

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения  
Кафедра «Энергетика»

Акзамова Асем Мэлскызы

«Исследование несинусоидальности СЭС судостроительного завода»

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

6B07101– «Энергетика»

Алматы 2023



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

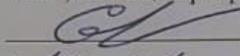
Институт энергетики и машиностроения  
Кафедра «Энергетика»

6B07101– "Энергетика"

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
«Энергетика»

PhD, ассоц. профессор

 Е.А.Сарсенбаев

«16» 01 2023г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение дипломной работы

Обучающейся Акзамовой Асем Мэлкызы

Тема: Исследование несинусоидальности СЭС судостроительного завода

Утверждена приказом проректора Приказ № 434-8 от 15.03.2023г

Срок сдачи законченной работы «29 июля» 2023г

Исходные данные к работе: Питание завода может быть осуществлено от ТЭЦ, на которой работают 4 турбогенератора по 100 МВА с АРН. Генераторы работают параллельно. Напряжение 10,5кВ. На ТЭЦ имеется повысительная подстанция с двумя трансформаторами мощностью 25 МВА напряжением 10,5/115кВ. Расстояние от ТЭЦ до завода 6,5 км. Завод работает в две смены, а насосная станция- круглосуточно.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) расчет электрических нагрузок цехов;
- б) распределение трансформаторов по ТП;
- в) технико-экономический расчет;
- г) выбор защитного оборудования
- д) расчет коэффициентов несимметрии и несинусоидальности
- е) выбор фильтро-компенсирующего устройства

Перечень графического материала: представлены 8 слайдов презентации работы

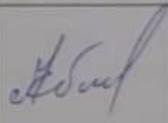
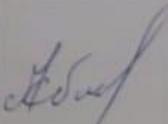
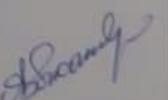
Рекомендуемая литература: из 10 наименований

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

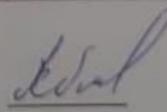
Наименования разделов, перечень рассматриваемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Основная часть	19.02.2023	—
Специальная часть	28.04.2023	—

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основной раздел	Р.Ш. Абибаева, магистр техн.наук, ст. преподаватель	20.03.2023	
Специальный Раздел	Р.Ш. Абибаева, магистр техн.наук, ст. преподаватель	04.05.2023	
Нормоконтроль	А.О. Бердибеков, магистр техн.наук, ст. преподаватель	29.05.2023	

Научный руководитель

  
(подпись)

Р.Ш. Абибаева

Задание приняла к исполнению обучающаяся

  
(подпись)

А.М. Акзамова

Дата

«18» 01 2023г.

## **АНДАТПА**

Дипломдық жоба "Кеме жасау зауытын энергиямен жабдықтау жүйесінің синусоидалығын зерттеу" тақырыбында орындалды. Жобаның негізгі бөлігі реттелген диаграммалар әдісімен 0,4/10 кВ кернеуге арналған цехтардың электр жүктемелерін есептеу, трансформаторлар санын есептеу және оларды трансформаторлық қосалқы станция бойынша бөлу, электр энергиясының шығынын есептеу және қорғаныс жабдықтарын таңдаудан тұрады.

Экономикалық бөлім кеме жасау зауытын сыртқы электрмен жабдықтаудың тиімділігін бағалауды білдіреді.

Арнайы бөлімде симметрия мен синусоидалдық емес коэффициенттер есептелді, сүзгі-компенсаторлық құрылғы таңдалды, содан кейін синусоидалдық емес коэффициент қайта есептелді.

## **АННОТАЦИЯ**

Тема данной дипломной работы "Исследование несинусоидальности СЭС судостроительного завода". Основная часть проекта состоит из расчет электрических нагрузок цехов на напряжение 0,4/10 кВ методом упорядоченных диаграмм, расчета числа трансформаторов и их распределения по трансформаторным подстанциям, расчета потерь электроэнергии и выбора защитного оборудования.

Экономическая часть подразумевает оценку эффективности внешней электроснабжения судостроительного завода.

В специальной части был произведен расчет коэффициентов несимметрии и несинусоидальности, выбор фильтро-компенсирующего устройства, далее был произведен пересчет коэффициента несинусоидальности.

## **ANNOTATION**

The thesis was carried out on the topic "Investigation of non-sinusoidality of the shipbuilding plant's power supply system". The main part of the project consists of calculating the electrical loads of workshops at a voltage of 0.4/10 kV by the method of ordered diagrams, calculating the number of transformers and their distribution across transformer substations, calculating electricity losses and selecting protective equipment.

The economic part implies an assessment of the efficiency of the external power supply of the shipbuilding plant.

In a third part, the coefficients of asymmetry and non-sinusoidality were calculated, a filter-compensating device was selected, and then the coefficient of non-sinusoidality was recalculated.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Сведения об электрических нагрузках по цехам завода	8
1.2	Расчет нагрузок по заводу	9
1.2.1	Расчет электрических нагрузок по заводу	9
1.2.2	Расчет осветительной нагрузки.	9
1.2.3	Расчет картограммы электрических нагрузок	10
1.3	Выбор числа цеховых трансформаторов	11
1.4	Компенсация реактивной мощности на напряжение 0,4 кВ	12
1.4.1	Выбор мощности батарей конденсаторов.	12
1.5	Распределение нагрузок цехов по ТП	15
1.6	Распределение НБК пропорционально реактивным нагрузкам ТП	16
1.7	Расчет электрических нагрузок на шинах 6 кВ	18
1.7.1	Определение потерь мощности в цеховых трансформаторах	18
1.8	Определение расчетных мощностей синхронных двигателей	19
1.9	Определение расчетных мощностей ДСП	19
1.10	Расчет компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ ГПП.	20
2	Технико-экономический расчет	22
2.1	ТЭО первого варианта энергоснабжения	22
2.2.1	Выбор оборудования на $U=110$ кВ	24
2.2	Расчет суммарных затрат первого варианта энергоснабжения	26
2.3	ТЭО второго варианта	27
2.3.1	Расчет суммарных затрат первого варианта энергоснабжения	30
2.4	Выбор разъединителя для первого варианта электроснабжения.	30
3	Выбор установок 10кВ.	32
3.1	Расчет токов короткого замыкания с учетом подпитки от СД	32
3.2	Выбор оборудования	34
3.3	Выбор шин на ГПП	36
3.4	Выбор изоляторов	37
4	Исследование несинусоидальности судостроительного завода	38
4.1	Расчет коэффициента несимметрии	38
4.2	Выбор ФКУ	45
4.3	Расчет коэффициента несинусоидальности до и после применения преобразователя	49
	Заключение	53
	Список используемой литературы	54

## ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение судостроительного завода — это процесс обеспечения завода электроэнергией, необходимой для работы производственного оборудования и осуществления всех технологических процессов. Чтобы осуществлять свою деятельность, судостроительный завод использует электрические машины, инструменты и электронное оборудование, а также освещение, системы безопасности и климатические установки. Поэтому надежное, стабильное и безопасное электроснабжение очень важно для успешной работы судостроительных предприятий. Кораблестроительное предприятие по степени бесперебойности электроснабжения причисляется к приёмникам второй категории.

В данной дипломной работе было исполнено планирование электроснабжения судостроительного завода, питание которого осуществляется от ТЭЦ. Был проведен расчет электро-нагрузок, освещения, подбор оптимального числа трансформаторов ЦТП, распределение расчетного числа трансформаторов на генеральном плане завода, определение реактивной мощности, выделяемой трансформаторами, синхронными двигателями и ДСП и другое.

Современные промышленные СЭС сталкиваются с рядом проблем, включая несинусоидальность напряжения, которая может привести к нежелательным эффектам, таким как снижение эффективности работы оборудования и повышение расходов на электроэнергию. Особенно это актуально для судостроительных заводов, где влияние несинусоидальных возмущений может быть критическим для безопасности работников и качества производства. В данном исследовании будет рассмотрено влияние несинусоидальности системы энергоснабжения на работу судостроительного завода, а также будут предложены средства для уменьшения подобных возмущений.

## 1 Сведения об электрических нагрузках по цехам завода

Питание завода может быть осуществлено от ТЭЦ, на которой работают 4 турбогенератора по 100 МВА с АРН. Генераторы работают параллельно. Напряжение 10,5 кВ. На ТЭЦ имеется повысительная подстанция с двумя трансформаторами мощностью 25 МВА напряжением 10,5/115кВ. Расстояние от ТЭЦ до завода 6,5 км. Завод работает в две смены, а насосная станция-круглосуточно.

Таблица 1 - Электрические нагрузки завода

Обознач. на схеме	Наименование	Кол-во электропри емников, п	Установ.мощность, кВт	
			Одного ЭП, P <sub>н</sub> , кВт	Общая, кВт
1	Механический цех	150	1-70	2800
2	Литейный цех: а) 0,4 кВ б) ДСП 12т	100 2	5-80	2100
3	Модельный цех	25	1-50	450
4	Малярный цех	30	2-20	280
5	Лесозавод	50	5-80	1250
6	Водо-насосная станция: А) 0,4 кВ б) СД 10 кв	10 4	5-20 2000	200 8000
7	Компрессорная станция	10	10-250	1400
8	Электромеханический цех	50	1-50	700
9	Кузнечнопрессовый цех	30	1-45	500
10	Заводоуправление, столовая	30	1-40	320
11	Котельная	50	1-100	500

## 1.2 Расчет нагрузок по заводу

### 1.2.1 Расчет электрических нагрузок по заводу

Расчет электрических нагрузок напряжением до 1 кВ по цехам завода производится с использованием метода упорядоченных диаграмм. Данный способ позволяет получить результаты не только силовых, но и осветительных нагрузок, изображенных в таблице 2 - "Расчет силовых нагрузок по цехам завода напряжением 0,4 кВ".

В порядок расчета и заполнения таблицы входит следующее:

1. В графе 1 проставляются номера цехов;
2. В графе 2 для каждого номера записывается наименование цеха и деления нагрузки на силовую и осветительную;
3. В графе 3 – количество рабочих электроприемников;
4. В графе 4 записывается минимальная и максимальная мощности ЭП цеха;
5. В 5 графе – суммарная установленная мощность ЭП для каждого цеха;
6. В графе 6 записывается число  $m$ , определяемое по формуле:
7. Графа 7 и 8 – значение коэффициента использования и мощности;
8. В графе 9 и 10 подсчитывается средняя активная и реактивная нагрузка за наиболее загруженную смену для каждого цеха по формуле:

$$P_{см} = K_{и} \times \Sigma P_{н}, \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

$$Q_{см} = P_{см} \times \text{tg} \varphi, \text{ кВАР}, \quad (1.2)$$

9. В графе 11 определяется искомое значение эффективного числа электроприемников;
10. В графе 13 и 14 – расчетные активная и реактивная нагрузки для каждого цеха, рассчитываемые по формулам:

$$P_p = P_{см} \times K_m, \text{ кВт}, \quad (1.3)$$

при  $n_э \leq 10$ ,  $Q_p = 1,1 \times Q_{см}$ , квар,

при  $n_э > 10$ ,  $Q_p = Q_{см}$ , квар.

11. Расчетная полная нагрузка цеха определяется по ниже приведенной формуле и записывается в графу 15:

$$S_p = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1.4)$$

### 1.2.2 Расчет осветительной нагрузки

Осветительная нагрузка относится к энергии, необходимой для освещения производственных площадей. Расчет осветительной нагрузки производится исходя из плотности осветительной нагрузки на каждый квадратный метр производственных помещений и учитывая коэффициент спроса, который может

отразить потребность в освещении различных зон или участков.

Однако в данной работе вместо этого было решено принять осветительную нагрузку равной 10% от общей мощности, используемой в каждом цехе. Это решение было принято в качестве альтернативного метода определения осветительной нагрузки без проведения подробных расчетов.

### 1.2.3 Расчет картограммы электрических нагрузок

Расчет электрических нагрузок напряжением до 1кВ по цехам завода производится по методу упорядоченных диаграмм. Результаты расчета силовых и осветительных нагрузок по цехам приведены в таблице 2.2 «Расчет силовых нагрузок по цехам завода напряжением 0,4 кВ».

Генплан завода с картограммой нагрузок каждого цеха изображен на рисунке1 «Генплан судостроительного завода». Для построения определяем:

$$R = \sqrt{\frac{P_p}{m * \pi}} \quad (1.5)$$

где  $m$  – масштаб определения площади круга

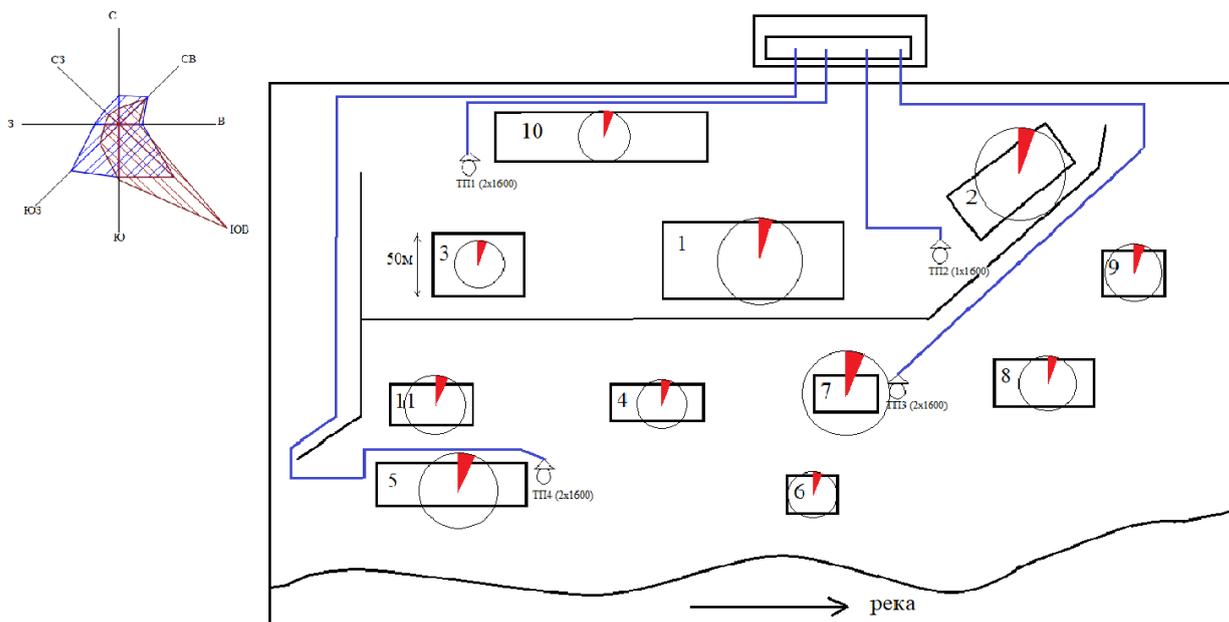


Рисунок 1 – Генплан судостроительного завода

### 1.3 Выбор числа цеховых трансформаторов

Правильное определение количества и мощности трансформаторов для цехов возможно только через технико-экономические расчеты, учитывая некоторые факторы: требуется надежность поставки электроэнергии; компенсация реактивной нагрузки; способность трансформаторов переносить временные перегрузки в нормальном и аварийном режимах; экономичные факторы.

Данные для расчета:

$$P_{p0,4}=7078 \text{ кВт};$$

$$Q_{p0,4}=5011 \text{ кВАР};$$

$$S_{p0,4}=8672,3 \text{ кВА}.$$

Судостроительный завод работает в две смены, следовательно входит во вторую категорию потребителей, тогда коэффициент загрузки трансформаторов равен  $K_{зтр}=0,7$ . Выбираем трансформатор с мощностью  $S_{нт}=1600$  кВА типа ТМ-1600-6/10.

Данные трансформатора ТМ-1600-6/10:

$$S_{нт}=1600 \text{ кВА}$$

$$U_1=6\text{кВ}, U_2=0,4\text{кВ}$$

$$U_{кз}=5,5\%, I_{хх}=1,3\%$$

$$P_{хх}=33\text{кВт}, P_{кз}=18\text{кВт}$$

Минимальное число трансформаторов, необходимое для питания наибольшей расчетной активной нагрузки, рассчитывается по формуле:

$$N_{min} = \frac{P_{0,4}}{K_3 * S_{нт}}, \quad (1.6)$$

где  $P_{p0,4}$  – суммарная расчетная активная нагрузка;  $K_3$  – коэффициент загрузки трансформатора;

$S_{нт}$  – принятая номинальная мощность трансформатора;

$\Delta N$  – добавка до ближайшего целого числа.

Экономически целесообразное число трансформаторов определяется по формуле:

$$N_{т.э} = N_{min} + m, \quad (1.7)$$

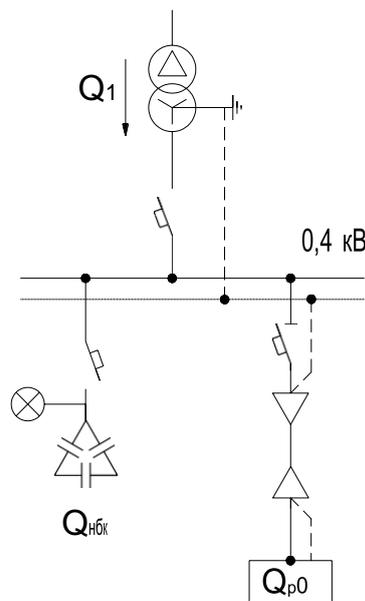
$$N_{т.э} = 7 + 0 = 7 \text{ трансформаторов}.$$

## 1.4 Компенсация реактивной мощности на напряжение 0,4 кВ

### 1.4.1 Выбор мощности батарей конденсаторов

Опираясь на число выбранных трансформаторов, определяем наибольшую реактивную мощность  $Q_1$ , которую будет рационально передать через трансформаторы в сети напряжением до 1 кВ:

$$Q_1 = \sqrt{(N_{ТЭ} \times S_{НТ} \times K_3)^2 - P^2}, \quad (1.8)$$



**Рисунок 2 – К выбору компенсации реактивной мощности на стороне 0,4кВ**

Расположение НБК на однолинейной схеме изображено на рисунке 2 «К выбору компенсации реактивной мощности на стороне 0,4кВ». Из условия баланс реактивной мощности на шинах 0,4 кВ определим величину  $Q_{НБК1}$ :

$$Q_{НБК1} + Q_1 = Q_{р0,4}, \quad (1.9)$$

$$Q_{НБК1} = Q_{р0,4} - Q_1, \quad (1.10)$$

$$Q_{НБК1} = 4811,4 - 3307,4 = 1504 \text{ квар.}$$

$Q_{НБК2}$  НБК для данной группы трансформаторов рассчитывается по формуле:

$$Q_{НБК2} = Q_{р0,4} - Q_{НБК1} - \gamma \times N_{ТЭ} \times S_{НТ}, \quad (1.11)$$

$$Q_{\text{нбк}2} = 4811,4 - 1504 - 0,3 * 7 * 1600 = -52,6 \text{ квар.}$$

где  $\gamma = 0,3$  – расчетный коэффициент;  $\gamma = f(K_1, K_2, \text{сх. питания ТП})$ ; Так как  $Q_{\text{нбк}2} < 0$ , то принимаю  $Q_{\text{нбк}2} = 0$ , отсюда следует, что

$$Q_{\text{нбк}} = Q_{\text{нбк}1} + Q_{\text{нбк}2}, \quad (1.12)$$

$$Q_{\text{нбк}} = 1504 + 0 = 1504 \text{ квар.}$$

Определим мощность одной из батарей конденсаторов, приходящуюся на каждый трансформатор

Выбираем НБК: УКБН-0,4-225-25УЗ.

**Таблица 2 - Расчет силовых нагрузок по цехам судостроительного завода, U = 0,4кВ**

№ цехов	Наименование цехов	Кол-во ЭП, п	Установленная мощность, кВт		m	Ки	cosφ/tgφ	Средние нагрузки		пэ	Км	Расчетные нагрузки		
			Rн min÷ Rн max	ΣPн				Rсм, кВт	Qсм, квар			Rр, кВт	Qр, квар	Sр, кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Механический цех а) силовая	150	1-70	2800	>3	0,35	0,75/0,88	980	862,4	80	1,1	1078	862,4	
	б) осветительная											107,8	86,2	
	Итого											1185,8	948,6	1519
2	Литейный цеха) силовая	100	5-80,	2100	>3	0,6	0,8/0,75	1260	945	53	1,1	1386	945	
	б) осветительная											138,6	94,5	
	Итого											1524,6	1039,5	1845,3
3	Модельный цеха) силовая	25	1-50,	450	>3	0,3	0,8/0,75	135	101,25	18	1,34	180,9	101,25	
	б) осветительная											18,1	10,1	
	Итого											199	111,4	
4	Малярный цеха) силовая	30	2-20,	280	>3	0,5	0,7/1,02	140	142,8	28	1,16	162,4	142,8	
	б) осветительная											16,2	14,3	
	Итого											178,6	157,1	238
5	Лесозавода) силовая	50	5-80,	1250	>3	0,45	0,75/0,88	562,5	495	32	1,16	652,5	495	
	б) осветительная											65,3	49,5	
	Итого											717,8	544,5	901
6	Водо-насосная станция) силовая	10	5-20,	200	>3	0,65	0,8/0,75	130	97,5	10	1,16	150,8	107,25	
	б) осветительная											15,1	10,7	

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Компрессорная станция а) силовая	10	10-250,	1400	>3	0,65	0,8/0,75	910	682,5	10	1,16	1055,6	750,75	
	б) осветительная											105,6	75,1	
	Итого											1161,2	826,6	1425
8	Электромеханический цех а) силовая	50	1-50,	700	>3	0,4	0,8/0,75	280	210	28	1,19	333,2	210	
	б) осветительная											33,3	21	
	Итого											366,5	231	433,2
9	Кузнечно-прессовый цех а) силовая	30	1-45,	500	>3	0,5	0,75/0,88	250	220	23	1,2	300	220	
	б) осветительная											30	22	
	Итого											330	242	409
10	Столовая а) силовая	30	1-40,	320	>3	0,5	0,9/0,48	160	76,8	16	1,23	196,8	76,8	
	б) осветительная											19,7	7,7	
	Итого											216,5	84,5	232,4
11	Котельная а) силовая	50	1-100,	500	>3	0,6	0,8/0,75	300	225	10	1,26	378	247,5	
	б) осветительная											37,8	24,8	
	Итого											415,8	270,3	496
	Освещение территории											546,2	437,4	
	<b>Итого на шинах 0,4 кВ</b>											<b>7078</b>	<b>5011</b>	<b>8672,3</b>

## 1.5 Распределение нагрузок цехов по ТП

Таблица 2 - “Распределение нагрузок цехов по ТП”, позволяет визуально представить, какая часть низковольтной нагрузки относится к каждой из шести трансформаторных подстанций на заводе. Это помогает в эффективном управлении и планировании электроснабжения цехов, основываясь на сгруппированных данных и распределении нагрузок.

**Таблица 2 - Распределение нагрузок цехов по ТП**

№ ТП	№ на схеме	$P_{P0,4}$ , кВт	$Q_{P0,4}$ , квар	$S_{P0,4}$ , кВА	$K_3$
1	2	3	4	5	6
ТП1 (2x1600)	1	1185,8	348,6		
ТП2 (1x1600)	2	1524,6	1039,5		
$S_H=4800$ кВА	3	199	111,4		
	10	216,5	84,5		
$Q_{НБК} = 3x225$ квар		3125,9	1584	3255,4	0,7
			-675		
		3125,9	909		
ТП3 (2x1600)	7	1161,2	826,55		
$S_H=3200$ кВА	8	366,5	231		
	9	330	242		
		1857,7	1299,2		
$Q_{НБК} = 2x225$ квар			-450		
		1857,7	849,2	2042,6	0,64
ТП4 (2x1600) $S_H=3200$ кВА	4	178,6	157,1		
	5	717,8	544,5		
	6	165,9	118,1		
	11	415,8	270,3		
Освещение территории		646,2	437,4		
$Q_{НБК} = 2x225$ квар		2124,3	1527,1	2381,8	0,74
			-450		
		2124,3	1077,1		

## 1.6 Распределение НБК пропорционально реактивным нагрузкам ТП

Исходные данные:

$$Q_{p0,4} = 5011 \text{ кВАР};$$

$$Q_{\text{нбк}} = 1504 \text{ кВАР}.$$

ТП1, ТП2:  $Q_{p \text{ ТП1,2,3}} = 1584 \text{ кВАР}$ ,  $Q_{p \text{ нбк ТП1,2}} = X$ ,

Тогда

$$Q_{p \leftrightarrow \text{нбк ТП3}} = \frac{Q_{\text{нбк}} * Q_{p \text{ ТП1,2}}}{Q_{p0,4}}, \quad (1.13)$$

$$Q_{p \leftrightarrow \text{нбк ТП1,2}} = \frac{1504 * 1584}{5011} = 475,4 \text{ квар}.$$

Тогда, фактическая реактивная мощность:  $Q_{\text{фТП1,2}} = 3 \times 225 = 675 \text{ квар}$ , а некомпенсированная мощность равна:

$$Q_{\text{неск}} = Q_{p \text{ ТП 1,2}} - Q_{\text{ф ТП1,2}}, \quad (1.14)$$

$$Q_{\text{неск}} = 1584 - 675 = 909 \text{ квар}.$$

ТП3:  $Q_{p \text{ ТП3}} = 1299,2 \text{ квар}$ ,  $Q_{p \text{ нбк ТП3}} = X$ , тогда

$$Q_{p \leftrightarrow \text{нбк ТП3}} = \frac{Q_{\text{нбк}} * Q_{p \text{ ТП3}}}{Q_{p0,4}}, \quad (1.15)$$

$$Q_{p \leftrightarrow \text{нбк ТП3}} = \frac{1504 * 1299,2}{5011} = 389,9 \text{ квар}.$$

Тогда, фактическая реактивная мощность:  $Q_{\text{фТП3}} = 2 \times 225 = 450 \text{ квар}$ , а некомпенсированная мощность равна:

$$Q_{\text{неск}} = Q_{p \text{ ТП3}} - Q_{\text{ф ТП3}}, \quad (1.16)$$

$$Q_{\text{неск}} = 1299,2 - 450 = 849,2 \text{ квар}.$$

ТП4:  $Q_{p \text{ ТП4}} = 1527,1 \text{ квар}$ ,  $Q_{p \text{ нбк ТП4}} = X$ .

Тогда

$$Q_{p \text{ нбк ТП4}} = \frac{Q_{\text{нбк}} * Q_{p \text{ ТП4}}}{Q_{p0,4}}, \quad (1.17)$$

$$Q_{p \leftrightarrow \text{нбк ТПЗ}} = \frac{1504 * 1527,1}{5011} = 458,3 \text{квар.}$$

Тогда, фактическая реактивная мощность:  $Q_{\text{фТП6}}=2 \times 225=450 \text{квар}$ , а некомпенсированная мощность равна:

$$Q_{\text{некк}} = Q_{p \text{ ТП4}} - Q_{\text{ф ТП4}}, \quad (1.18)$$

$$Q_{\text{некк}} = 1527,1 - 450 = 1077,1 \text{ квар.}$$

Расчетные и исходные данные по распределению  $Q_{\text{нбк}}$  по ТП сведем в таблицу 3.

**Таблица 3 – Уточненное распределение  $Q_{\text{нбк}}$  по ТП пропорционально  $Q_{p}$ .**

№ ТП	$Q_{p \text{ тп}}$ , квар	$Q_{p \text{ нбк тп}}$ , квар	$Q_{\text{ф.тп}}$ , квар	$Q_{\text{некк}}$ , квар
1	2	3	4	5
ТП 1, ТП 2	1584	475,4	675	909
ТП 3	1299,2	389,9	450	849,2
ТП4	1527,1	258,3	450	1077,1
Итого	4410,3	1123,6	1500	2835

Потери активной, реактивной мощностей, а также коэффициенты загрузки и число трансформаторов на ТП1, ТП2, ТП3 и ТП 4 указаны в таблице 4.

**Таблица 4 – Информация по ТП**

Трансформаторная подстанция	$K_3$	N	$P_T$ , кВт	$Q_T$ , квар
ТП1, ТП2	0,7	3	125,5	191,8
ТП3	0,64	2	102,8	113,7
ТП 4	0,74	2	103	138

Общие потери во всех трансформаторах:

$$\Sigma \Delta P_T = 125,5 + 102,8 + 103 = 331,3 \text{ кВт,}$$

$$\Sigma \Delta Q_T = 191,8 + 113,7 + 138 = 443,5 \text{ квар.}$$

## 1.7 Определение мощностей, используемых для расчета синхронных двигателей.

Выбран двигатель СДКП2-19-39-16. Требуемые данные:  $P_{н\ СД}=2000$  кВт;  $\cos\varphi=0,9$ ;  $N_{СД} = 4$ ;  $\kappa_3 = \beta = 0,8$ . Определим расчетные активные и реактивные мощности для СД:

$$P_{р\ СД} = P_{н\ СД} \times N_{СД} \times \kappa_3, \quad (1.19)$$

$$P_{р\ СД} = 2000 \times 4 \times 0,8 = 6400 \text{ кВт.}$$

$$Q_{р\ СД} = P_{р\ СД} \times \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.20)$$

$$Q_{р\ СД} = 6400 \times 0,48 = 3072 \text{ квар.}$$

## 1.8 Определение расчетных мощностей ДСП

Для электродуговой печи выбираем трансформатор ЭТЦПК-2500/10-74УЗ. Исходные данные:  $S_{н}=5555$  кВт,  $\cos \varphi = 0,82-0,88$ ,  $\kappa_3=0,6-0,75$ ,  $U_{вн}=6$ кВ,  $U_{нн}=318-120$  кВ. Определим расчетные активные и реактивные мощности для ДСП:

$$P_{р\ ДСП} = S_{н\ ДСП} \times N_{ДСП} \times \cos \varphi \times \kappa_3, \quad (1.21)$$

$$P_{р\ ДСП} = 5555 \times 2 \times 0,88 \times 0,75 = 8000 \text{ кВт.}$$

$$Q_{р\ ДСП} = P_{р\ ДСП} \times \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.22)$$

$$Q_{р\ ДСП} = 8000 \times 0,48 = 3840 \text{ квар.}$$

Определим потери в трансформаторах ДСП:

$$\Delta P_{тр\ ДСП} = 0,02 S_{н\ ДСП}, \quad (1.23)$$

$$\Delta P_{тр\ ДСП} = 0,02 \times 5555 = 111 \text{ кВт.}$$

$$\Delta Q_{тр\ ДСП} = 0,1 S_{н\ ДСП}, \quad (1.24)$$

$$\Delta Q_{тр\ ДСП} = 0,1 \times 5555 = 555,5 \text{ квар.}$$

## 1.9 Определение мощностей, используемых для расчета синхронных двигателей.

Выбран двигатель СДКП2-19-39-16. Требуемые данные:  $P_{н\ СД}=2000$  кВт;  $\cos\varphi=0,9$ ;  $N_{СД} = 4$ ;  $\kappa_3 = \beta = 0,8$ . Определим расчетные активные и реактивные мощности для СД:

$$P_{р\ СД} = P_{н\ СД} \times N_{СД} \times \kappa_3, \quad (1.25)$$

$$P_{р\ СД} = 2000 \times 4 \times 0,8 = 6400 \text{ кВт.}$$

$$Q_{р\ СД} = P_{р\ СД} \times \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.26)$$

$$Q_{р\ СД} = 6400 \times 0,48 = 3072 \text{ квар.}$$

## 1.10 Определение расчетных мощностей ДСП

Для электродуговой печи выбираем трансформатор ЭТЦПК-2500/10-74УЗ. Исходные данные:  $S_{н}=5555$  кВт,  $\cos \varphi = 0,82-0,88$ ,  $\kappa_3=0,6-0,75$ ,  $U_{вн}=6$ кВ,  $U_{нн}=318-120$  кВ. Определим расчетные активные и реактивные мощности для ДСП:

$$P_{р\ ДСП} = S_{н\ ДСП} \times N_{ДСП} \times \cos \varphi \times \kappa_3, \quad (1.27)$$

$$P_{р\ ДСП} = 5555 \times 2 \times 0,88 \times 0,75 = 8000 \text{ кВт.}$$

$$Q_{р\ ДСП} = P_{р\ ДСП} \times \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.28)$$

$$Q_{р\ ДСП} = 8000 \times 0,48 = 3840 \text{ квар.}$$

Определим потери в трансформаторах ДСП:

$$\Delta P_{тр\ ДСП} = 0,02 S_{н\ ДСП}, \quad (1.29)$$

$$\Delta P_{тр\ ДСП} = 0,02 \times 5555 = 111 \text{ кВт.}$$

$$\Delta Q_{тр\ ДСП} = 0,1 S_{н\ ДСП}, \quad (1.30)$$

$$\Delta Q_{тр\ ДСП} = 0,1 \times 5555 = 555,5 \text{ квар.}$$

## 1.11 Расчет компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ ГПП

Составляется уравнение баланса реактивной мощности на шинах 6 кВ относительно  $Q_{\text{ВБК}}$ . Компенсация реактивной мощности показана на рисунке 3 «Схема замещения к расчету  $Q_{\text{ВБК}}$ ».

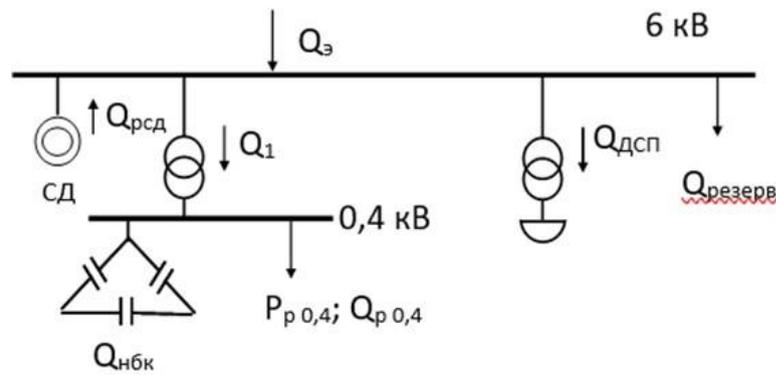


Рисунок 3 – Схема замещения к расчету  $Q_{\text{ВБК}}$

$$Q_{\text{ВБК}} = Q_{\text{р } 0,4} + Q_{\text{р ДСП}} + \Delta Q_{\text{тр ДСП}} + \Sigma \Delta Q_{\text{тр}} + Q_{\text{рез}} - Q_{\text{э}} - \Sigma Q_{\text{кДСП}} - Q_{\text{НБК}} - \Sigma Q_{\text{сд}}, \quad (1.31)$$

где  $Q_{\text{э}}$  - представляет собой входную реактивную мощность, которая определяется энергосистемой как наиболее экономически оптимальная реактивная мощность, которую можно передать предприятию во время пиковой нагрузки энергосистемы, определяется по формуле:

$$Q_{\text{э}} = 0,23 \times \Sigma P_{\text{р}} = 0,23 \times (P_{\text{р } 0,4} + \Delta P_{\text{т}} + P_{\text{р СД}} + P_{\text{р ДСП}} + \Delta P_{\text{тр ДСП}}), \quad (1.32)$$

$$Q_{\text{э}} = 0,23 \times (7108,2 + 331,3 + 6400 + 8000 + 111) = 5487,6 \text{ квар.}$$

$$Q_{\text{рез}} = 0,1 \times (Q_{\text{р } 0,4} + \Delta Q_{\text{т}} + \Delta Q_{\text{тр ДСП}} + Q_{\text{р ДСП}}), \quad (1.33)$$

$$Q_{\text{рез}} = 0,1 \times (4811,4 + 443,5 + 3480 + 555,5) = 929 \text{ квар.}$$

Тогда,  $Q_{\text{ВБК}} = 4811,4 + 443,5 + 3480 + 222 + 929 - 5487,6 - 1504 - 3072 = -177,7$  квар. Расчет силовой нагрузки судостроительного завода, включающий в себя расчет как низковольтной, так и высоковольтной нагрузки, потери энергии в трансформаторах ТП, также приведены расчетные мощности цехов и компрессорной станции, обозначены в таблице «Расчет уточненной мощности судостроительного завода».

**Таблица 5 - Расчет уточненной мощности судостроительного завода**

№ТП, Снт, QBK ТП	№ цеха	n	Pn min - Pn max	ΣPн	Ки	Средняя мощность		пэ	Км	Расчетные мощности			Кз	
						Рсм, кВт	Qсм, квар			Pr, кВт	Qp, квар	Sp, кВА		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
ТП1, ТП2 (3×1600 кВА)  Силовая: Освещение: QНБК Итого	1	150	1-.70	2800		980	862,4							
	2	100	5-80	2100		1260	945							
	3	25	1-50	450		135	101,25							
	10	30	1-40	320		160	76,8							
			305	1-80	5670	0,5	2535	1985,5	142	1,08	2737,8	1985,5		
										273,8	198,6			
										3011,6	1509	3368,5	0,7	
ТП3 (2×1600 кВА)  Силовая: Освещение: QНБК Итого	7	10	10-250	1400		910	682,5							
	8	50	1-50	700		280	210							
	9	30	1-50	500		250	220							
			90	1-250	2600	0,6	1440	1112,5	21	1,15	1656	1112,5		
											165,6	111,3		
										1821,6	773,8	1979	0,6	
ТП4 (2×1600 кВА)	4	30	2-20	280		140	142,8							
	5	50	5-80	1250		562,5	495							
	6	10	5-20	200		130	97,5							
	11	50	1-100	500		300	225							
Силовая: Освещение: Освещение территории QНБК		140	1-100	2230	0,5	1132,5	960,3	45	1,12	1268,4	960,3			
										126,8	96			
										646,2	437,4			
											-450			

Продолжение таблицы 5

Итого										2041,4	1043,7	2292,7	0,7
Итого на шинах 0,4 кВ										6847,6	3326,5		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΣΔP <sub>T</sub> , ΣΔQ <sub>T</sub>										331,3	443,5		
Нагрузка 0,4 кВ, прив-денная к шинам 6 кВ.										7178,9	3770		
Водо-насосная станция(СД)	6	4	2000	8000						6400	-3072		
Литейный цех (ДСП)	2	2	5000	10000						8000	3480		
ΣΔP <sub>T</sub> , ΣΔQ <sub>T</sub> (ДСП)										111	555		
<b>ВБК</b>													
<b>Всего по заводу</b>										21689,9	4733	22200	

## 2 Технико-экономический расчет

Энергоснабжение осуществлено с помощью ТЭЦ, где функционируют четыре турбогенератора по 100 МВА с автоматическим регулятором напряжения (АРН). Генераторы работают параллельно и обеспечивают напряжение 10,5 кВ. На ТЭЦ имеется повысительная подстанция с двумя трансформаторами мощностью 25 МВА и напряжением 10,5/115 кВ. Расстояние от энергосистемы до завода составляет 6,5 км. Завод функционирует в две смены.

Для технико-экономического сравнения вариантов электроснабжения завода рассмотрим два варианта:

- 1) I вариант – 110 кВ;
- 2) II вариант – ЛЭП 10,5 кВ;

### 2.1 Технико-экономический расчет первого варианта энергоснабжения.

Выбираем трансформаторы ГПП

$$S_{p.гпп} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.1)$$

$$S_{p.гпп} = \sqrt{21689,9^2 + 5487,6^2} = 22373,3 \text{ кВА},$$

$$S_{ном.тр} \geq S_{завода} \rightarrow 22480 \cdot 0,7 = 15736 \text{ кВА}.$$

Выбираем трансформатор типа ТРДН мощностью 16000 кВА. Паспортные данные трансформатора указаны в таблице 7.

$$k_3 = \frac{S_{p.гпп}}{2 \cdot S_{ном.тр}}, \quad (2.2)$$

$$k_3 = \frac{22373,3}{2 \cdot 16000} = 0,7.$$

Таблица 6 – Технические параметры трансформатора

Тип трансформатора	Напряжение, кВ		Потери, кВт		Напряжение кз, %	Ток хх, %
	ВН	НН	хх	кз		
ТДН-16000/110	115	11	18	85	10,5	0,7

Определим потери мощности в трансформаторах ГПП:

$$\Delta P_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot (\Delta P_{\text{хх}} \cdot \Delta P_{\text{кз}} \cdot K^2), \quad (2.3)$$

$$\Delta Q_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot \left( \frac{k_3 \cdot S_{\text{HT}}}{100} + \frac{U_{\text{кз}} \cdot S_{\text{HT}} \cdot k_3}{100} \right), \quad (2.4)$$

$$\Delta P_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot (18 + 85 \cdot 0,7^2) = 119, \text{кВ},$$

$$\Delta Q_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot \left( \frac{0,7 \cdot 16000}{100} + \frac{10,5 \cdot 16000 \cdot 0,7^2}{100} \right) = 1870,4 \text{ квар.}$$

Определим потери электрической энергии в трансформаторах ГПП:

$$\Delta W_{\text{т гпп}} = 2 \times (\Delta P_{\text{хх}} \times T_{\text{вкл}} + \tau \times \Delta P_{\text{кз}} \times K_3^2), \quad (2.5)$$

$$\Delta W_{\text{т гпп}} = 2 \cdot (18 \cdot 4000 + 2405 \cdot 85 \cdot 0,7^2) = 344 \text{ кВт ч.}$$

где  $T_{\text{вкл}}$  – число часов включения, для двухсменной работы  $T_{\text{вкл}} = 3500$ – $4500$  ч;  $\tau$  – это время, в течение которого происходят наибольшие потери энергии, и это время может быть связано с временными периодами, когда нагрузка достигает своего максимального значения:

$$r = \left( 0,124 + \frac{T_{\text{м}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760, \quad (2.6)$$

$$r = \left( 0,124 + \frac{4000}{10000} \right) = 2405.$$

где  $T_{\text{м}} = 4000$  ч. – число часов использования максимума; выбираем сечение проводов ЛЭП 110 кВ. Определим мощность, проходящую по ЛЭП:

$$S_{\text{лэп}} = \sqrt{(P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{тр.гпп}})^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

$$S_{\text{лэп}} = \sqrt{(21689,9 + 117,3)^2 + 5487,6^2} = 22480 \text{ кВ}$$

определим сечение по экономической плотности тока ( $j_{\text{э}}$ ):

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{н.сд}}}{j_{\text{экв}}} \quad (2.8)$$

$$F_{\text{э}} = \frac{118}{1,3} = 90,8 \text{ мм}^2$$

где  $j_{\text{эк}} = 1,3$  А/мм<sup>2</sup>- плотность тока для воздушных линий; так как для ВЛ 110 кВ минимальное сечение 95 мм<sup>2</sup>, то принимается провод марки АС

-95,  $I_{\text{доп}}=225\text{A}$ .

б) на нагрев рабочим током:

$I_{\text{доп.пров.}} > I_p$ , ( $225\text{ A} > 118\text{ A}$ )

в) по аварийному режиму:

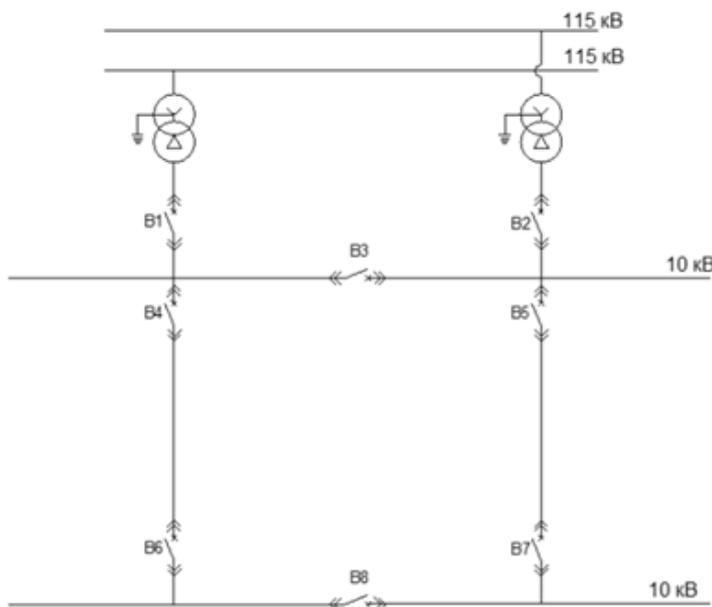
$1,3 * I_{\text{доп.пров.}} > I_{\text{ав.}}$  ( $292,5 > 236\text{ A}$ )

Окончательно принимаем провод марки АС-95,  $I_{\text{доп}} = 225\text{ A}$ . Определим потери электрической энергии в ЛЭП 10,5 кВ:

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}} = 2 * 3 * I_p^2 * \frac{r_0 * l}{2} * T_M, \quad (2.9)$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}}^{\Delta} = 2 * 3 * 118^2 * \frac{0,4 * 6,5}{2} * 2405 = 261200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

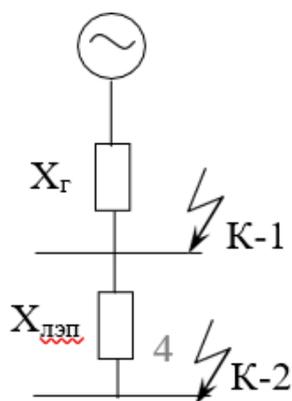
где  $R=r_0*L$ , Ом;  $r_0=0,4$  Ом/км - удельное активное сопротивление АС95; певыбором аппаратов составим схему замещения и рассчитаем токи кккороткого замыкания.



**Рисунок 4 – Схема электроснабжения для 1-го варианта внешнего энергоснабжения**

### 2.2.1 Выбор оборудования на $U=110\text{ кВ}$

Для выбора аппаратов составим схему замещения изображенную на рисунке 4 и рассчитаем токи короткого замыкания.



**Рисунок 5 - Схема замещения**

Определяем базисные токи, сопротивления системы, сопротивление ЛЭП:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{1,73 \cdot U_{\text{б}}} \quad (2.10)$$

$$X_{\text{r}} = 0,125 \cdot S_{\text{r}}$$

где  $I_{\text{б}} = 5,02$  кА,

X  
r

Определяем ток короткого замыкания в точке К-1 и К-2:

$$I_{\text{к-1}} = \frac{I_{\text{б}}}{x_{\text{с}}}, \quad (2.11)$$

$$I_{\text{к-2}} = \frac{I_{\text{б}}}{x_{\text{с}} + x_{\text{ЛЭП}}}, \quad (2.12)$$

$$I_{\text{к-1}} = \frac{5,02}{0,31} = 16 \text{ кА},$$

$$I_{\text{к-2}} = \frac{5,02}{0,31 + 0,2} = 9,8 \text{ кА}.$$

Определяем ударный ток в точке К-1:

$$i_{\text{уд}} = K_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{к-1}}, \quad (2.13)$$

$$i_{\text{уд}} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 16 = 40,7 \text{ кА}.$$

Мощность короткого замыкания:

$$S_{k-1} = \sqrt{3} \cdot I_{k-1} \cdot U_n, \quad (2.14)$$

$$S_{k-2} = \sqrt{3} \cdot I_{k-2} \cdot U_n, \quad (2.15)$$

$$S_{k-1} = 1,73 \cdot 16 \cdot 115 = 3187 \text{ МВА},$$

$$S_{k-2} = 1,73 \cdot 9,8 \cdot 115 = 1952 \text{ МВА}.$$

После расчета токов КЗ произведем выбор: выключателя ВГП-110 У1, согласно условиям:

$$U_{\text{НОМ.В}} \geq U_{\text{НОМ.С}} \quad 110 \geq 110$$

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ав}} \quad 2500 \geq 236 \text{ А}$$

$$I_{\text{откл}} \geq I_{\text{кз}} \quad 40 \text{ кА} \geq 16 \text{ кА}$$

$$I_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}} \quad 102 \geq 40,7 \text{ кА}$$

## 2.2 Расчет суммарных затрат первого варианта энергоснабжения

Капитальные затраты на выбранное оборудование, рассчитываются по формуле затраты натрансформаторы ГПП:

$$K_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot 125 = 250 \text{ млн.тг.} \quad (2.16)$$

Затраты на ЛЭП-110 кВ:

$$K_{\text{ЛЭП-110}} = 1 \times K_{\text{лэп}} = 6,5 \cdot 4 = 26 \text{ млн.тг.} \quad (2.17)$$

Затраты на выключатель ВГП-110 У1:

$$K_{\text{вгп}} = 5 \cdot 12 = 60 \text{ млн.тг.} \quad (2.18)$$

$$И = 0,063 \cdot 86 = 5,42 \text{ млн.тг.}$$

$$И_{\text{лэп}} = 0,028 \cdot 26 = 0,73 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{а}} = И + И_{\text{лэп}} = 5,42 + 0,73 = 6,15 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{экс}} = 1\% \cdot 86 = 0,86 \text{ млн. тг}$$

$$И_{\text{экс.лэп}} = 0,4\% \cdot 26 = 0,104 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{э}} = И_{\text{экс}} + И_{\text{экс.лэп}} = 0,86 + 0,104 = 0,964 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{пот}} = C_0(\Delta W_{\text{тр.гпп}} + \Delta W_{\text{лэп110}}) = 15 \cdot (344000 + 261200) = 9,078 \text{ млн.}$$

$$\sum И = Ип + Иэ + Иа = 16,2 \text{ млн тг.} \quad (2.19)$$

Суммарные затраты определяется по следующей формуле:

$$З = E \cdot \sum К + \sum И, \quad (2.20)$$

$$З = 0,12 \cdot 336 + 9.078 = 49,4 \text{ млн тг.}$$

### 2.3 Технико-экономический расчет второго варианта энергоснабжения

Выбираем трансформаторы ГПП

$$S_{р.гпп} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.21)$$

$$S_{р.гпп} = \sqrt{21689,9^2 + 5487,6^2} = 22373,3 \text{ кВА,}$$

$$S_{ном.тр} \geq S_{завода} \rightarrow 22480 \cdot 0,7 = 15736 \text{ кВА.}$$

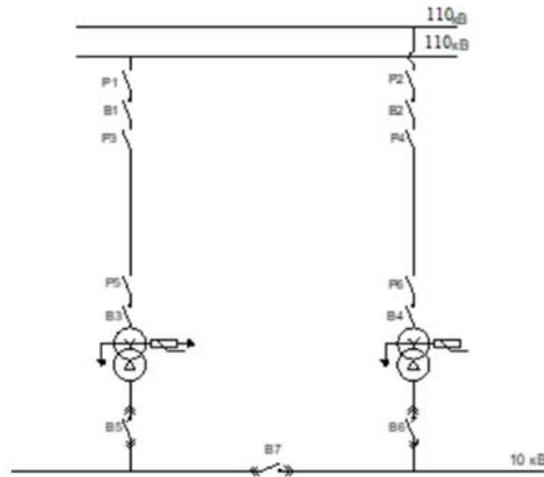
Выбираем трансформатор типа ТРДН мощностью 16000 кВА. Паспортные данные указаны в таблице 7

$$K_3 = \frac{S_{р.гпп}}{2 \cdot S_{ном.тр}}, \quad (2.22)$$

$$K_3 = \frac{22373,3}{2 \cdot 16000} = 0,7.$$

Таблица 7 – Технические параметры трансформатора

Тип трансформатора	Напряжение, кВ		Потери, кВт		Напряжение кз, %	Ток хх, %
	ВН	НН	хх	кз		
ТДН-16000/20	10,5	6,3	17	85	10	0,7



**Рисунок 6 – Схема электроснабжения для 2-го варианта внешнего электроснабжения**

Определим потери мощности в трансформаторах ГПП:

$$\Delta P_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot (\Delta P_{\text{хх}} \cdot \Delta P_{\text{кз}} \cdot K^2), \quad (2.23)$$

$$\Delta P_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot (17 + 85 \cdot 0,7^2) = 117,3 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{тр.гпп}} = 2 \cdot \left( \frac{0,7 \cdot 16000}{100} + \frac{10,5 \cdot 16000 \cdot 0,7^2}{100} \right) = 1804 \text{ квар.}$$

Определим потери электрической энергии в трансформаторах ГПП:

$$\Delta W_{\text{т гпп}} = 2 \times (\Delta P_{\text{хх}} \times T_{\text{вкл}} + \tau \times \Delta P_{\text{кз}} \times K^2), \text{ кВт ч}, \quad (2.24)$$

$$\Delta W_{\text{т гпп}} = 2 \cdot (17 \cdot 4000 + 2405 \cdot 85 \cdot 0,7^2) = 336 \text{ кВт ч.}$$

где  $T_{\text{вкл}}$  – число часов включения, для двухсменной работы  $T_{\text{вкл}} = 3500$ – $4500$  ч;  $\tau$  – это время, в течение которого происходят наибольшие потери энергии, и это время может быть связано с временными периодами, когда нагрузка достигает своего максимального значения. Мощность, проходящую по ЛЭП  $S_{\text{лэп}} = 22487$  кВА,  $I_{\text{р}} = 648,9$  А,  $I_{\text{ав}} = 1297,6$  А.

а) определим сечение по экономической плотности тока ( $j_{\text{э}}$ ):

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{н.сд}}}{j_{\text{экв}}} \quad (2.25)$$

$$F_{\text{э}} = \frac{118}{1,3} = 129,2 \text{ мм}^2$$

где  $j_{\text{эк}} = 1,3$  А/мм<sup>2</sup> – плотность тока для воздушных линий. Принимаем

стандартное ближайшее сечение  $F_3=630 \text{ мм}^2$ ,  $I_{\text{доп}}= 1026 \text{ А}$

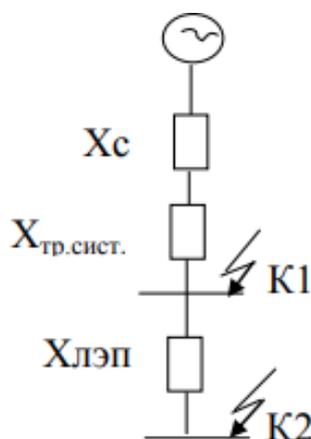
б) на нагрев рабочим током:

$$I_{\text{доп.пров.}} > I_p \quad 1026 \text{ А} > 648,9 \text{ А}$$

в) по аварийному режиму:

$$1,3 \times I_{\text{доп.пров.}} > I_{\text{ав}} \quad 1334 > 1297,8 \text{ А}$$

Окончательно принимаем провод марки АПвП-630,  $I_{\text{доп}}= 1026 \text{ А}$ .  
 Определим потери электрической энергии в ЛЭП 10,5 кВ. Перед выбором аппаратов составим схему замещения система электроснабжения (рис.5) и рассчитаем токи короткого замыкания.



**Рисунок 7 - Схема замещения системы электроснабжения**

Определяем базисные токи:

$$I_6 = \frac{S_6}{1,73 \cdot U_6} \quad (2.26)$$

$$I_6 = \frac{1000}{1,73 \cdot 0,5} = 54,9 \text{ кА.}$$

Сопротивление трансформатора системы  $X_{\text{тр.с}}=4,2 \text{ о.е.}$ , сопротивление ЛЭП  $X_{\text{лэп}}=8,4 \text{ о.е.}$ . Мощность короткого замыкания:

$$S_{k-1} = \sqrt{3} \cdot I_{k-1} \cdot U_H, \quad (2.27)$$

$$S_{k-2} = \sqrt{3} \cdot I_{k-2} \cdot U_H, \quad (2.28)$$

$$S_{k-1} = 1,73 \cdot 6,9 \cdot 37 = 442 \text{ МВА,}$$

$$S_{k-2} = 1,73 \cdot 2,02 \cdot 37 = 129,3 \text{ МВА.}$$

После расчета токов КЗ произведем выбор: выключателя VF12.16.31, согласно условиям:

$$\begin{aligned} I_{\text{ном}} &\geq I_{\text{ав}} & 1600 \text{ А} &\geq 1297,8 \text{ А} \\ I_{\text{откл}} &\geq I_{\text{кз}} & 31,5 \text{ кА} &\geq 12,2 \text{ кА} \\ I_{\text{дин}} &\geq i_{\text{уд}} & 40 \text{ кА} &\geq 31,1 \text{ кА} \end{aligned}$$

### 2.3.1 Расчет суммарных затрат первого варианта энергоснабжения

$$\sum K = K_{\text{тр.гпп}} + K_{\text{лэп110}} + K_{\text{вгп}} = 130 + 52 + 3,65 = 185,65 \text{ млн тг}$$

$$И = 0,063 \cdot 55,65 = 3,51 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{лэп}} = 0,028 \cdot 52 = 1,46 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{а}} = И + И_{\text{лэп}} = 4,97 \text{ млн.тг}$$

$$И_{\text{экс}} = 1\% \cdot 55,65 = 0,557$$

$$И_{\text{экс.лэп}} = 0,4\% \cdot 52 = 0,21$$

$$И_{\text{э}} = И_{\text{экс}} + И_{\text{экс.лэп}} = 0,757$$

$$И_{\text{пот}} = C_0(\Delta W_{\text{тр.гпп}} + \Delta W_{\text{лэп35}}) = 15 \cdot (336000 + 1532380) = 28 \text{ млн. тг}$$

$$\sum И = И_{\text{п}} + И_{\text{э}} + И_{\text{а}} = 33,727 \text{ млн тг.}$$

Суммарные затраты определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} Z &= E \cdot \sum K + \sum И, & (2.29) \\ Z &= 0,12 \cdot 185,65 + 33,727 = 56 \text{ млн тг.} \end{aligned}$$

## 2.4 Выбор разъединителя для первого варианта электроснабжения.

Таким образом, первый вариант электроснабжения выходит экономически и технически более выгодным, с общими затратами в 49,4 млн тенге при почти равных потерях со вторым вариантом. Тогда, производим выбор разъединителя для варианта с питанием посредством трансформаторов ТДН-16000/110.

$$\begin{aligned} U_{\text{ном}} &\geq U_{\text{ср}} & 110 \text{ кВ} &\geq 110 \text{ кВ} \\ I_{\text{н}} &\geq I_{\text{ав}} & 1000 \text{ А} &\geq 236 \text{ А} \\ I_{\text{скв.ампл}} &\geq i_{\text{уд}} & 80 \text{ кА} &\geq 40,7 \text{ кА} \\ I_{\text{терм.стойк}} &\geq I_{\text{кз}} & 31,5 \text{ кА} &\geq 16 \text{ кА} \end{aligned}$$

Выбираем разъединитель РНД32-СЛ-110/1000У1

### 3 Выбор установок 10кВ

#### 3.1 Расчет токов короткого замыкания с учетом подпитки от СД

Ток подпитки от синхронного двигателя. В судостроительном заводе установлено 4 синхронных двигателя типа СДКП-2-19-39-16 водо-насосной станции. Паспортные данные синхронного двигателя указаны в таблице 8.

**Таблица 8 - Характеристики синхронных двигателей**

ТИП	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	f, об/мин
СДКП-2-19-39-16	2000	10	375

Полная мощность СД:

$$S_{\text{н.сд}} = \frac{P_{\text{н.сд}}}{\cos\varphi} \quad (3.1)$$

$$S_{\text{н.сд}} = \frac{4 * 2000}{0.9} = 8888 \text{ кВА.}$$

Определяем расчетный ток СД:

$$I_{\text{р.сд}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi} \quad (3.2)$$

$$I_{\text{р.сд}} = 122,4 \text{ А.}$$

Выбираем марку и сечения кабеля к СД:

а) по экономической плотности тока

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{н.сд}}}{j_{\text{ЭКВ}}} \quad (3.3)$$

$$F_{\text{э}} = \frac{122,4}{1,3} = 94,2 \text{ мм}^2$$

б) по минимальному сечению

$$F_{\text{э.мин}} = \alpha \cdot I_{k-3} \cdot \sqrt{t_{\text{привед}}}} \quad (3.4)$$

$$F_{\text{э.мин}} = 12 \cdot 4,26 \cdot \sqrt{0,4} = 32 \text{ мм}^2.$$

Принимаем кабель маркой АПвПу 3х95 для СДКП-2-19-39-16  $I_{\text{доп}} = 233\text{А}$ .

Определяем ток короткого замыкания в точке К-3

$$I_6 = \frac{S_6}{1,73 \cdot U_6} \quad (3.5)$$

$$I_6 = \frac{1000}{1,73 \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}.$$

$$x_{\text{тр.гпп}} = \frac{U_{\text{кз}} \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{нт}}} \quad (3.6)$$

$$x_{\text{тр.гпп}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 16} = 6,25 \text{ Ом}.$$

$$I_{\text{К-3}} = \frac{I_6}{x_c \cdot x_{\text{лэп}} \cdot x_{\text{тр.с}}} \quad (3.7)$$

$$I_{\text{К-3}} = \frac{55}{0,31 \cdot 4,2 \cdot 8,4} = 4,26 \text{ кАю}$$

Тогда ток короткого замыкания от двигателей будет равен:

$$I_{\text{кз.сд}} = \frac{I_6 \cdot E_{\text{сд}}}{x_{\text{каб}} + x_{\text{сд}}} \quad (3.8)$$

$$I_{\text{кз.сд}} = \frac{55 \cdot 1,04}{37,8 + 0,024} = 1,5 \text{ кА}.$$

Суммарный ток КЗ в точке К-3 на 10 кВ с учетом подпитки от двигателейнасосной подстанции будет равен.

$$I_{\Sigma \text{кз}} = I_{\text{кз.сд}} + I_{\text{К-3}}, \quad (3.9)$$

$$i_{\text{уд}\Sigma \text{к}} = K_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\Sigma \text{кз}}, \quad (3.10)$$

$$S_{\Sigma \text{кз}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot I_{\Sigma \text{кз}}, \quad (3.11)$$

$$B_{\text{к}} = I_{\text{К-3}}^2 (t_{\text{откл}} + T_{\text{ампер}}), \quad (3.12)$$

$$I_{\Sigma \text{кз}} = 1,5 + 4,26 = 5,76 \text{ кА},$$

$$i_{\text{уд}\Sigma \text{к}} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 5,76 = 14,7 \text{ кА},$$

$$S_{\Sigma \text{кз}} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 5,76 = 104,8 \text{ МВА},$$

$$B_{\text{к}} = 4,26^2 (0,4 + 0,02) = 7,62.$$

## 3.2 Выбор оборудования

Определение тока

$$I_{p.d} = \frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (3.13)$$

$$I_{p.d} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 88,1 \text{ А.}$$

Выбираем марку и сечение кабеля для трансформатора

а) по экономической плотности тока:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{\text{н.сд}}}{j_{\text{экв}}} \quad (3.14)$$

$$F_{\text{э}} = \frac{88,1}{1,4} = 62,9 \text{ мм}^2$$

б) по минимальному сечению

$$F_{\text{э.мин}} = \alpha \cdot I_{k-3} \cdot \sqrt{t_{\text{привед}}} \quad (3.15)$$

$$F_{\text{э.мин}} = 12 \cdot 5,76 \cdot \sqrt{0,4} = 43,71 \text{ мм}^2.$$

Выбираем кабель АПвПу 3х70,  $I_{\text{доп}}$  196 А. Данные кабеля:  
 $r_0 = 0,268 \text{ Ом/км}$   $x_0 = 0,098 \text{ Ом/км}$ .

Произведем выбор выключателя типа ВБТЭ-10-31,5/630УЗ, согласно условиям:

$$\begin{aligned} U_{\text{ном.в}} &\geq U_{\text{ном.с}} & 10 &\geq 10 \\ I_{\text{ном}} &\geq I_{p.d} & 630 &\geq 88,1 \text{ А} \\ I_{\text{откл}} &\geq I_{\Sigma k3} & 31,5 \text{ кА} &\geq 5,76 \text{ кА} \\ I_{\text{терм}} &\geq B_k & 10,5 &\geq 7,62 \end{aligned}$$

**Таблица 9 - Электроизмерительные приборы подключенные к ТТ**

Прибор	Тип	Фаза А, ВА	Фаза В, ВА	Фаза С, ВА
А	Э-350	0,5	0,5	0,5
Wh	СА-И670	2,5	2,5	2,5
Varh	СР4-И68	2,5	2,5	2,5
W	Д-345	0,5	-	0,5
Var	Д-355	0,5	-	0,5
Итого		6,5	5,5	6,5

Измерительные приборы необходимые для ТТ указаны в таблице 9. Сопротивление, возникающее во вторичной нагрузке, включает в себя сопротивление устройств, проводов соединения и сопротивление, связанное с контактами переключения,  $r_{2.ном}=0,8$  Ом,  $r_{приб}=0,22$  Ом. Вторичная нагрузка  $r_2$  включает в себя сопротивления приборов ( $r_{приб}$ ) и переходного сопротивления контактов ( $r_{конт}$ ):

$$r_2 = r_{приб} + r_{пров} + r_{конт} \quad (3.16)$$

$$r_2 = 0,22 + 0,11 + 0,1 = 0,43 \text{ Ом.}$$

где,  $r_{пров} = 0,11$  Ом, выбираем провод типа АВВГ 3 x 2.5,  $F=2,5$  мм<sup>2</sup>.

Выбираем трансформатор тока типа ТОЛК-6, согласно условиям:

$$\begin{array}{ll} U_{ном.в} \geq U_{ном.с} & 10 \geq 10 \\ I_{ном} \geq I_{р.д} & 200 \geq 88,1 \text{ А} \\ I_{откл} \geq I_{\Sigma кз} & 40 \text{ кА} \geq 5,76 \text{ кА} \\ I_{терм} \geq B_k & 340 \geq 7,6 \\ z_{2н} \geq z_{2р} & 30 \geq 0,8 \end{array}$$

**Таблица 10 - Электроизмерительные приборы, подключенные к ТН**

Прибор	Тип	S <sub>об-ки</sub> , ВА	Числ об-к	sinj	P <sub>общ</sub> , Вт	Q <sub>s</sub> , вар
V	Э-335	3	1	0	3	-
W	Д-335	2.5	2	0.93	12	23
Var	И-335	2.5	2	0.94	12	23
Wh	СА3-И682	2	2	0.93	9	27
Varh	СР3-И669	2	2	0.93	9	27
Итого					46	100

Выбор трансформаторов напряжения. Измерительные приборы необходимые для ТН указаны в таблице 10. Расчетная вторичная нагрузка:

$$S_{2p} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3.17)$$

$$S_{2p} = \sqrt{45^2 + 100^2} = 110 \text{ ВА.}$$

Принимаем трансформатор напряжения типа НТМК-6-71У3, согласно условиям:

$$U_{\text{НОМ.В}} \geq U_{\text{НОМ.С}} \quad 10 \geq 10 \text{ кВ}$$

$$S_{\text{НОМ.2}} \geq S_{2.p.} \quad 120 \geq 110 \text{ ВА}$$

Выбираем ограничитель перенапряжения типа ОПН-П1-10П УХЛ1, согласно условиям.

$$U_{\text{НОМ.В}} \geq U_{\text{НОМ.С}} \quad 12 \text{ кВ} \geq 10 \text{ кВ}$$

### 3.3 Выбор шин на ГПП

Выбираем шину по разрешающему току

$$I_p = 88,1 \text{ А} \quad I_{\text{ав}} = 176,2 \text{ А}$$

Тогда, выбираем алюминиевую шину прямоугольного сечения 20\*3 мм<sup>2</sup>.  $I_{\text{доп}} = 215 \text{ А}$  ближайшее значение к аварийному току.

$$I_{\text{доп}} > I_{\text{ав}};$$
$$215 \text{ А} > 176,2 \text{ А};$$

Для определения  $\sigma_{\text{расч}}$  однополосных шин прямоугольного сечения необходимо:

а) вычисление наибольшей силу  $F$ , действующей на шины, во время протекания по ним ударного трехфазного тока короткого замыкания:

$$W = 0,17 \times n \times b \times h^2, \quad (3.18)$$

$$W = 0,17 \times 0,6 \times 8^2 = 6,53 \text{ см}^2.$$

где,  $n$ -количество полос на плите;

b-количество полос;  
h-высота шины.

### 3.4 Выбор изоляторов

ИЧ-80-4 ХЛЗ

Условия выбора:

- 1)  $U_n \geq U_{н.уст.}$ ;       $10,5 \text{ кВ} \geq 10,5 \text{ кВ.}$
- 2)  $F_{доп} \times 0,6 \geq F_{расч.}$ ;       $0,6 \times 400 = 240 \text{ Н} \geq 21,7 \text{ Н.}$
- 3)  $I_{нн} \geq I_{кз.}$ ;       $20 \text{ кА} \geq 5,76 \text{ кА.}$

Однолинейная схема судостроительного завода с указанием высоковольтного оборудования изображена на рисунке 17.

## 4 Исследование несинусоидальности судостроительного завода

Несинусоидальность напряжения — это отклонение напряжения от классической синусоидальной формы, которая характеризуется равномерным изменением амплитуды напряжения от нуля до максимума и обратно в течение времени. Такие отклонения могут быть вызваны различными факторами, включая неидеальности в работе оборудования или помехи на линии электропередачи. Несинусоидальное напряжение может не только снижать эффективность работы электрооборудования, но и приводить к повреждению или выходу из строя устройств. Пример не однофазной синусоиды напряжения изображен на рисунке 18.

Несколько методов могут быть применены для снижения несинусоидальности напряжения. Одним из них является создание СЭС, которая учитывает параметры, влияющие на несинусоидальность, или использование нелинейных нагрузок и устройств коррекции. Часто используются комбинации разных методов. Иногда минимально допустимая несинусоидальность может быть достигнута путем перераспределения нагрузки на секцию шин, присоединенную к реактору или трансформатору. В других случаях нагрузка может быть распределена по различным узлам Солнечной электростанции и подключена к ним параллельно электродвигатели. Однако, если на Солнечной электростанции используются нагрузки в виде ЭДСП и руднотермических печей, для их подключения необходимо использовать специальные корректирующие устройства, которые будут фильтровать высшие гармоники, чтобы избежать их выброса в сеть электроснабжения.

В данной работе будут применены 6-пульсные преобразователи, такие мостовые преобразователи одинаковой мощности можно объединять в пары, соединив обмотки трансформаторов в звезду и треугольник и создав аналогичный 12-пульсный режим, взаимно компенсирующий ВГ, присущие 12-пульсному преобразователю. Однако, если нагрузки различаются или управляющие импульсы несимметричны, то некоторые ВГ остаются некомпенсированными и создают неэффективный многопульсный режим. В специальных случаях, таких как прокатка стали используют трансформаторы со особыми обмотками, которые помогают достичь требуемой пульсации в электрооборудовании. В электролизном производстве же часто применяются многопульсные режимы.

### 4.1 Расчет коэффициента несимметрии

Первый шаг в исследовании несинусоидальности напряжения вызванного ДСП — это вычисление коэффициента несимметрии  $\varepsilon_2$  на шинах 10 кВ и 110 кВ схемы на рисунке 6. К стороне 10 кВ в узле 1 подключена ДСП мощностью  $2 \cdot 5000$  кВт,  $y_1 = 0.42$ ,  $\cos \varphi_1 = 0.85$ ,  $Q_{БК} = 1.5$  Мвар,  $y_2 = 1$ ,  $\cos \varphi_2 = 0$ ;

нагрузка мощности 22.2 МВА,  $y_3 = 5$ ,  $\cos\varphi_3 = 0.8$ . Во второй узле имеем нагрузку мощностью 12 МВА  $z_{2*} = 0.5 + j0.55$ . Мощность КЗ на шинах 110 кВ-1600 МВА. Ток обратной последовательности, обусловленный подключением в узле 1 однофазных печей электрошлакового переплава мощностью 5 МВА, равен  $I_{2*} = 1.5$ .

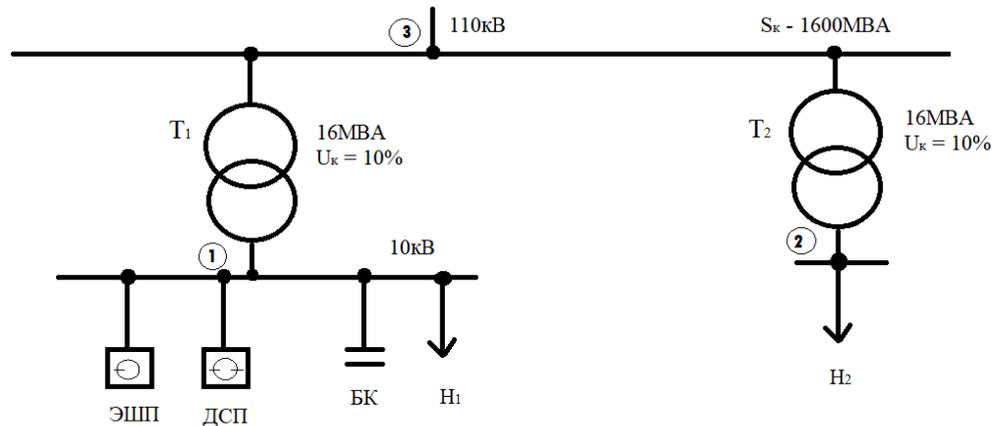


Рисунок 8 – Схема электроснабжения судостроительного завода

Решение:

- 1) Сопротивление обратной последовательности секции шин 10 кВ в узле 1:

$$z_2 = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}} \cos\varphi_1)^2 + (\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}} \sin\varphi_1)^2}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}} \gamma_1 \cos\varphi_1)^2 + (\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}} \gamma_1 \sin\varphi_1)^2}}, \quad (4.1)$$

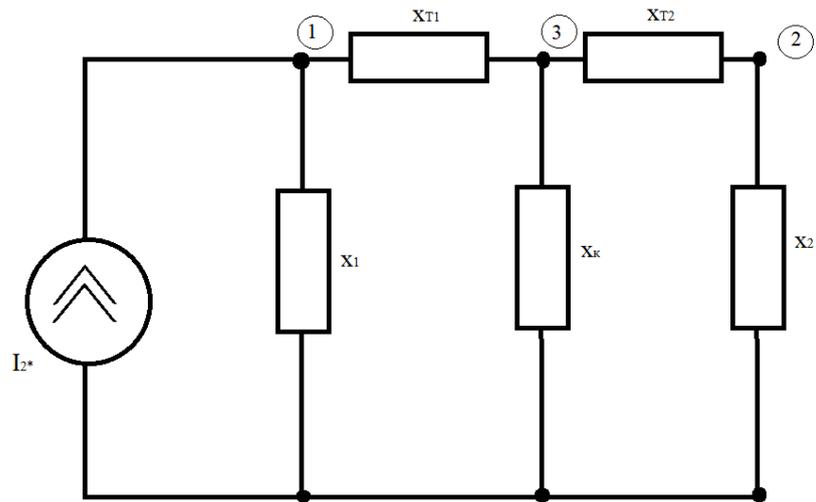
$$z_2 = \frac{\sqrt{(10 \cdot 0.85 + 22.2 \cdot 0.8^2)^2 + (10 \cdot 0.53 - 1.5 \cdot 1 + 22.2 \cdot 0.6^2)^2}}{\sqrt{(10 \cdot 0.85 \cdot 0.4 \cdot 2 + 22.2 \cdot 5)^2 + (10 \cdot 0.53 - 0.42 - 1.5 \cdot 1 + 22.2 \cdot 0.6 \cdot 5)^2}} = \frac{31.35}{114.3} = 0.27.$$

- 2) Аргумент сопротивления  $z_2$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3} S_{AB} + S_{BC}}{3 S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H, \quad (4.2)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{2.23}{3.57} = 31^\circ.$$

Так как сопротивление обратной последовательности на стороне 10 кВ в узле 1 равно  $z_{2*} = 0.14 + j0.37$ . Рассчитаем не симметрию величин напряжения в данной схеме с учетом только реактивных сопротивлений. На рисунке 7 изображена схема замещения обратной последовательности.



**Рисунок 9 – Схема замещения участка сети**

При базисной мощности  $S_6 = 9.28$  МВА сопротивление обратной последовательности шин 10 кВ в узле 1 в относительных единицах равно  $x_1 = 0.37$ .

3) Сопротивление трансформаторов

$$x_1 = 0.37$$

$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{U_k}{100} * \frac{S_6}{S_{НОМ}}, \quad (4.3)$$

$$x_{T1} = \frac{10 * 9.28}{100 * 16} = 0.058.$$

4) Сопротивление системы

$$x_k = \frac{S_6}{S_k} \quad (4.4)$$

$$x_k = \frac{9.28}{1600} = 0.0058.$$

5) Сопротивление обратной последовательности в узле 2

$$x_2 = 0.55 * \frac{S_6}{12}, \quad (4.5)$$

$$x_2 = 0.55 * \frac{9.28}{12} = 0.43.$$

6) Ток источника тока обратной последовательности

$$I_{2*} = 1.5 * \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_6}, \quad (4.6)$$

$$I_{2*} = 1.5 * \frac{22.2}{9.28} = 3.6.$$

Узел 1:

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности равно:

$$x_{2\epsilon} = \frac{x_1(x_{T1} + \frac{(x_{T2} + x_2)x_k}{x_{T2} + x_2 + x_k})}{x_1 + x_{T1} + \frac{(x_{T2} + x_2)x_k}{x_{T2} + x_2 + x_k}}, \quad (4.7)$$

$$x_{2\epsilon} = \frac{0.37(0.058 + \frac{(0.058 + 0.43)0.0058}{0.058 + 0.43 + 0.0058})}{0.37 + 0.058 + \frac{(0.058 + 0.43)0.0058}{0.058 + 0.43 + 0.0058}} = 0.054.$$

Коэффициент несимметрии вычисляется по формуле:

$$\epsilon_2 = x_2 I_{2*}, \quad (4.8)$$

$$\epsilon_2 = 0.054 * 3.6 = 0.19 = 19\%.$$

Узел 3:

Эквивалентное сопротивление обратной последовательности равно:

$$x_{2\epsilon} = \frac{(x_{T2} + x_2)x_k}{x_{T2} + x_2 + x_k}, \quad (4.9)$$

$$x_{2\epsilon} = \frac{(0.058 + 0.43)0.0058}{0.058 + 0.43 + 0.0058} = 0.0057.$$

Ток обратной последовательности в трансформаторе Т1 равен:

$$I_{2(T1)*} = I_{2*} * \frac{x_1}{x_1 + x_{T1} + \frac{(x_{T2} + x_2)x_k}{x_{T2} + x_2 + x_k}}, \quad (4.10)$$

$$I_{2(T1)*} = 3.6 * \frac{0.37}{0.43} = 3.2 \text{ A}.$$

Коэффициент обратной последовательности вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_2 = x_2 I_{2(T2)*}, \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_2 = 0.057 * 3.1 = 0.0176 = 1.76\%.$$

Узел 2:

Сопротивление обратной последовательности равно:

$$x_{2\epsilon} = x_2, \quad (4.12)$$

$$x_{2\epsilon} = 0.43.$$

Ток обратной последовательности в трансформаторе T2:

$$I_{2(T1)*} = I_{2*} * \frac{x_1}{x_1 + x_{T1} + \frac{(x_{T2} + x_2)x_k}{x_{T2} + x_2 + x_k}}, \quad (4.13)$$

$$I_{2(T1)*} = 3.1 * \frac{0.0058}{0.49} = 0.037 \text{ A.}$$

Коэффициент обратной последовательности:

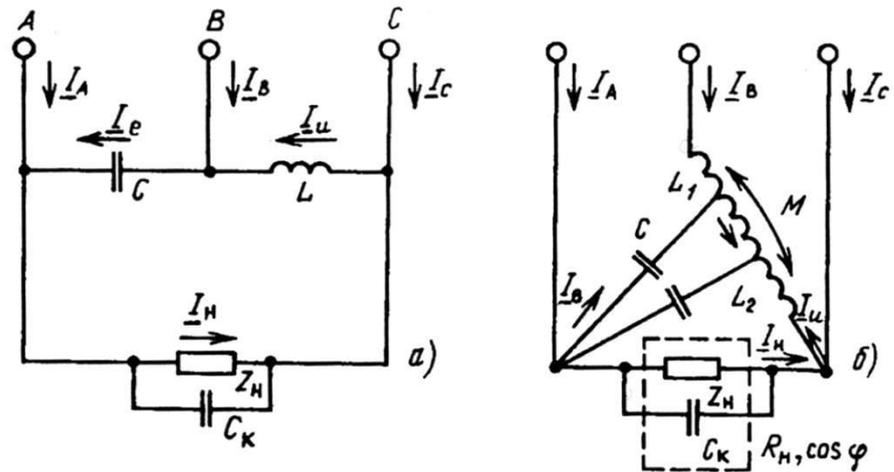
$$\varepsilon_2 = x_2 I_{2(T2)*}, \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_2 = 0.43 * 0.037 = 0.016 = 1.6\%.$$

**Таблица 11 – Нормы коэффициента несимметрии**

ГОСТ 13109-97	Норвегия/ NVE	КНР/GB/T
Коэффициент несимметрии напряжения		
2,0 %	2,0 %	2,0 %

Значение коэффициента несимметрии в первом узле превышает норму в 9 раз, согласно ГОСТ 13109–97 коэффициент несимметрии в нормальном режиме не должен превышать двух процентов. Причиной является то, что именно в узле 1 расположена дуго-сталеплавительная печь. Для стабилизации данного параметра требуется установка фильтро-симметрирующего устройства.



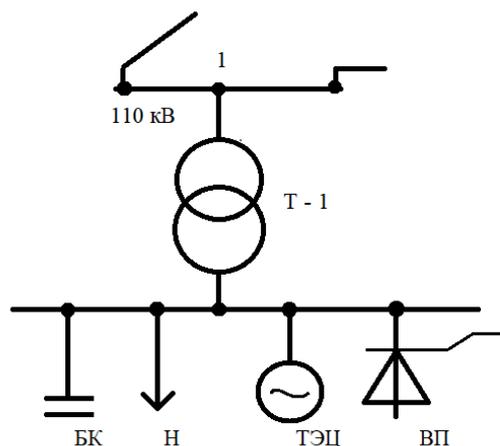
**Рисунок 10 – Симметрирующие устройства а) по схеме Штейнметца б) по схеме с реактором-делителем**

Для схемы, изображенной на рисунке 10, определим токи высших гармоник в ветвях сети, также определяем  $k_{нс}$  на шинах 10 кВ и 110 кВ.

Исходные данные: Узел 1: трансформатор 16 МВА, 115/10.5 кВ,  $U_k = 10.5 \%$ ,  $\Delta P_k = 85$  кВт, мощность ТЭЦ 50 МВА,  $x_d'' = 0.15$ ; мощность нагрузки 22.2 МВА; мощность БК 1.5 Мвар: Вп – 6-пульсный, мощностью, мощностью 10 МВА; фаза основной гармоники тока  $\varphi = 10^\circ$

Решение:

Схема замещения для  $v$ -й гармоники изображена на рисунке 8. Сопротивление элементов схемы замещения для основной гармоники в относительных единицах при  $S_6 = 100$  МВА. Узел 1 обозначен цифрой на схеме – рисунке 9.



**Рисунок 11 – Схема электроснабжения промышленных нагрузок, подключённых к узлам автономной электрической системы**

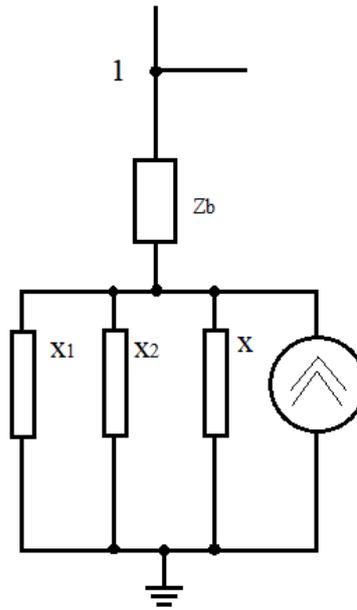


Рисунок 12 – Схема замещения для  $\nu$ -й гармоники

Тогда,

$$x_1 = \frac{S_6}{S_{6к}}, \quad (4.15)$$

$$x_1 = \frac{100}{1.5} = 66.6.$$

$$x_2 = x'' * \frac{S_6}{S_{НОМ}}, \quad (4.16)$$

$$x_2 = 0.35 * \frac{100}{22.2} = 1.58.$$

$$x_3 = x_d'' * \frac{S_6}{S_{НОМ}}, \quad (4.17)$$

$$x_3 = 0.15 * \frac{100}{400} = 0.04.$$

Ток гармоник для 6 – пульсных ВП,  $\nu = 5, 7, 11, 13$ :

$$I_{1\nu} = \frac{S_{ВП}}{S_6 \nu} (\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (4.18)$$

$$I_{2\nu} = \frac{0.25}{\nu} (\cos 10^\circ + j\sin 10^\circ) = \frac{0.15}{\nu} (\cos 20^\circ + j\sin 20^\circ) \quad (4.19)$$

$$I_{2\nu} = \frac{0.3}{\nu} (\cos 30^\circ + j\sin 30^\circ) \quad (4.20)$$

В таблице 12 указаны значения токов гармоник преобразователей в относительных единицах.

**Таблица 12 – Величины токов гармоник**

$\nu$	5	7	11
$I_{1\nu}$	0.05	0.036	0.023
$I_{2\nu}$	0.03	0.021	0.014
$I_{3\nu}$	0.00	0.000	0.027

## **4.2. Выбор ФКУ**

Одним из заключительных шагов является выбор фильтро-компенсирующего

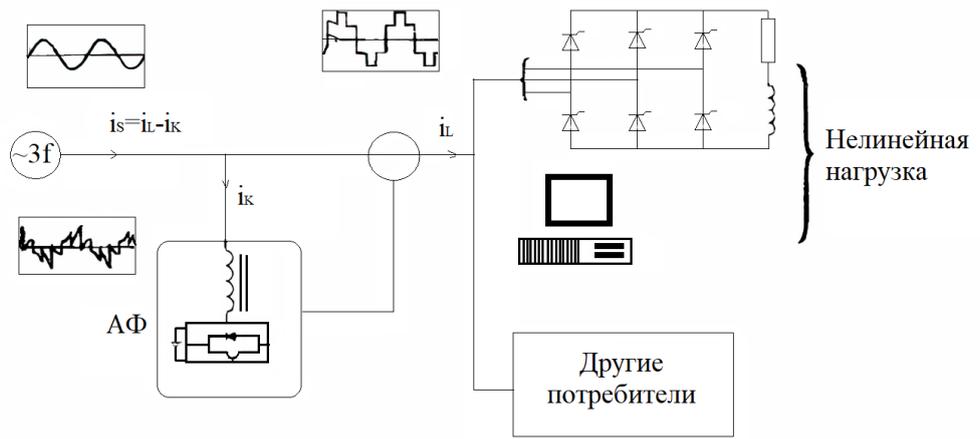
устройства для подстанции, питающей выработку электролиза.

Использование фильтро-компенсирующих устройств в СЭС показал, что эти они, хоть и имеют достоинствами, при использовании возникают некоторые недостатки, такие как большая установленная мощность, влияние амплитудно-частотных характеристик входного сопротивления на качество фильтрации и вероятность перегрузки и повреждения устройств. В прошлом искались решения, которые могли бы преодолеть эти неудобства, и применение активных и гибридных фильтров оказалось наиболее перспективным. Для понимания идеи активной фильтрации можно обратиться к схеме на рисунке 13.

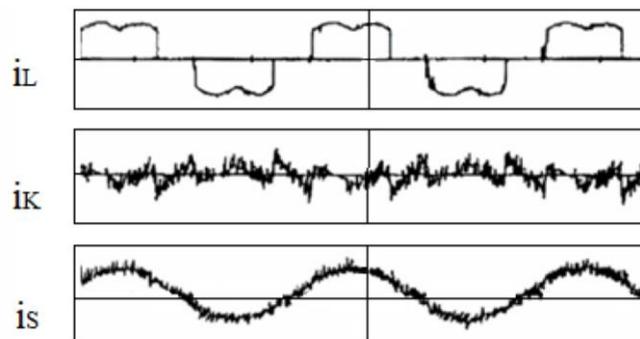
Согласно теории Фризе, активный фильтр (АФ) выполняет роль источника тока для компенсации нагрузки, возникающей от вредных гармонических составляющих и реактивных компонентов.

Для компенсации нагрузки от ВГ требуется использование управляющего устройства, которое не показано на схеме. АФ может быть подключен параллельно или последовательно к линии (рисунок 13). Для определения реактивных составляющих и нагрузки от ВГ тока, необходимо сначала определить активную мощность, потребляемую нагрузкой, а затем вычесть активную составляющую тока нагрузки. Таким образом, можно определить реактивные компоненты, которые требуется компенсировать с помощью активного фильтра.

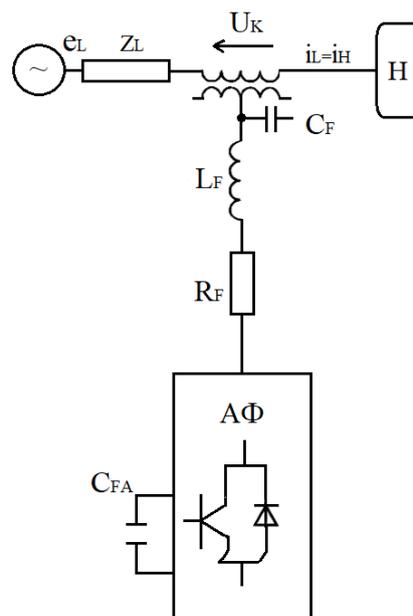
На рисунке 14 представлены осциллограммы токов, которые демонстрируют эффективность параллельного подключения активного фильтра в лабораторных условиях. Принципиальная схема последовательной компенсации и фильтрации показана на рисунке 15. Реальный активный фильтр изображен на рисунке 16.



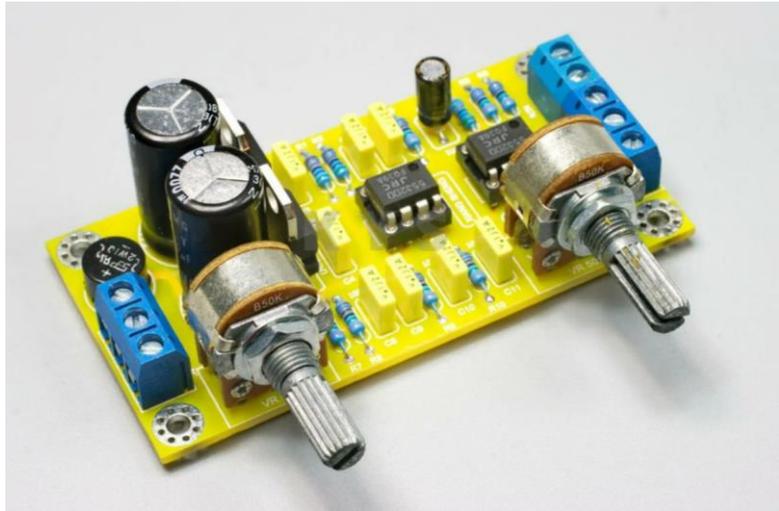
**Рисунок 13 – Структурная схема активного фильтра**



**Рисунок 14 – Осциллограмма токов, иллюстрирующие эффективность устройства параллельного активного фильтра**



**Рисунок 15 – Схема продольной системы компенсации и фильтрации с использованием активного фильтра**



**Рисунок 16 – Активный фильтр низких частот**

Исходные данные: мощность КЗ  $S_k = 3187$  МВА; мощность 6-пульсного преобразователя 10 МВА;  $U_{\text{НОМ}} = 10.5$  кВ; оптимальное значение РМ  $Q_0 = 4,7$  Мвар;  $U_{5*} = 5.8 \%$ ;  $U_{7*} = 4.3 \%$ ; Номинальное напряжение конденсаторов  $U_{\text{БК НОМ}} = 6.6$  кВ.

Решение:

Токи преобразователей ВГ равны:

$$I_5 = \frac{S_{\text{пр}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}} * n}, \quad (4.21)$$

$$I_5 = \frac{10000}{\sqrt{3} * 10.5 * 5} = 99.3 \text{ A},$$

$$I_7 = \frac{10000}{\sqrt{3} * 10.5 * 7} = 78.6 \text{ A}.$$

Мощность батарей конденсаторов будет равна оптимальному значению РМ:

$$k_p = \frac{Q_p}{S_k}, \quad (4.22)$$

$$k_p = \frac{4.7}{217} = 2.2 * 10^{-2}.$$

Вычисляем ток 7-й гармоники, протекающей через ФКУ:

$$\sigma_{v7} = \frac{1}{\frac{1}{k_p * v_p^2} (1 - (v_q)^2 + 1)}, \quad (4.23)$$

$$\sigma_{v7} = \frac{1}{\frac{1}{2.2 * 10^{-2} * 5^2} (1 - \left(\frac{5}{7}\right)^2 + 1)} = 0.5.$$

Тогда, ток ВГ в цепи БК равен:

$$I_{v\varepsilon} = \sqrt{I_5^2 + (I_7 * \sigma_{v7})^2}, \quad (4.24)$$

$$I_{v\varepsilon} = \sqrt{99.3^2 + (78.6 * 0.5)^2} = 116.7 \text{ A.}$$

Тогда, минимальная мощность БК ФКУ на три фаза равна  $Q_p = 3 * 1.2 * 116.7 * 6.6 = 2772,8 < 4700$ .

При установке ФКУ 5-й и 7-й гармоник мощность БК фильтров  $Q_p = 3(1.2 * 6.6 * 109.9 + 1.2 * 6.6 * 78.6) = 4478,7$  квар  $> 4700$  квар. То есть, значительно больше оптимального значения РМ. ФКУ 6-й гармоники при  $k_p = 2.2 * 10^{-2}$  будет загружен токами 5-й и 7-й гармоники:

$$\sigma_{v7} = \frac{1}{\frac{1}{k_p * v_p^2} (1 - (v_q)^2 + 1)}, \quad (4.25)$$

$$\sigma_5 = \frac{1}{\frac{1}{2.2 * 10^{-2} * 6^2} (1 - \left(\frac{6}{5}\right)^2 + 1)} = 2.25,$$

$$\sigma_7 = \frac{1}{\frac{1}{2.2 * 10^{-2} * 6^2} (1 - \left(\frac{6}{7}\right)^2 + 1)} = 0.75.$$

Тогда, ток ВГ через ФКУ равен:

$$I_{v\varepsilon} = \sqrt{I_5^2 + (I_7 * \sigma_{v7})^2}, \quad (4.26)$$

$$I_{v\varepsilon} = \sqrt{(99.3 * 2.25)^2 + (78.6 * 0.75)^2} = 187.8 \text{ A.}$$

Следовательно, наименьшая мощность БК ФКУ  $Q_p = (3 * 1.2 * 6.6 * 187.8) = 4462$  квар  $< 4700$  квар. Таким образом, возможна также установка ФКУ, настроенного на частоту 6-й гармоники. Вариант установки

ФКУ 5-й гармоники является предпочтительным, т. к. БК загружена по току на  $\left(\frac{187.8}{116.7} - 1\right) * 100 = 61\%$  меньше, что благоприятно сказывается на их температурном режиме и сроке службы.

### 4.3. Расчет коэффициента несинусоидальности до и после применения преобразователя

Существуют упрощенный вид коэффициента несинусоидальности позволяющий производить инженерные расчеты, формула имеет данный вид:

$$K_{\text{и}} = x_{\text{с}} \sqrt{\frac{3}{\pi} * \frac{\sin \varphi}{x_{\text{с}} + x_{\text{пр}}} - \frac{9}{\pi^2}} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} \sqrt{0.955 \frac{\sin \varphi}{\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} + x_{\text{пр}}} - 0.91}, \quad (4.27)$$

$$K_{\text{и}} = 0.0062 \sqrt{\frac{3}{3.14} * \frac{0.5 * 0.062^2}{0.0062 + 0.07} - \frac{9}{3.14^2}} = 6.3\%.$$

Теперь, когда известно, что коэффициент несинусоидальности до применения фильтро-компенсирующих устройств действительно превышает норму, производим расчет  $K_{\text{и}}$  с учетом установленного ФКУ.

$$K_{\text{и}} = x_{\text{с}} \sqrt{\frac{3}{\pi} * \frac{\sin \varphi}{x_{\text{с}} + x_{\text{пр}}} - \frac{9}{\pi^2}} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} \sqrt{0.955 \frac{\sin \varphi}{\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{к}}} + x_{\text{пр}}} - 0.91}, \quad (4.28)$$

$$K_{\text{и}} = \frac{10}{1600} \sqrt{0.955 * \frac{0.5}{\frac{10}{1600} + 0.1} - \frac{9}{3.14^2}} = 1.4\%.$$

$$\text{где, } x_{\text{с}} = \frac{10}{1600} = 0.0062$$

$$x_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \left(1 + \frac{k_{\text{р}}}{4}\right) \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{ном.тр}}}, \quad (4.29)$$

$$x_{\text{пр}} = \frac{10.5}{100} \left(1 + \frac{2.2 * 10^{-2}}{4}\right) \frac{10}{16} = 0.1.$$

Таким образом, в последствии применения 6-пульсного преобразователя был изменен параметр  $x_{пр}$ , непосредственно влияющий на величину  $k_i$ . В результате вычисления было выявлено, что коэффициент несинусоидальности снизился на 4.9%, а именно с 6.3% до 1.4%. Нынешнее значение удовлетворяет требования ПУЭ, где  $k_i \leq 4\%$ .

**Таблица 13 – Допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности**

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %							
нормально допустимые, для $U_{ном}$ кВ				предельно допустимые, для $U_{ном}$ кВ			
0,38	6- 20	35	110- 330	0,38	6- 20	35	110- 330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

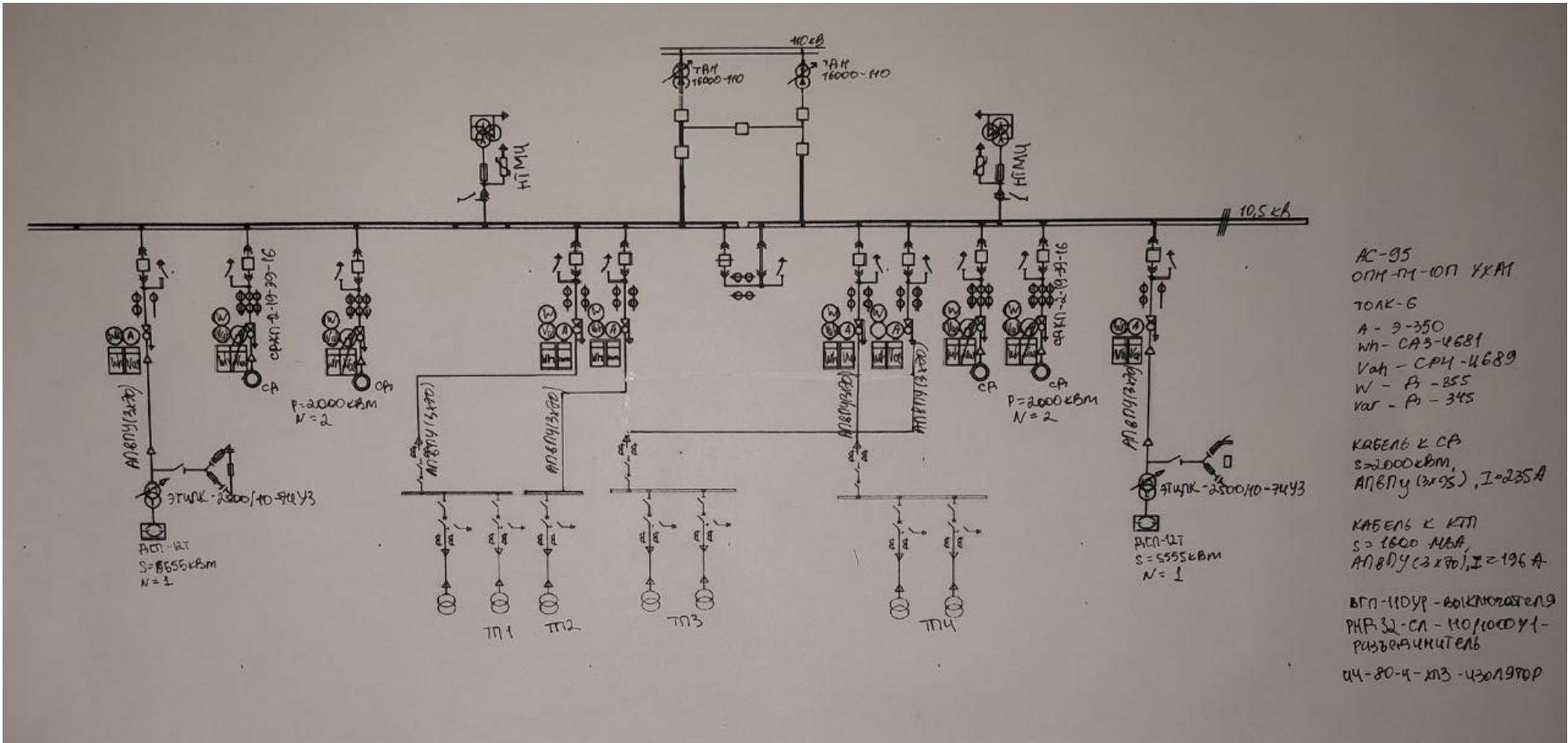
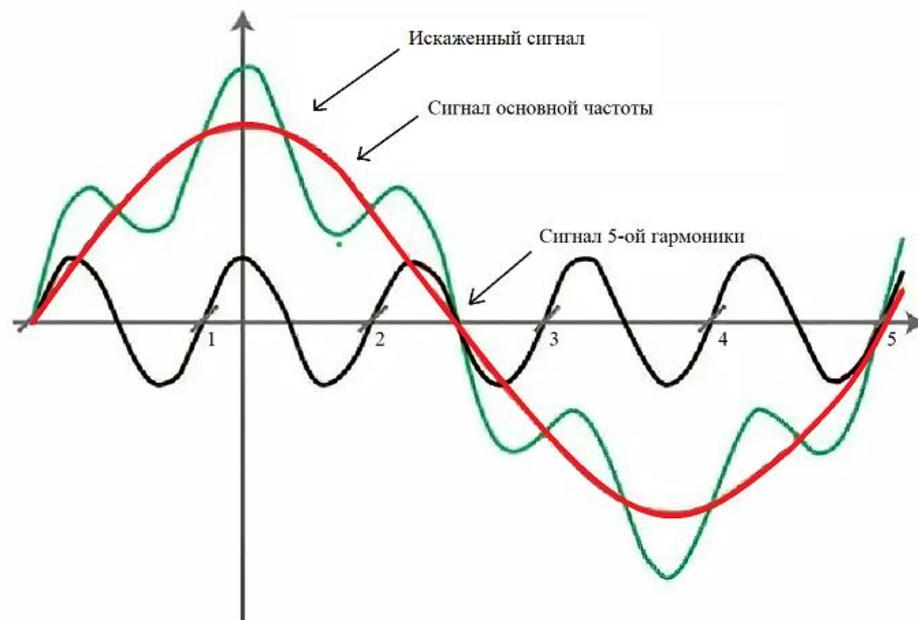


Рисунок 17 – Однолинейная схема судостроительного завода



**Рисунок 18 - Пример искажения синусоидальности напряжения**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе была спроектирована система электроснабжения судостроительного завода. В ходе проектирования были рассчитаны низковольтные силовые нагрузки цехов завода методом «Упорядоченных диаграмм нагрузок», определена суммарная мощность силовой и осветительной нагрузки по цехам завода напряжением 0,4 кВ. В качестве источника питания была выбрана теплоэлектроцентраль. Полная мощность предприятия составила  $S_{\text{завода}} = 22480$  кВА. Было рассчитано число цеховых трансформаторов и компенсация реактивной мощности на напряжение 0,4 кВ. Количество трансформаторов  $N_{\tau} = 7$ .

Далее было проведено технико-экономическое сравнение вариантов внешнего электроснабжения. Где были рассмотрены два варианта питания завода, использование ТДН-16000/110 и ТДНС-16000/20, проведен технический расчет, оба варианта были сравнены по совокупным затратам. В качестве окончательного варианта электроснабжения как наиболее экономически эффективный вариант был выбран силовой трансформатор марки ТДН-16000/110 (первый вариант). Второй вариант не подошел так как требовал гораздо больших затрат при практически одинаковых потерях в трансформаторах. Также было выбрано оборудование для напряжения выше 1000 В. А именно выключатель типа ВГП-110 У1 и разъединитель марки РНД32-СЛ-110/1000У1.

К тому же, в результате проведенного исследования было выяснено, что широко распространенные несинусоидальные формы напряжения оказывают значительное влияние на работу электрооборудования и могут приводить к снижению его надежности и долговечности. Были изучены различные методы и средства для диагностики несинусоидальности напряжения, включая анализ гармоник, спектральный анализ и фильтры. Подводя итог, можно сказать, что важно учитывать несинусоидальность напряжения при проектировании и эксплуатации электрооборудования для обеспечения его надежной и безопасной работы. Далее был выбран 6-пульсный преобразователь, благодаря которому коэффициент несинусоидальности был снижен на с 6.3% до 1.4% и теперь соответствует ГОСТ 13109–97.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Гапиров Р.А. Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом// Научно-технический журнал «Современные проблемы науки и образования». - Москва, 2014.

2 Гужов С.В., Янченко С.А. Анализ работоспособности и функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности тока // Научно-технический журнал «Агротехника и энергообеспечение». - Москва, 2016.

3 Зырянов В.М, Кирьянова Н.Г., Митрофанов Н.А. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме// Научно-технический журнал «Системы анализа и обработки данных». - Москва, 2018.

4 Киреева Э.А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий: учебное пособие. - Москва, 2013.

5 Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя: учебник и практикум для вузов. – Москва: Издательство Торус Пресс, 2015.

6 Дубинский Г.Н., Левин Л.Г. Наладка устройств электроснабжения напряжением выше 1000В. - Москва: Издательство Солон-Пресс, 2014.

7 ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» - Министерство энергетики РК, 2021.

8 Новак В. Правила устройства электроустановок: учебник и практикум для вузов. - Москва, 2017.

9 Артемов А.И. Анализ режима напряжения в системе электроснабжения. – Москва: Издательство МЭИ, 2013.

10 Шабалин А.И. Влияние несинусоидальности и несимметрии напряжения на протяженные сети 0,4. 2020, <https://moluch.ru/archive/310/70405/>.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

**РЕЦЕНЗИЯ**

**на дипломную работу**

(наименование вида работы)

**Акзамова Асем Мэлскызы**

(Ф.И.О. обучающегося)

**6В07101 - Энергетика**

(шифр и наименование специальности)

На тему: **«Исследование несинусоидальности системы энергоснабжения  
судостроительного завода»**

В дипломной работе проектируется электроснабжение судостроительного завода. Был произведен расчет электрических нагрузок цехов, расчет числа трансформаторов и распределения их по трансформаторным подстанциям, расчет потерь электроэнергии и выбор защитного оборудования. В экономической части дана оценка эффективности внешнего электроснабжения судостроительного завода.

В специальной части было исследовано явление несинусоидальности, вызванное работой дуговых сталеплавильных печей, что очень актуально в современных энергоемких металлургических предприятиях. Так как к качеству электрической энергий всегда предъявляются высокие требования.

**Замечания к работе**

В качестве замечания можно отметить, что местами были допущены ошибки в выборе выключателей. В общем, дипломная работа написана в соответствии с требованиями, и тема раскрыта полностью.

**Оценка работы**

Дипломная работа Акзамовой Асем Мэлскызы заслуживает оценки «отлично» (95 балла), а сам студент присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6В07101 – «Энергетика».

**Рецензент**

Главный энергетик ТОО

«Корпоративная  
строительная горнорудная  
компания»

Е.А. Жолдыбеков

(подпись)

2023 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

**ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

**на дипломную работу**

(наименование вида работы)

**Акзамовой Асем Мэлскызы**

(Ф.И.О. обучающейся)

**6B07101 – «Энергетика»**

(шифр и наименование специальности)

Тема:

«Исследование несинусоидальности системы энергоснабжения судостроительного завода»

В данной дипломной работе студентка Акзамова Асем, не только произвела расчеты системы энергоснабжения судостроительного завода, но и исследовала несинусоидальность напряжения, вызванную установленной на заводе дуговой сталеплавительной печью. Во время исследования Акзамова А. совершила расчет электрических нагрузок, было выбрано электроэнергетическое оборудование. На основе технико-экономического расчета была доказана эффективность выбранного варианта внешнего электропитания.

В специальной части был произведен подробный анализ причин и последствий несинусоидальности напряжения. Представлены расчеты коэффициентов несимметрии и несинусоидальности. Был произведен выбор фильтро-компенсирующих устройств. Представлена принципиальная схема компенсации и фильтрации, происходящих во время использования активного фильтра. Далее был произведен повторный расчет и было наглядно показано как изменился коэффициент несинусоидальности.

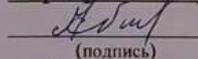
Акзамова А. проявила высокий уровень теоретической подготовки и оперативности при выполнении дипломной работы. Она проявила способность сочетать теорию с практикой и успешно решала поставленные задачи.

Дипломная работа студента на тему «Исследование несинусоидальности системы энергоснабжения судостроительного завода» выполнена в полном объеме. Тема дипломной работы раскрыта полностью. Были небольшие ошибки в расчетах коэффициента несинусоидальности, которые были устранены в ходе работы. В целом, дипломная работа Акзамовой Асем Мэлскызы на тему «Исследование несинусоидальности системы энергоснабжения судостроительного завода» заслуживает оценки «отлично» (95 баллов), а сам студент присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07101 - «Энергетика».

**Научный руководитель**

**магистр, ст.преподаватель**

**кафедры «Энергетика»**

 Р.Ш. Абитаева

(подпись)

« 01 » июня 2023г.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Акзамова Асем Мэлскызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование несинусоидальности СЭС судостроительного завода

Научный руководитель: Рахимаш Абитаева

Коэффициент Подобия 1: 23

Коэффициент Подобия 2: 3.9

Микропробелы: 136

Знаки из других алфавитов: 246

Интервалы: 167

Белые Знаки: 4

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 1.06.2022

Заведующий кафедрой Энергетики

Сарсенбаев Э.А.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Акзамова Асем Мэлскызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование несинусоидальности СЭС судостроительного завода

Научный руководитель: Рахимаш Абитаева

Коэффициент Подобия 1: 23

Коэффициент Подобия 2: 3.9

Микропробелы: 136

Знаки из здругих алфавитов: 246

Интервалы: 167

Белые Знаки: 4

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

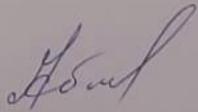
Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата

  
проверяющий эксперт