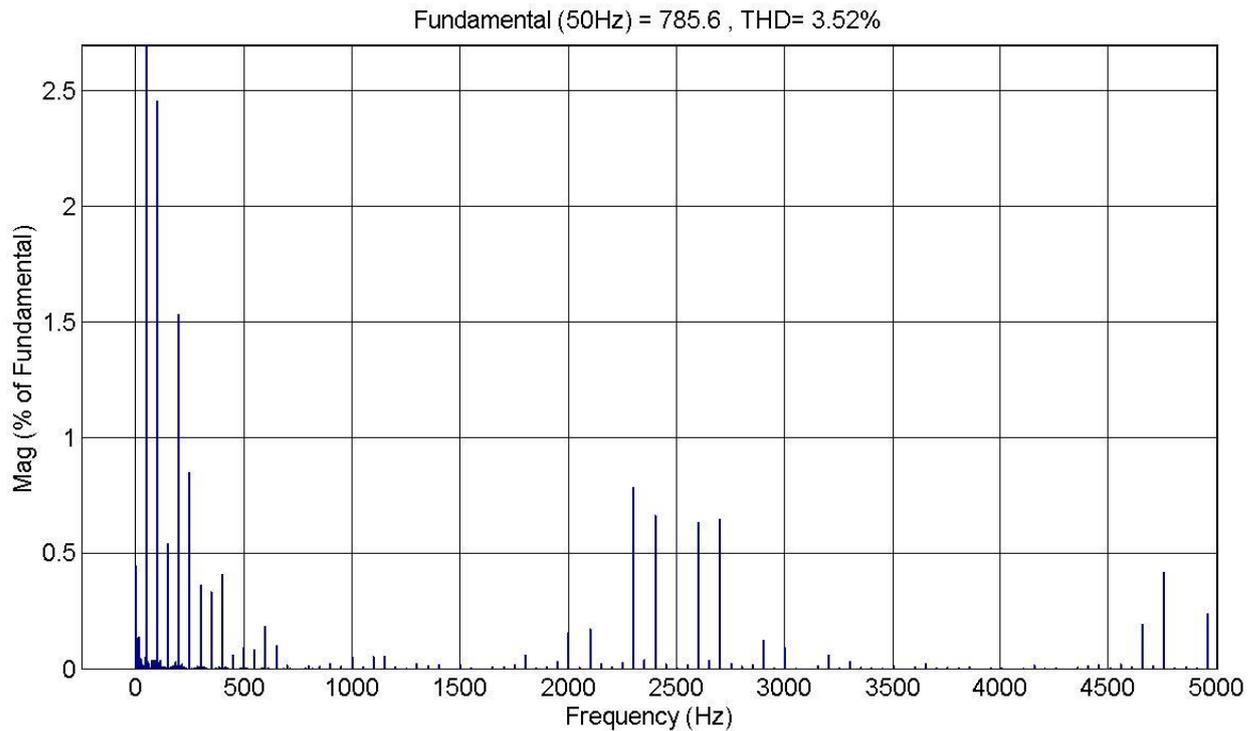


Рисунок 4.53 - Гармонический состав тока фазы гребного электродвигателя

По данному рисунку, коэффициент гармоник напряжения составляет  $K_T = 3,52\%$ , что по-прежнему меньше, чем при работе гребного электродвигателя от преобразователя частоты на базе двухуровневого АИН.

Таким образом, бестрансформаторная схема СЭЭС по рисунку 4.41 обеспечивает высокое качество тока ( $K_T = 3,52\%$ ), протекающего через обмотки гребного электродвигателя. А также хорошее ( $K_T = 4,65\%$ ) качество напряжения, поступающего на потребители собственных нужд.

#### 4.5 Анализ результатов моделирования

На основе результатов моделирования четырех схем СЭЭС составлена таблица 4.1, в которой содержатся значения коэффициентов гармоник напряжения и тока для рассмотренных схем.

Таблица 4.1

№ п.п.	Схема СЭЭС	$K_r$ , %. ЩИТ ПСН	$K_r$ , %. Ток ГЭД
1	Типичная схема («Вайгач»).	3,88	6,09
2	Бестрансформаторная с многоуровневым АИН (с трансформатором «звезда-звезда»).	10,79	1,68
3	Бестрансформаторная с многоуровневым АИН (с трансформатором «звезда-треугольник»).	4,13	3,30
4	Бестрансформаторная с двухобмоточным синхронным генератором.	4,65	3,52

В соответствии с таблицей 4.1, из трех бестрансформаторных схем, рассмотренных в главе 4, удовлетворяют требованиям по качеству напряжения для потребителей собственных нужд и качеству тока в обмотках ГЭД, две схемы СЭЭС:

- бестрансформаторной схема с многоуровневым АИН и трансформатором «звезда-треугольник» (вариант 2);
- бестрансформаторная схема с двухобмоточным синхронным генератором.

### **Выводы по Главе IV**

1 Разработаны компьютерные модели существующих и перспективных судовых электроэнергетических систем.

2 На основе разработанных моделей выполнено компьютерное моделирование. В процессе моделирования оценивались качество напряжения у потребителей собственных нужд и качество тока в обмотках гребных электродвигателей, питание которых производилось от преобразователей частоты на базе двух- и трехуровневого автономных инверторов напряжения.

3 Из результатов моделирования видно, что бестрансформаторные схемы судовых электроэнергетических систем обладают хорошими показателями, по сравнению с существующими схемами судовых электроэнергетических систем.

## Заключение

В диссертационной работе рассмотрены судовые бестрансформаторные единые электроэнергетические системы, которые по сравнению с типичной схемой ЕЭЭС обладают большим КПД, меньшими массой и габаритами.

К основным результатам можно отнести следующее.

1 Разработаны схемы единых судовых электроэнергетических систем, в которых исключены согласующие трансформаторы по линии ГРЩ-ГЭД. Исключение согласующих трансформаторов позволяет:

- повысить КПД СЭЭС;
- сократить стоимость электрооборудования;
- сократить стоимость электромонтажных работ;
- сократить массу СЭЭС;
- сократить габариты СЭЭС;
- снизить расходы при эксплуатации судна.

2 Разработана схема бестрансформаторной единой электроэнергетической системы, содержащей преобразователи частоты на базе многоуровневого автономного инвертора напряжения.

3 На предложенные схемы бестрансформаторных ЕЭЭС получены патенты РФ:

- Патент РФ № 2529090. Судовая электроэнергетическая установка / А.Н. Калмыков, В.И. Кузнецов, А.П. Сеньков. 27.03.2013;

- Патент РФ № 2521883. Судовая электроэнергетическая установка / А.Н. Калмыков, В.И. Кузнецов, А.П. Сеньков. 21.01.2013.

4 Выполнено исследование типовой схемы ЕЭЭС, а также предложенных бестрансформаторных схем. По результатам моделирования, сделаны следующие выводы.

4.1 Моделирование типичной структуры судовой единой электроэнергетической системы подтвердило, что данная структура обеспечивает высокое качество напряжения ( $K_r = 3,88\%$ ) у потребителей

собственных нужд, что обеспечивается благодаря наличию согласующего трансформатора на линии питания ГРЩ-ГЭД. Качество тока в фазе гребного электродвигателя низкое ( $K_r = 6,09 \%$ ), поскольку питание гребного электродвигателя производится от преобразователя частоты на базе двухуровневого автономного инвертора напряжения.

4.2 Бестрансформаторная схема ЕЭЭС с двумя трехфазными генераторами и трансформатором «звезда-треугольник-звезда» обеспечивает высокое качество напряжения ( $K_r = 4,13 \%$ ) у потребителей собственных нужд. Качество тока в фазе гребного электродвигателя, по сравнению с типичной схемой, значительно выше ( $K_r = 3,30 \%$ ), поскольку питание гребного электродвигателя производится от преобразователя частоты на базе трехуровневого автономного инвертора напряжения.

4.3 Бестрансформаторная схема ЕЭЭС с двухобмоточным синхронным генератором и трансформатором «звезда-треугольник-звезда» обеспечивает также высокое качество напряжения ( $K_r = 4,65 \%$ ) у потребителей собственных нужд. Качество тока в фазе гребного электродвигателя, по сравнению с типичной схемой, значительно выше ( $K_r = 3,52 \%$ ), поскольку питание гребного электродвигателя производится от преобразователя частоты на базе трехуровневого автономного инвертора напряжения.

4.4 Применение преобразователя частоты на базе трехуровневого автономного инвертора напряжения для питания гребного электродвигателя, позволяет существенно повысить качество тока в его обмотках. Для работы трехуровневого инвертора напряжения, необходимо два гальванически развязанных источника постоянного тока и более сложная система управления, позволяющая управлять большим количеством силовых полупроводниковых приборов. Дальнейшее повышение числа уровней позволяет в большей степени улучшить форму тока в обмотках гребного электродвигателя. Однако в случае, например, пятиуровневого автономного инвертора напряжения требуется четыре изолированных источника постоянного тока.

4.5 Многоуровневые инверторы напряжения обеспечивают высокое качество тока в нагрузке, на существенно более низких частотах коммутации силовых полупроводниковых приборов, по сравнению с двухуровневым инвертором, что позволяет сократить динамические потери в силовых полупроводниковых приборах инвертора.

**Список используемой литературы**

1. Гилерович Ю. М., Спешилов В. С., Туманов В. А. Перспективы развития гребных электрических установок // Судостроение, 1997, №4, с. 51 – 54.
2. Быков А. С., Башаев В. В., Малышев В. А., Романовский В. В. Гребные электрические установки атомных ледоколов, Спб, «Элмор», 2004, 319 с.
3. Панов В. А., Романовский В. В., Корди С. А. Эксплуатация гребных электрических установок. М., «Транспорт», 1988, 174 с.
4. Патент РФ №2234439, 20.08.2004. Аарнивуо Юсси, Приводная система гребного винта надводного судна и способ обеспечения движения и управления по курсу.
5. Azipod<sup>®</sup> Propulsion / Интернетиздание фирмы АВВ Оу, <http://www.abb.com/marine>, 26.11.2009, 18 с.
6. Справочное руководство к проекту движительных систем Azipod<sup>®</sup>. Версия 6.2. Finland, Издание АВВ Оу, 2008, 65 с.
7. Project Guide for Compact Azipod<sup>®</sup> Propulsion System / Интернетиздание фирмы АВВ Оу, <http://www.abb.com/marine>, 26.03.2004, 43 с.
8. CRP Azipod<sup>®</sup> Propulsion Concept / Интернетиздание фирмы АВВ Оу, <http://www.abb.com/marine>, 2002, 16 с.
9. Касатов В. А., Романовский В. В. Системы электродвижения для перспективных судов // Судостроение, 1999, №4, с. 35 – 37.
10. Пропульсивная система «Siemens-Schottel Propulsor» - наиболее эффективная гондола с движительным комплексом на современном рынке // Морской журнал, 1997, №3.
11. SRP Rudderpropeller / Интернетиздание фирмы Schottel, <http://www.Schottel.de>, 2008, 12 с.
12. Иванов А., Самсыгин В. Состояние и перспективы развития судовых ГЭУ / Морской флот 1999, №2, с. 23-24.

13. Григорьев А. В., Ляпидов К. С., Макаров Л. С. Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока // Судостроение, 2006, №4, с. 33 – 34.
14. Григорьев А. В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем // Судостроение, 2007, №3, с. 30 – 32.
15. Васин И. М., Григорьев А. В. Малое гидрографическое судно «Вайгач» // Судостроение, 2008, №1, с. 31 – 35.
16. Васин И. М., В. А. Хомяк, Григорьев А. В. Комплексный подход при создании судовых электроэнергетических систем и установок // Судостроение, 2008, №2, с. 30 – 31.
17. Sakari Sorsimo, Podded Solutions, доклад на конференции в Санкт-Петербурге 22.04.2004.
18. Полонский В.И. Гребные электрические установки. 1958 г.
19. Рукавишников С.Б. Автоматизированные гребные электрические установки. 1983 г.
20. Сержантов В.В., Спешилов В.С. Гребные электрические установки. Л., «Судостроение», 1970 г.
21. Сергиенко Л.И., Устинов А.П., Драгомарецкий Г.Г. Электрооборудование морских судов - М. Транспорт. 1980 г.
22. Акулов Ю.И. Гребные электрические установки - М. Транспорт. 1982 г.
23. Хайкин А.Б., Васильев В.Н., Полонский В.И. Автоматизированные гребные электрические установки – М. Транспорт. 1986 г.
24. Китаенко Г.И. Справочник судового электротехника. Том 2 – Л. Судостроение. 1980 г.
25. Григорьев А.В., Липидов К.С., Макаров Л.С. Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе

- системы электродвижения переменного тока // Судостроение. №4. 2006 г. С. 33-34.
26. Пашин В.М., Свиридов Г.М. Новые принципы построения мощных статических преобразователей гребных электрических установок // Судостроение. №2. 2007 г. С. 29-33.
  27. Лазаревский Н.А., Токарев Л.Н. Кто отвечает за судовую электротехническую систему в целом? // Судостроение. №2. 2006 г. С. 40-42.
  28. Григорьев А.В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем // Судостроение. №3. 2007 г. С. 30-32.
  29. Васин И.М., Хомяк В.А., Григорьев А.В. Комплексный подход при создании судовых электроэнергетических систем и установок // Судостроение. №2. 2008 г. С. 30-31.
  30. L. Leclere, C. Galmiche Converteam. A Transformerless Full Redundant Electrical Propulsion Solution to Enhance Power Density, A Vailability and Low Noise Signature / IEEE ESTS 2011, April, 10-13, 2011, Virginia, pp. 296-299.
  31. [http://www.siemens.no/ccmi/bu/ea/pdf/Marine\\_References.pdf](http://www.siemens.no/ccmi/bu/ea/pdf/Marine_References.pdf).
  32. Патент РФ №2436708, Судовая электроэнергетическая установка / Сеньков А. П., Васин И. М., Паперж Ю. Е., Токарев Л. Н., БИ 2011, №35.
  33. Патент № 6150731А / Integrated high frequency marine power distribution arrangement with a transformerless high voltage variable speed drive.
  34. Патент РФ № 2458819, Судовая электроэнергетическая установка / Васин И.М., Сеньков А.П., Токарев Л. Н., БИ 2012.
  35. Патент РФ № 2521883, Судовая электроэнергетическая установка / Калмыков А.Н., Кузнецов В. И., Сеньков А.П., БИ 2014.
  36. Патент РФ № 2529090, Судовая электроэнергетическая установка / Калмыков А.Н., Кузнецов В. И., Сеньков А.П., БИ 2014.

37. Материалы совещания по вопросам проектирования линейного дизельного ледокола // Морской флот, 2008, №6, с. 40-42.
38. Park R. H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. Tr. AIEE, 1930.
39. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими преобразователями (моделирование, расчет, применение). Под редакцией Крутякова Е.А. Санкт-Петербург, «Силовые машины» «Электросила», 2004 г. 252 с.
40. Айзенштадт Е. Б., Гилерович Ю. М., Горбунов Б. А., Сержантов В. В. Гребные электрические установки: Справочник. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л: Судостроение, 1985. – 304 с.
41. Вахмистров С.Н., Карзунов Р.А., Крутяков Е.А., Пармас Я.Ю., Терешонков В.А., Тимофеев А.В., Тимофеев Б.А., Харебов С.К. Электромашинно-вентильный преобразователь 3000В/3х230В системы электроснабжения собственных нужд электропоезда постоянного тока. Сб. «Электросила», 2002 г., №41.
42. Воронов Г. Г., Хуторецкий Г. М. Шестифазные турбогенераторы. Сб. «Электросила», Л. «Энергия», 1970, №28.
43. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. Учебное пособие для вузов. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
44. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник. М.: АСАДЕМА, 2006. – 265 с.
45. [http://www08.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/98a7ddd74d7ecb3bc1257b09004c14ab/\\$file/ABB%20Propulsion%20Products%20reference%20list%202013.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/98a7ddd74d7ecb3bc1257b09004c14ab/$file/ABB%20Propulsion%20Products%20reference%20list%202013.pdf).

## Приложение А

### Параметры моделей основных агрегатов ЕЭЭС в Matlab/Simulink

Параметры синхронного трехфазного генератора приведены на рисунке А.1.

3\*m-phases Synchronous Machine (mask) (link)  
 Implements a 3\*m-phase synchronous machine.  
 Press help for parameters, inputs and outputs description.

Parameters

Machine style: Generator

Rotor type: Salient-pole

Nom. power, L-L volt., freq. and field cur. [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A) ]:  
[2.25e006 400 50 ]

Stator [ Rs(ohm) L(H) Lmd(H) Lmq(H) ]:  
[1.68e-3 7.66e-5 1.133e-3 5.789e-4]

Number of 3-ph winding: 1

Display null point(s)

Field [ Rfd(ohm) Lfd(H) ]:  
[3.28e-4 1.815e-4]

Dampers [ Rkd1' Lkd1' Rkq1' Lkq1' ] (R=ohm,L=H):  
[0.02489 8.695e-4 2.893e-3 7.165e-5]

Number of additional damper circuits: 0

Inertia, friction factor and pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]:  
[33.01 0.63 2]

Init. cond. [ dw(%) th(deg) Vf(V) ]:  
[-99.9 0 0]

Simulate saturation

Display Vfd which produces nominal Vf

Sample time Ts (s):  
10e-6

Рисунок А.1 – Параметры генератора синхронного трехфазного

Параметры синхронного двухобмоточного генератора приведены на рисунке А.2.

Параметры асинхронного трехфазного гребного электродвигателя приведены на рисунке А.3.

3\*m-phases Synchronous Machine (mask) (link)  
 Implements a 3\*m-phase synchronous machine.  
 Press help for parameters, inputs and outputs description.

Parameters

Machine style:

Rotor type:

Nom. power, L-L volt., freq. and field cur. [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A) ]:

Stator [ Rs(ohm) L(H) Lmd(H) Lmq(H) ]:

Number of 3-ph winding:

Lsm (H):

Display null point(s)

Field [ Rfd'(ohm) Lfd'(H) ]:

Dampers [ Rkd1' Lkd1' Rkq1' Lkq1' ] (R=ohm,L=H):

Number of additional damper circuits:

Inertia, friction factor and pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]:

Init. cond. [ dw(%) th(deg) Vf(V) ]:

Simulate saturation

Display Vf<sub>d</sub> which produces nominal V<sub>T</sub>

Sample time Ts (s):

OK Cancel Help Apply

Рисунок А.2 – Параметры двухобмоточного генератора

Configuration Parameters Advanced

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz) ]:

Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Lls(H) ]:

Rotor resistance and inductance [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]:

Initial conditions

Simulate saturation

Saturation Parameters [ i1,i2,... (Arms) ; v1,v2,...(VrmsLL) ]

OK Cancel Help Apply

Рисунок А.3 – Параметры асинхронного трехфазного гребного электродвигателя

## Приложение Б

Одним из актуальных вопросов является повышение КПД гребного электродвигателя, входящего в ГЭУ. По ряду причин, на сегодняшний, наиболее широко в качестве ГЭД применяются асинхронный электродвигатель АД с короткозамкнутым ротором. Такое широкое распространение АД объясняется преимуществами перед другими видами электрических машин:

- простота конструкции;
- отсутствие скользящего контакта;
- высокая надежность;
- минимальные затраты на обслуживание.

Для регулирования частоты вращения АД используется частотный метод, при котором регулируется как значение напряжения, так и частота, поступающего на обмотки АД. Такой способ позволяет регулировать частоту вращения АД при высоком КПД, что актуально для электроприводов переменного тока на большие мощности.

С развитием полупроводниковой элементной базой и появлением транзисторов IGBT, позволило разработать судовой преобразователь напряжения, обеспечивающий высокое качество напряжения для нагрузки и минимальные искажения, вносимые в сеть. Современные преобразователи частоты (ПЧ) строятся по двухзвенной структуре. В таком ПЧ происходит двойное преобразование напряжения:

- из переменного в постоянное (выпрямитель);
- из постоянного в переменное (инвертор);

Для минимизации пульсаций напряжения, поступающего на АИН, в звено постоянного тока (ЗПТ) устанавливается емкостной фильтр.

На рисунке Б.1 представлен, двухуровневый трехфазный АИН, состоящий из шести IGBT-транзисторов и фильтрующего конденсатора. На рисунке 2 представлены графики напряжения и тока на АД при его питании от ПЧ на базе двухуровневого АИН. Из рисунка Б.2 следует, что выходное напряжение двухуровневого АИН, содержит два уровня напряжения – напряжение равное нулю и напряжение, поступающее на вход АИН.

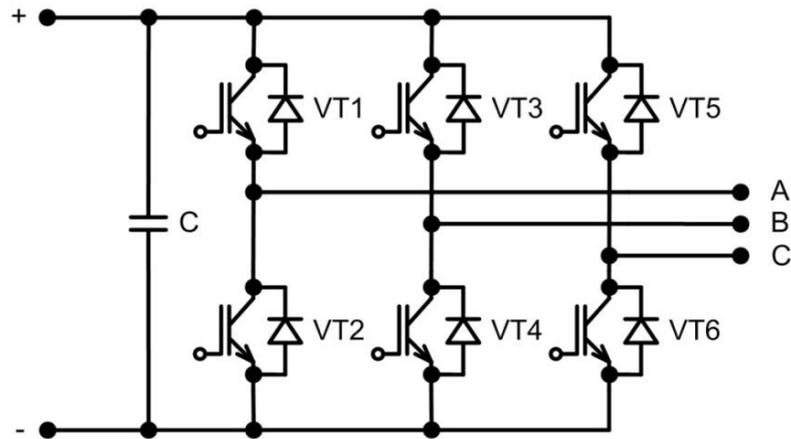


Рисунок Б.1 – Двухуровневый АИН

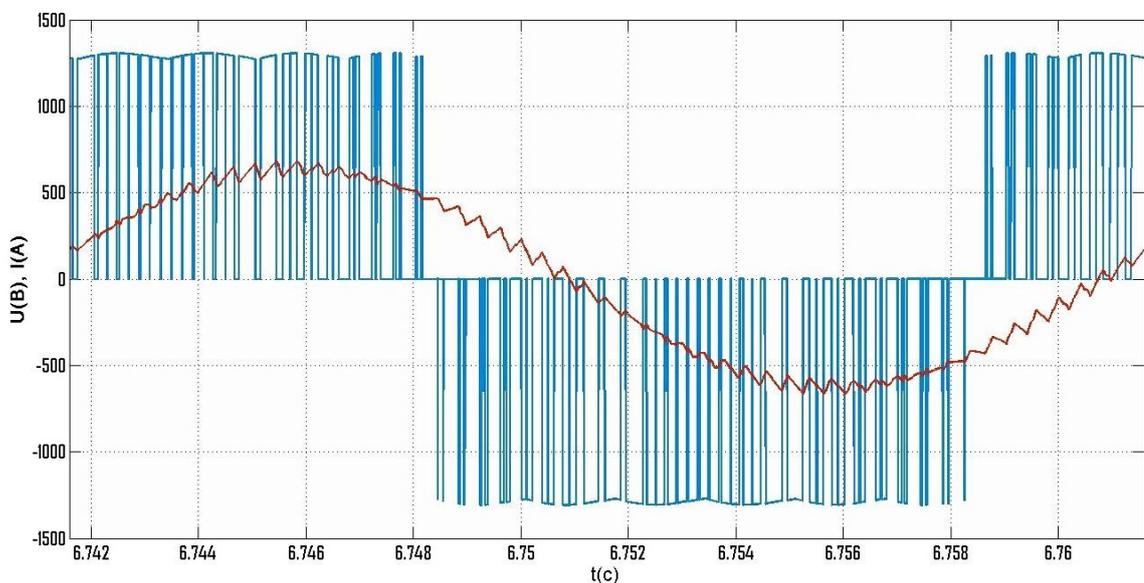


Рисунок Б.2 – Напряжение и ток на ГЭД при питании от 2-уровневого АИН

Применение 2-уровневого АИН с IGBT-транзисторами – обеспечивает хорошую форму тока в обмотках АД – близкую к синусоидальной. Однако, на больших мощностях, для повышения эффективности ГЭУ и снижения

затрат на расходы топлива при эксплуатации ГЭУ, требуется принимать дополнительные меры для повышения КПД ГЭД.

Для обеспечения большего КПД ГЭД применяются многоуровневые схемы, которые по сравнению с обычным 2-уровневым АИН, содержат большее количество силовых ключей и диодов, и требуют большее количество источников постоянного напряжения.

На рисунке Б.3 представлен трехуровневый трехфазный АИН. В инверторе, по рисунку Б.3, содержится 12 IGBT транзисторов и 6 диодов, а также две батареи конденсаторов C1 и C2. Трехуровневому АИН, по рисунку 3 требуется два изолированных источника постоянного напряжения.

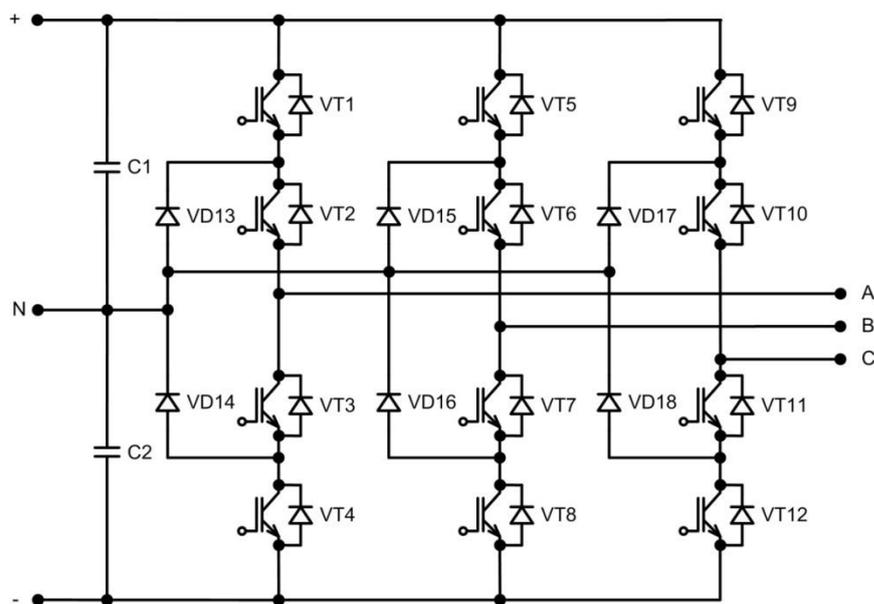


Рисунок Б.3 – Трехуровневый АИН

На рисунке Б.4 представлены графики напряжения и тока на АД при его питании от ПЧ на базе трехуровневого АИН. Из рисунка Б.4 следует, что выходное напряжение трехуровневого АИН, содержит три уровня напряжения – напряжение равное нулю, половина напряжения питания АИН, полное напряжения питания АИН.

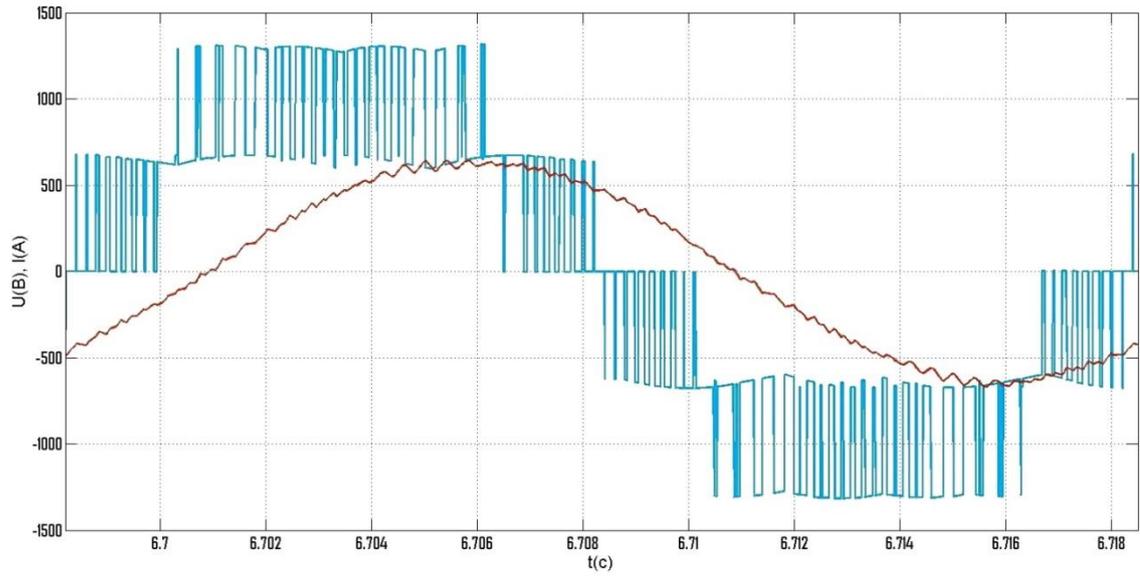


Рисунок Б.4 - Напряжение и ток на ГЭД при питании от 3-уровневого АИН

## Б.1 Моделирование ГЭУ переменного тока

### Б.1.1 Модель ГЭУ с ПЧ на базе 2-уровневого АИН

На рисунке Б.5 представлена модель электропривода переменного тока на базе двухуровневого АИН. Модель состоит из следующих блоков:

- Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 550 кВт (AD-550 kW);
- Трехфазного 2-уровневого автономного инвертора напряжения на IGBT транзисторах (IGBT Bridge);
- Системы управления шестью транзисторами (U/F-2L);
- Двух шестипульсных выпрямителей (6p1, 6p2);
- Двух изолированных источников переменного тока, напряжением 480 В и частотой 50 Гц, сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов.

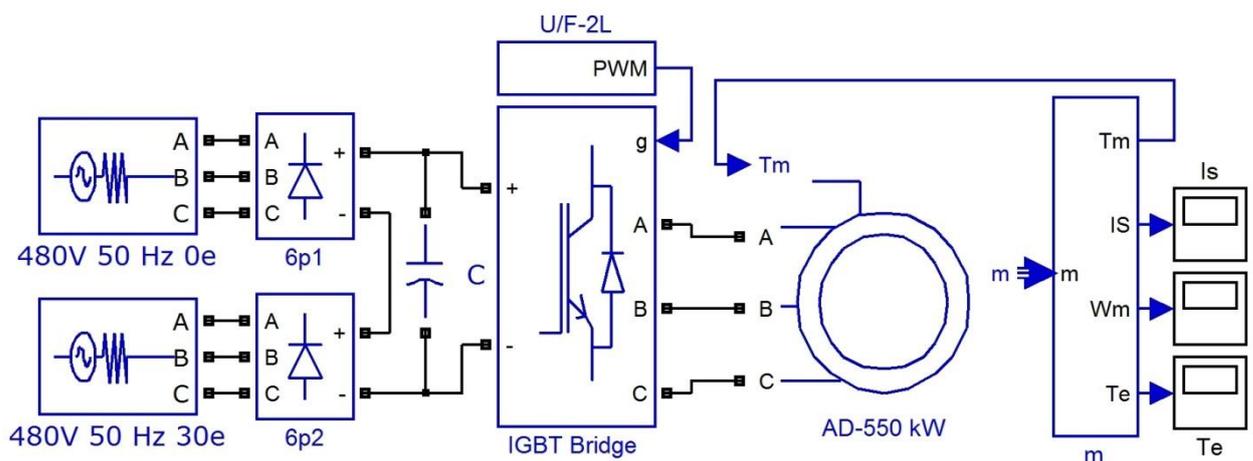


Рисунок Б.5 – Модель ГЭУ с ПЧ на базе 2-уровневого АИН

В модели по рисунку Б.5, оба источника переменного напряжения подключаются к входам шестипульсных выпрямителей 6p1 и 6p2. Выпрямители 6p1 и 6p2 соединяются последовательно, что позволяет

увеличить величину постоянного напряжения, поступающего на вход АИН. Одноименные напряжения двух источников переменного тока, имеют сдвиг фаз в 30 электрических градусов, что обеспечивает 12-пульсную схему выпрямления, что позволяет минимизировать пульсации у напряжения, поступающего на вход автономного инвертора напряжения.

Постоянное напряжение на входе АИН, посредством ШИМ, преобразуется в переменное напряжение на выходе, которое поступает на обмотки асинхронного ГЭД.

На рисунке Б.6 приведен гармонический состав тока в обмотке ГЭД.

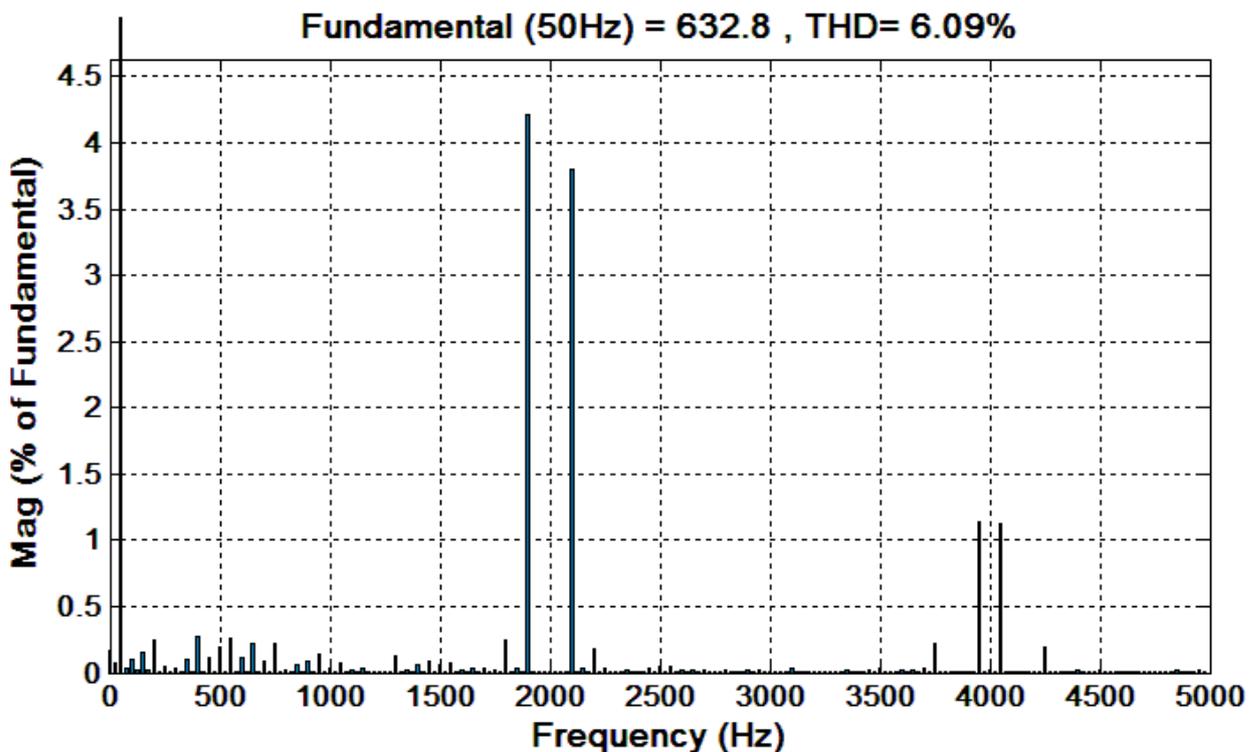


Рисунок Б.6 – Гармонический состав тока в обмотке ГЭД

Из рисунка Б.6 следует, что значение коэффициента гармоник тока в обмотке АД составляет 6,09%.

### Б.1.2 Модель ГЭУ с ПЧ на базе 3-уровневого АИН

На рисунке Б.7 представлена модель электропривода переменного тока на базе двухуровневого АИН. Модель состоит из следующих блоков:

- Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 550 кВт (AD-550 kW);
- Трехфазного 3-уровневого автономного инвертора напряжения на IGBT транзисторах (3 Level IGBT Bridge);
- Системы управления 12-ю транзисторами (U/F-3L);
- Двух шестипульсных выпрямителей (6р1, 6р2);
- Двух изолированных источников переменного тока, напряжением 480 В и частотой 50 Гц, сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов.

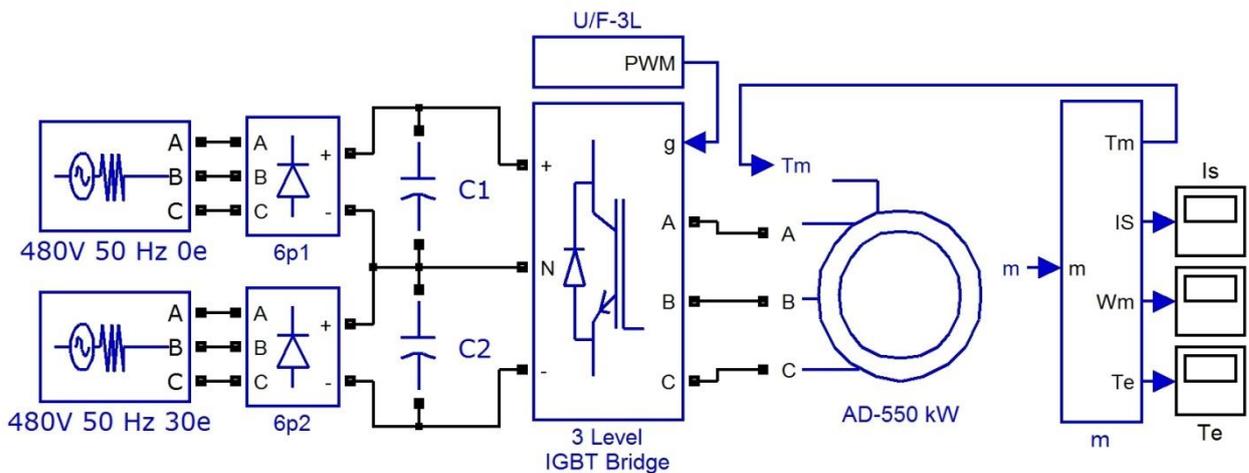


Рисунок Б.7 - Модель ГЭУ с ПЧ на базе 3-уровневого АИН

В модели по рисунку Б.7, оба источника переменного напряжения подключаются к входам шестипульсных выпрямителей 6р1 и 6р2. К выходам выпрямителей 6р1 и 6р2 подключаются емкостные фильтры С1 и С2. Каждый выпрямитель подключается к входам 3-уровневого АИН.

Таким образом, необходимые для работы 3-уровневого АИН два источника постоянного напряжения, обеспечивают шестипульсные выпрямители бр1, бр2. Одноименные напряжения двух источников переменного тока, имеют сдвиг фаз в 30 электрических градусов.

Постоянное напряжение на входе АИН, посредством ШИМ, преобразуется в переменное напряжение на выходе, которое поступает на обмотки асинхронного ГЭД.

На рисунке Б.8 приведен гармонический состав тока в обмотке ГЭД при его работе от ПЧ на базе 3-уровневого АИН.

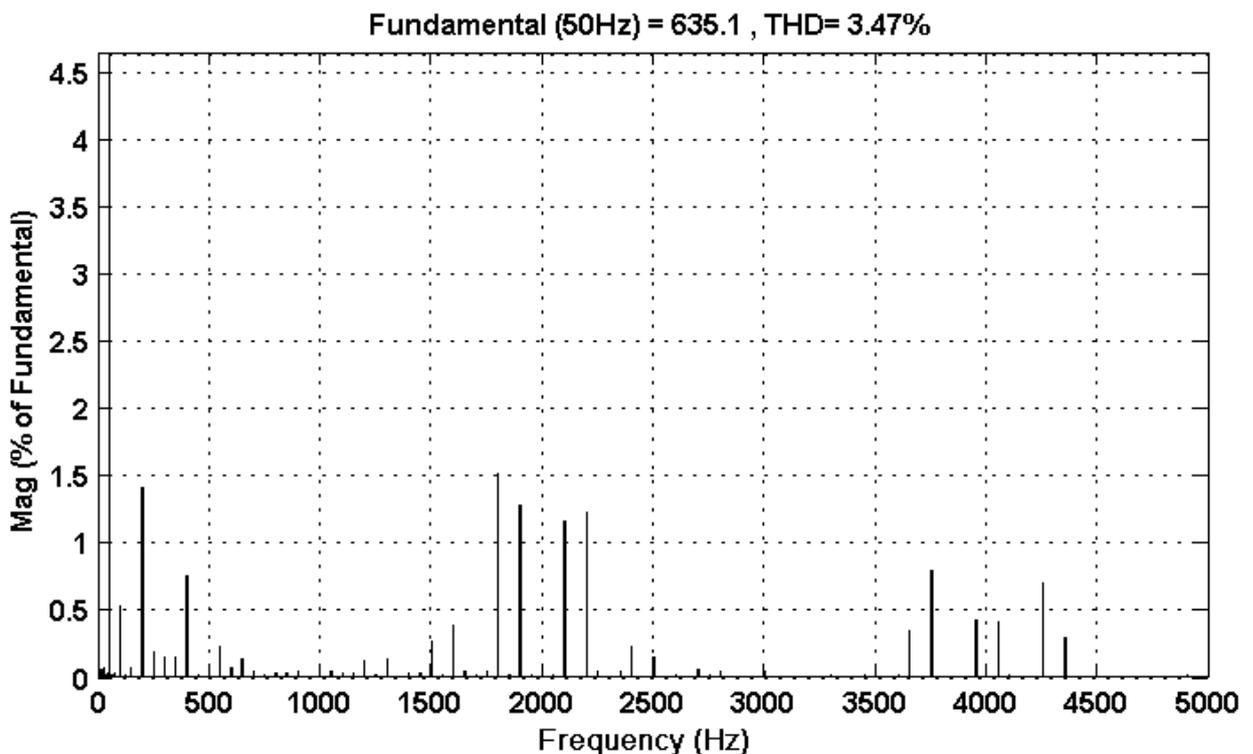


Рисунок Б.8 – Гармонический состав тока в обмотке ГЭД

Из рисунка Б.8 следует, что значение коэффициента гармоник тока в обмотке АД составляет 3,47%.

## Б.2 Влияние частоты коммутации на качество тока в АД

В таблице Б.1 указан коэффициент гармоник тока в фазе АД при его работе от 2-х уровневой и 3-уровневой автономных инверторов напряжения на различных частотах коммутации IGBT-транзисторов.

Таблица Б.1

Частота ШИМ, Гц	500	750	1000	1250	1500	1750
Число уровней АИН	Коэффициент гармоник $K_g$ , %.					
2	25,31	16,44	12,14	9,78	8,06	6,87
3	15,00	8,97	6,75	5,30	4,40	3,92

Продолжение таблицы Б.1

Частота ШИМ, Гц	2000	2250	2500	2750	3000	3250
Число уровней АИН	Коэффициент гармоник $K_g$ , %.					
2	6,09	5,38	4,90	4,47	4,04	3,91
3	3,46	3,21	2,99	2,90	2,68	2,60

Из таблицы Б.1 следует, что на всех частотах коммутации IGBT-транзисторов, качество тока в обмотке АД, существенно выше при его питании от ПЧ на базе 3-уровневой АИН.

## Приложение В

### В.1 Моделирование ПЧ на базе многоуровневых АИН

Для оценки качества тока в фазах асинхронного двигателя (АД) при различном числе уровней напряжения автономного инвертора напряжения, разработаны модели электропривода на базе 2-х, 3-х, 4-х, 5-и уровневых автономных инверторов напряжения.

На рисунке В.1 представлена модель электропривода на базе 2-уровневого АИН, который запитывается от одного источника постоянного тока напряжением 1500 В.

На рисунке В.2 представлена модель электропривода на базе 3-уровневого АИН, который запитывается от 2-х источников постоянного тока напряжением 750 В.

На рисунке В.3 представлена модель электропривода на базе 4-уровневого АИН, который запитывается от 3-х источников постоянного тока напряжением 500 В.

На рисунке В.4 представлена модель электропривода на базе 5-уровневого АИН, который запитывается от 4-х источников постоянного тока напряжением 375 В.

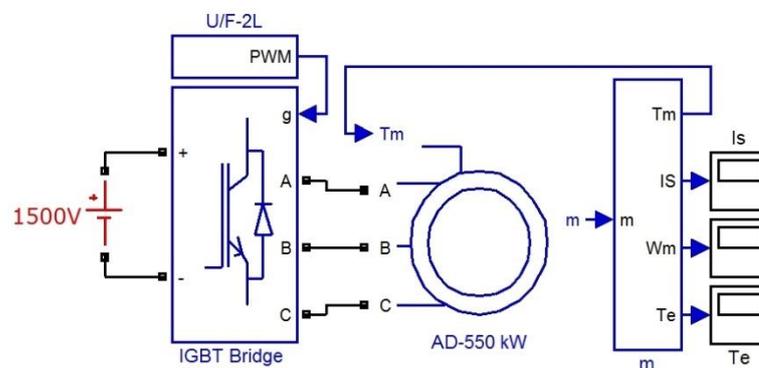


Рисунок В.1 – Модель с 2-х уровневый АИН (один источник ПТ)

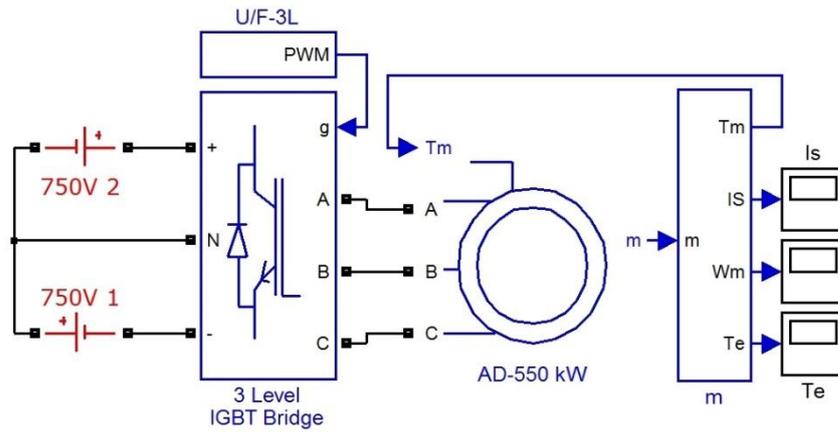


Рисунок В.2 – Модель с 3-х уровневый АИН (два источника ПТ)

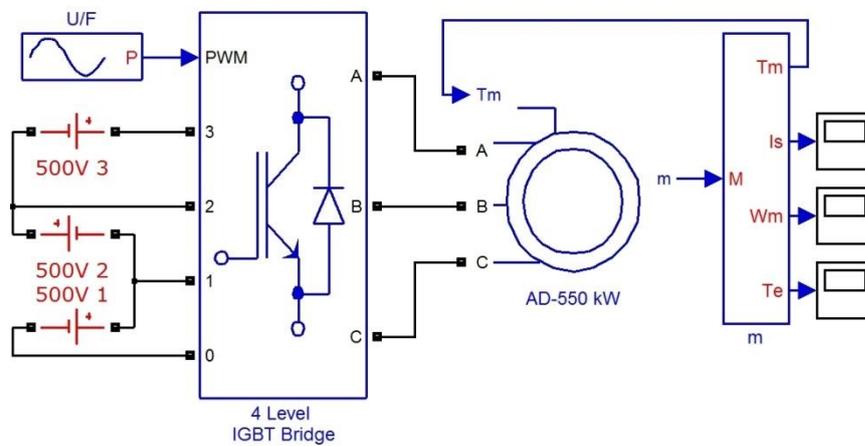


Рисунок В.3 – Модель с 4-х уровневый АИН (три источника ПТ)

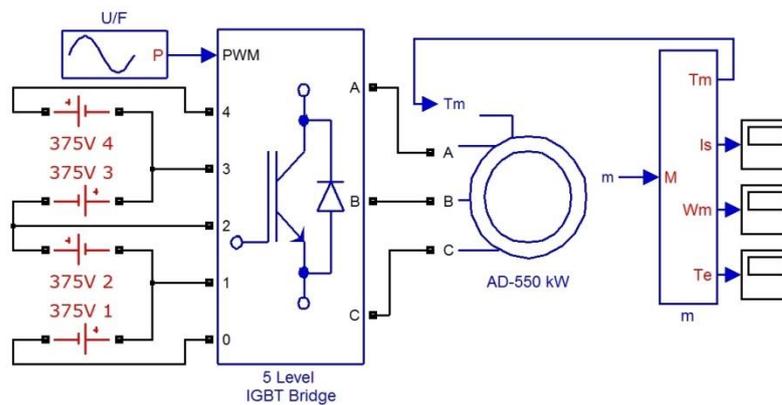


Рисунок В.4 – Модель с 5-х уровневый АИН (четыре источника ПТ)

## В.2 Влияние числа уровней напряжения АИН и частоты коммутации транзисторов на качество тока в АД

В таблице В.1 указан коэффициент гармоник тока в фазе АД при его работе от 2-х, 3-х, 4-х, 5-и уровневого автономных инверторов напряжения при их питании от идеальных источников постоянного тока на различных частотах коммутации IGBT-транзисторов.

Таблица В.1

Частота ШИМ, Гц	500	750	1000	1250	1500	1750
Число уровней АИН	Коэффициент гармоник $K_2$ , %.					
2	32.20	22.01	16.40	13.22	10.88	9.28
3	19.36	11.49	8.37	6.62	5.33	4.64
4	27.72	11.15	7.77	5.75	4.74	4.26
5	19.76	15.98	6.73	4.54	3.75	3.01

Продолжение таблицы В.1

Частота ШИМ, Гц	2000	2250	2500	2750	3000	3250
Число уровней АИН	Коэффициент гармоник $K_2$ , %.					
2	8.22	7.26	6.62	6.03	5.43	5.28
3	4.03	3.54	3.24	3.03	2.65	2.50
4	4.00	3.56	3.28	3.17	3.09	3.04
5	2.59	2.24	1.98	1.80	1.65	1.51