

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Исследование электроснабжения высоковольтных двигателей 6
кВ насосной станции ОАО «ТЕВИС»

Студент(ка)

А.А. Важинский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.П. Тараканов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

При выполнении выпускной квалификационной работы выполнен анализ системы электроснабжения, технических данных и режимов работы высоковольтных электродвигателей 6 кВ насосной станции ВНС-02 ОАО «ТЕВИС». Проведены инструментальные обследования ЗРУ 10/6 кВ. Выполнена регистрация напряжения, тока, показателей качества на стороне 6 кВ при коммутациях высоковольтных электродвигателей 6 кВ. Выполнена проверка состояния сети 6 кВ, изоляции электрооборудования 6 кВ.

Разработаны рекомендации по восстановлению стабильности нормальных фазных напряжений при электроснабжении высоковольтных электродвигателей насосной станции ВНС-02.

Пояснительная записка выполнена на 56 стр. Графический материал представлен на 6 листах формата А1.

Содержание

	Введение	5
1	Анализ объекта исследования	7
1.1	Причины возникновения перенапряжений в электрических сетях с изолированной нейтралью	7
1.2	Анализ схемы электроснабжения, технических данных электрооборудования насосной станции ВНС-02	11
2	Измерения фазных, линейных напряжений и напряжения смещения нейтрали при различной конфигурации электрической сети 6 кВ ЗРУ 10/6 кВ ВНС - 02	13
3	Регистрация кривых напряжения, показателей качества электроэнергии на стороне 10 кВ ЗРУ 10/6 кВ ВНС-02	39
4	Расчет токов ОЗЗ в сети 6 кВ насосной ВНС-02	46
5	Разработка рекомендаций по восстановлению стабильности нормальных фазных напряжений при электроснабжении электродвигателей 6 кВ насосной станции ВНС-02	50
	Заключение	53
	Список использованных источников	54

Введение

Системы электроснабжения предприятий должны обеспечивать электрической энергией потребителей надлежащего качества и с высоким уровнем надежности [1]. В связи с постоянно ухудшающимся состоянием силового электрооборудования возрастают вероятность и частота возникновения аварийных ситуаций в электрических сетях предприятий. Поэтому проблема продления технической эксплуатации электрооборудования и повышения надежности электроснабжения потребителей является актуальной.

С 1997 года, в машинном зале насосной ВНС-02, принадлежащей ОАО «ТЕВИС», периодически появляется озон. При этом наблюдается перекося фазных напряжений сети 6 кВ. Поиски однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ результатов не дали. Все электрооборудование подвергалось высоковольтным испытаниям в соответствии с Правилами эксплуатации электроустановок потребителей [1]. Ослабленной изоляции выявлено не было. Неоднократная замена электродвигателей 6 кВ на насосной станции не давала результатов.

Известно, что выделение озона происходит при возникновении коронных разрядов вследствие возникновения в сети 6 кВ перенапряжений на электрооборудовании даже с исправной изоляцией. Перенапряжения приводят к старению изоляции и повреждению электрооборудования.

Цель работы – повышение надежности электроснабжения высоковольтных электродвигателей 6 кВ насосной станции ВНС-2 ОАО «ТЕВИС».

Объект исследования – электрическая сеть 6 кВ закрытого распределительного устройства ЗРУ 10/6 кВ насосной станции ВНС-02 ОАО «ТЕВИС».

Задачи работы:

1. Анализ электрической схемы сети 6 кВ насосной станции ВНС-02.

2. Обработка и анализ расчетных инструментальных исследований в электрической сети 6 кВ насосной станции ВНС-02.

3. Разработка рекомендаций по восстановлению стабильности нормальных фазных напряжений высоковольтных электродвигателей на стороне 6 кВ ЗРУ 10/6 кВ насосной станции ВНС-02.

1 Анализ объекта исследования

1.1 Причины возникновения перенапряжений в электрических сетях с изолированной нейтралью

Состояние нейтрали обуславливает всю техническую и организационную структуру электрических сетей. К нему приспособлены режимы работы и конфигурация сети, изоляция оборудования и защита от перенапряжений, заземляющие устройства, релейная защита т.п. В России подавляющее большинство распределительных сетей 6(10) кВ работают с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока замыкания на землю, в которых в связи с повышением требований к надежности и бесперебойности работы оказывается весьма актуальной проблема борьбы с дуговыми замыканиями на землю, с квазистационарными перенапряжениями, обусловленными смещением нейтрали. В этих сетях также вероятны феррорезонансные перенапряжения, возникающие при самопроизвольных смещениях нейтрали и всякого рода неполнофазных режимах питания.

Согласно действующим нормам ПУЭ сети 6, 10, 15, 20, 35 кВ выполняются с изолированной (или заземленной через дугогасящий реактор) нейтралью [2]. В режиме работы сети с изолированной нейтралью ненулевое напряжение на нейтрали (смещение нейтрали) имеет место в случае неуравновешенности системы э.д.с. (сумма фазных э.д.с. не равна нулю), возникающей, например, при межвитковом замыкании в одной из фазных обмоток питающего трансформатора, когда выведена из работы или нечувствительна к этому повреждению газовая защита трансформатора. Смещение нейтрали также имеет место в случае несимметрии сети (не равными между собой поперечными проводимостями между фазами и землей) даже при уравновешенной системе э.д.с. Как следствие смещения нейтрали, возникает повышение напряжений фаз относительно земли, что

приводит к более быстрому старению изоляции электрооборудования и к увеличению вероятности пробоя изоляции [3].

При однофазном замыкании на землю сети с изолированной нейтралью сопротивление поврежденной фазы на землю приближенно становится равным нулю, что приводит к несимметрии сети и смещению нейтрали, по модулю равному фазному напряжению сети, поэтому напряжения на неповрежденных фазах относительно земли превышают фазную э.д.с. в $\sqrt{3}$ раз, т.е. их величина достигает номинального напряжения сети. Ток замыкания на землю в этом случае пропорционален номинальному напряжению сети и поперечной проводимости неповрежденной фазы на землю (обусловленной, в основном, емкостью фазы), поэтому ток носит емкостный характер и опережает э.д.с. поврежденной фазы на 90° .

Каждая электроустановка имеет изоляцию, соответствующую ее номинальному напряжению.

Согласно ГОСТ 1516.3-96 [4] для электрооборудования установлены:

- класс напряжения электрооборудования $U_{ном}$;
- наибольшее рабочее напряжение электрооборудования $U_{раб. наиб. эл. об.}$

Кроме того, нормируется наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети $U_{раб. наиб.}$ (в кВ).

Эксплуатационные качества электрических сетей, способы локализации аварийных повреждений и условия бесперебойного электроснабжения потребителей в значительной мере определяются режимом заземления нейтрали. Это обусловлено тем, что не менее 75 % всех аварийных повреждений в электрических сетях с изолированной нейтралью связаны с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ) [7,8].

Хотя при ОЗЗ происходит смещение нейтрали, а неповрежденные фазы могут приобрести относительно земли напряжение до линейного значения, треугольник линейных напряжений не искажается. При этом нагрузка, которая работает в таком режиме, не изменяет своих характеристик. ОЗЗ большей частью являются дуговыми. Вероятность самоугасания

электрической дуги в месте ОЗЗ достаточно велика, т.е. возможно самоликвидация аварии и восстановление симметричного напряжения сети [10]. Ток в месте ОЗЗ является емкостным

$$I_C = 3 \omega C_0 U_\phi, \quad (1.1)$$

где C_0 – средняя емкость фаз относительно земли.

Значение этого тока невелико – составляет доли или несколько ампер.

Причины возникновения однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ весьма многообразны [13-15]. Это электрические и механические разрушения изоляции электрооборудования, дефекты в изоляторах и изоляционных конструкциях, их увлажнение и загрязнение, разрывы токоведущих частей и фаз кабелей в соединительных муфтах при смещениях почвы, частичные повреждения изоляции при строительных и монтажных работах, воздействие грозových и внутренних перенапряжений.

Во внутренних перенапряжениях следует выделять коммутационные и резонансные перенапряжения. Резонансные перенапряжения возникают при определенном соотношении между индуктивностями сети L и емкостями на землю C_0 и междуфазными емкостями $C_{M\phi}$ цепи. При включении последовательно емкости и нелинейной индуктивности возможно возникновение и длительное существование феррорезонансных перенапряжений. При этом наличие однофазного замыкания на землю в сети не имеет принципиального значения. Обычно эта проблема актуальна для маломощных трансформаторов и трансформаторов контроля изоляции. Эти перенапряжения не являются опасными для бездефектной изоляции электроустановок 6 – 10 кВ, за исключением электрических машин, но могут вызвать пробой в местах с ослабленной изоляцией и многоместные замыкания на землю [11, 12].

Следует также отметить, что феррорезонансные перенапряжения иногда возникают при исправном состоянии сети с изолированной нейтралью. Обусловлены они различиями в характеристиках намагничивания трансформаторов напряжения, которые приводят к самопроизвольному смещению нейтрали сети. При этом возникают перенапряжения на отдельных фазах сети, что является причиной протекания по обмоткам трансформаторов напряжения токов большой величины, приводящих к их повреждению [16, 17, 20-22].

1.2 Анализ схемы электроснабжения, технических данных электрооборудования насосной станции ВНС-02

Однолинейная схема электроснабжения насосной станции ВНС-02 представлена на рисунке 1.

На территории насосной смонтирована двухтрансформаторная подстанция 10/6 кВ, имеющая две секции шин 6 кВ, к которым подключены электродвигатели насосов №№1 - 5. Насосы 1 и 2 питаются от 1 секции 6 кВ, а насосы 3, 4, 5 от 2 секции. В качестве приводов насосов используются асинхронные электродвигатели типа А4-355, мощностью 315 кВт, напряжением 6 кВ.

На каждой секции 6 кВ имеется трансформатор собственных нужд типа ТМ-100-6/0,4 кВ для потребителей 0,4 кВ насосной (яч. 4, 15). Предусмотрено секционирование по 6 кВ с помощью секционного выключателя (яч. 9,10).

Каждая секция насосной станции получает питание от силовых трансформаторов 10/6 кВ, мощностью 1000 кВА. Трансформаторы ТМ-6300-10/6 кВ (яч.8 и яч.11) установлены на открытой площадке в 50 метрах от ЗРУ-6 кВ. Длина кабелей 6 кВ - 50 м, марка кабелей – ААШв 3х150. Вся сеть 6 кВ является локальной и не выходит за пределы насосной.

В качестве трансформаторов напряжения применены:

- на 1 секции трансформатор напряжения типа НАМИТ -10- 2 УХЛ2 (яч.5);
- на 2 секции трансформатор напряжения типа НТМИ-6- УХЛ2 (яч.14).

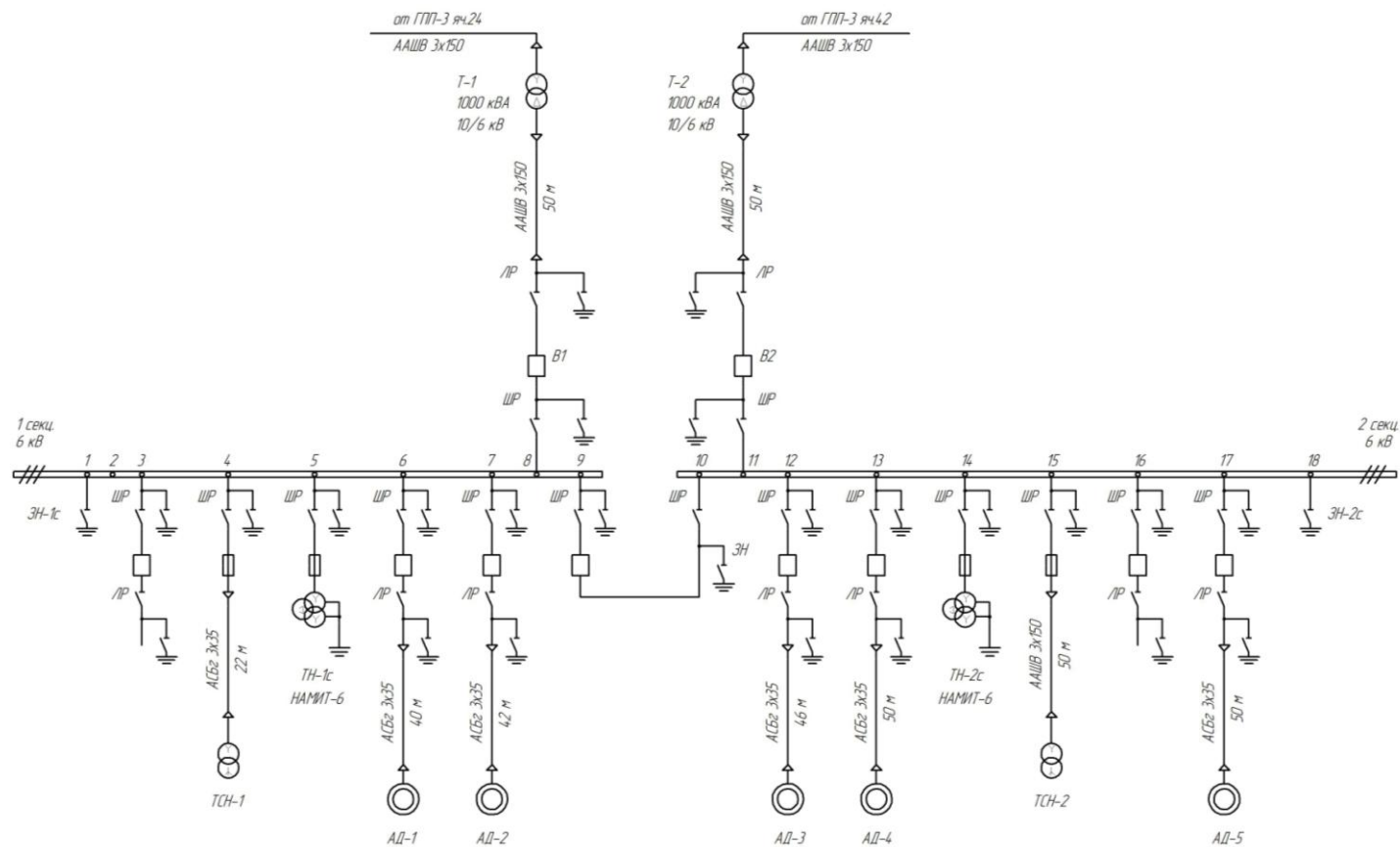


Рисунок 1 - Электрическая схема ВНС 02 до реконструкции

2 Измерения фазных, линейных напряжений и напряжения смещения нейтрали при различной конфигурации электрической сети 6 кВ ЗРУ 10/6 кВ ВНС - 02

Для производства измерений использована схема, приведенная на рисунке 2.

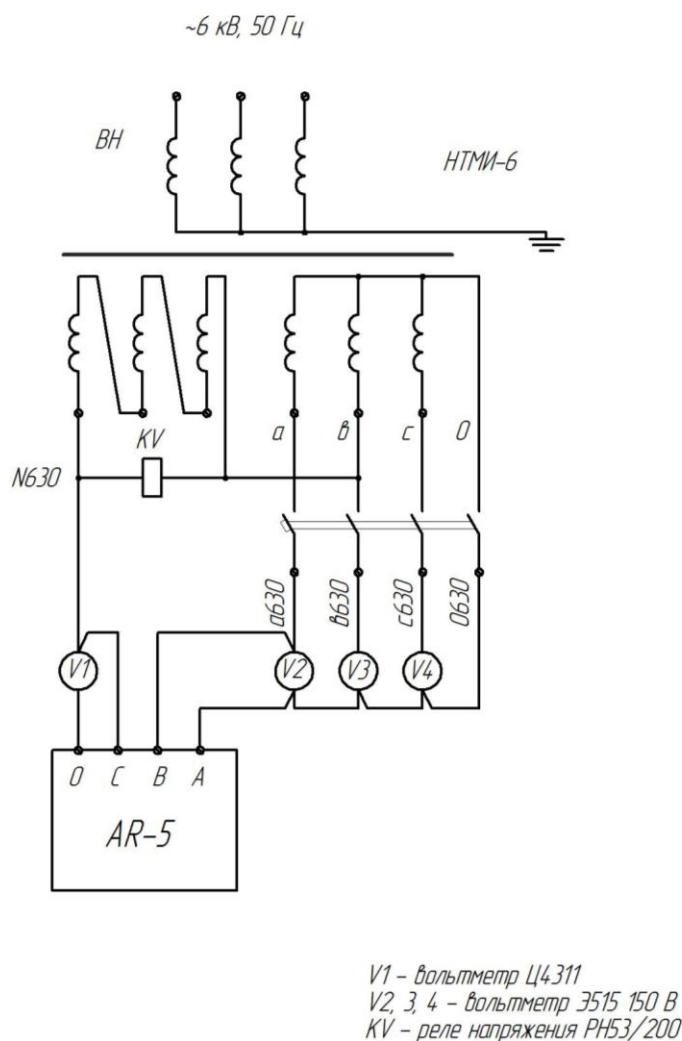


Рисунок 2 – Схема измерений

Измерения производились согласно программе производства работ отдельно для каждой секции шин в цепях вторичных обмоток трансформаторов напряжения. Результаты измерений приведены в таблицах 1 и 2 для 1 и 2 секции ВНС-02.

Выполнены измерения: линейных напряжений, фазных напряжений подаваемых с «активных» делителей напряжения, напряжения нулевой последовательности, тока на вводе. Измеряемые величины подавались на входы портативного электроанализатора AR-5. При этом производился анализ спектра напряжения и тока, фиксировались возможные перенапряжения с установленным градиентом 1,725 кВ [7].

Таблица 1 - Протокол измерений на 1 - ой секции 6 кВ ВНС – 02

№ пункта программы	Режим	R _{нагру} зки 3U ₀	Линейные напряжения			Напряжения фаз относительно земли			3U ₀
			AB	BC	CA	A	B	C	
			%	%	%	%	%	%	
2-1	<u>Включено:</u> МВ6яч8 ШР яч 5 <u>Отключено:</u> ЗН6яч1; ШР6яч3, 4, 7, 9 МВ6 яч3, 6, 7, 9 (Исходное состояние)	1200	105,4	104,8	104,7	56,1	64,1	65,1	9,1
		100	105,6	105,1	105,4	59,6	62,6	63,0	4,3
		25	105,2	104,7	105,0	60,4	61,2	61,2	2,0
2 -2	Включить ШР6 кВ яч 3 ТСН. Перевести нагрузку 0.4 кВ на ТСН1	1200	105,0	104,6	104,3	43,8	66,2	80,1	36,8
		100	104,9	104,6	104,1	59,1	61,0	62,6	4,25
		25	105,0	104,6	104,4	60,2	60,7	60,5	1,7
2-3	Несколько раз включить и отключить МВ6 кВ яч 7 и оставить отключенным	1200	105,0	104,6	104,3	43,8	66,2	60,1	36,8
		100	104,9	104,6	104,1	59,1	61,0	62,6	4,25
		25	105,0	104,6	104,4	60,2	60,7	60,5	1,7
2 – 4	Включить МВ 6 кВ яч 6 АД1. Двигатель оставить в работе	1200	104,6	104,2	104,3	61,0	58,8	62,0	3,42
		100	104,5	104,1	104,1	60,2	59,8	61,9	3,1
		25	103,1	102,7	102,3	60,2	60,7	61,5	1,47
2 – 5	Включить ШР 6 кВ яч7 Включить МВ 6 кВ яч7 АД2 Двигатель оставить в работе	1200	103,6	103,1	102,8	59,5	58,7	60,3	1,56
		100	103,1	102,8	102,4	59,4	58,8	60,3	1,5
		25	102,8	102,4	102,2	59,0	59,3	60,0	1,0
2 – 6	Отключить МВ 6 кВ яч 7 АД2	1200	104,0	103,8	104,0	60,9	58,7	61,4	3,25
		100	104,1	103,81	104,0	60,8	58,6	61,3	2,8
		25	104,3	103,9	104,1	60,2	59,2	59,7	1,48
2 – 7	Отключить МВ 6 кВ яч 6 АД1	1200	105,4	104,7	104,8	44,3	66,3	79,9	36,12
		100	104,9	104,7	104,8	59,2	61,0	62,6	4,25
		25	105,4	104,8	104,9	60,4	61,2	61,6	1,74

Таблица 2 - Протокол измерений на 2 - ой секции 6 кВ ВНС – 02

№ пункта программы	Режим	R _{нагру} зки 3U ₀	Линейные напряжения			Напряжения фаз относительно земли			3U ₀
			AB	BC	CA	A	B	C	
			%	%	%	%	%	%	
2-1	Включено: МВ6яч11 ШР яч 14	1200	106	106,4	105,2	63,8	63,2	61,3	8,24
	Отключено: ЗН6яч17; ШР6яч 9, 12, 15, 16	100	106	106,4	105,2	63,6	63,5	62,1	7,33
	МВ6 яч9,12, 13, 16, 17 (Исходное состояние)	25	106,1	106,2	105,2	61,3	62,4	62,2	4,44
2 -2	Включить ШР6 кВ яч 15 ТСН.	1200	106,1	106,2	105,2	66	66,3	56	11,5
	Перевести нагрузку 0.4 кВ на ТСН 2	100	106,1	106,2	105,2	62	63,4	61,9	5,8
		25	106,1	106,2	105,2	61,4	62,5	62,5	3,96
2-3	Несколько раз включить и отключить МВ6 кВ яч 12 и оставить отключенным	1200	106,1	106,2	105,2	67,6	69	50,3	18,7
		100	104,3	104,8	103,6	60,7	62,3	61	5
		25	104,4	104,7	103,7	60,3	61,4	61,1	3,48
2 – 4	Включить МВ 6 кВ яч 13 АД4.	1200	102	103,5	101,7	11,9	91,4	92,5	84
	Двигатель оставить в работе	100	102	103,5	101,5	12,1	91,1	92,4	82,5
		25	102	103,4	101,5	12,8	90,3	92,1	77,5
2 – 5	Включить ШР 6 кВ яч 12	1200	101,7	102,8	101,3	11,8	90,7	92	83,5
	Включить МВ 6 кВ яч 12 АД3	100	101,4	102,7	100,9	12	90,5	92	81,9
	Двигатель оставить в работе	25	101,3	102,6	100,7	12,7	89,6	91,4	76,9
2 – 6	Отключить МВ 6 кВ яч 13 АД4	1200	102,9	103,3	102,6	32,7	75,8	83,3	50,4
		100	103,5	103,8	102,7	53,4	61,3	63	2,76
		25	103,5	103,9	103	59,7	60,8	60,3	2,25
2 – 7	Отключить МВ 6 кВ яч 12 АД3	1200	104,5	104,9	103,7	67,8	69,1	50,1	18,84
		100	104,4	104,8	103,6	60,9	62,4	61	5,1
		25	104,6	104,7	103,6	60,4	61,5	61,2	3,5

Программа производства работ по определению причины самопроизвольного смещения нейтрали сети 6 кВ на 1 секции ЗРУ 10/6 кВ насосной станции ВНС-02

1. Подготовительные работы:

1.1. Собрать временную схему измерения в соответствии с рисунком 2.

1.2. Подготовить 1 секцию 6 кВ для производства измерений, собрать схему:

трансформатор Т -1 в работе,

ввод 1, яч.8, МВ - 6 кВ включен,

ТН-1 в работе, ШР - 6 кВ яч. 5 включен,

отключены: ЗН-6кВ, яч. 1; ШР – 6 кВ, яч.3, 4, 7, 9;

МВ - 6кВ, яч. 3, 6, 7, 9.

2. Производство измерений:

2.1. Произвести измерения линейных и фазных напряжений сети, а также напряжений фаз относительно земли и напряжения смещения нейтрали $3U_0$, когда секция 1 полностью разгружена.

С помощью портативного анализатора AR-5 зафиксировать искажения линейных напряжений, фазных относительно земли напряжений и напряжения смещения нейтрали. Прибором фиксировать момент коммутации электрооборудования насосной станции.

Измерения производить во вторичных цепях ТН-1 при разной нагрузке в цепи разомкнутого треугольника: 1200 Ом, 100 Ом и 25 Ом.

2.2. Включить ТСН-1, включив ШР-6 кВ яч.4, и повторить измерения согласно п.2.1.

2.3. Несколько раз включить и отключить МВ-6 кВ яч.7 для оценки влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ на смещение нейтрали в сети 6 кВ при разной нагрузке в цепи разомкнутого треугольника трансформатора напряжения: 1200 Ом, 100 Ом, и 25 Ом.

2.4. Включить АД1, включив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.6. Повторить измерения согласно п.2.1.

2.5. Включить АД2, включив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.7. Повторить измерения согласно п.2.1.

2.6. Отключить АД2, отключив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч. 7. повторить измерения согласно п.2.1.

2.7. Отключить АД1, отключив ШР – 6 кВ и МВ-6 кВ яч.6. Повторить измерения согласно п.2.1.

3. Обработка результатов измерений.

По результатам измерений построить потенциальные диаграммы. Оценить влияние сопротивления нагрузки в цепи $3U_0$ на величину смещения нейтрали и искажения напряжений.

Программа производства работ по определению причины самопроизвольного смещения нейтрали сети 6 кВ на 2 секции ЗРУ 10/6 кВ насосной станции ВНС-02

1. Подготовительные работы:

1.1. Собрать временную схему измерения в соответствии с рисунком 2.

1.2. Подготовить 2 секцию 6 кВ для производства измерений, собрать схему:

трансформатор Т-2 в работе,

ввод 2, яч. 11, МВ-6 кВ включен,

ТН-2 в работе, ШР-6 кВ, яч.14 включен,

Отключены: ЗН-6 кВ, яч.18;

ШР-6 кВ, яч. 9, 12, 15, 16; МВ-6 кВ, яч. 9, 12, 13, 16, 17.

2. Производство измерений:

2.1. Произвести измерения линейных и фазных напряжений сети, а также напряжений фаз относительно земли и напряжения смещения нейтрали $3U_0$, когда секция 2 полностью разгружена.

С помощью портативного анализатора AR-5 зафиксировать искажения линейных напряжений, фазных относительно земли напряжений и

напряжения смещения нейтрали. Прибором фиксировать момент коммутации электрооборудования насосной станции.

Измерения производить во вторичных цепях ТН-2 при разной нагрузке в цепи разомкнутого треугольника: 1200 Ом, 100 Ом и 25 Ом.

2.2. Включить ТСН-2, включив ШР-6 кВ яч.15, и повторить измерения согласно п.2.1.

2.3. Несколько раз включить и отключить МВ-6 кВ яч.12 для оценки влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ на смещение нейтрали в сети 6 кВ при разной нагрузке в цепи разомкнутого треугольника: 1200 Ом, 100 Ом и 25 Ом.

2.4. Включить АД 4, включив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.13, повторить измерения согласно п.2.1.

2.5. Включить АД 3, включив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.12, повторить измерения согласно п.2.1.

2.6. Отключить АД 4, отключив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.13. Повторить измерения согласно п.2.1.

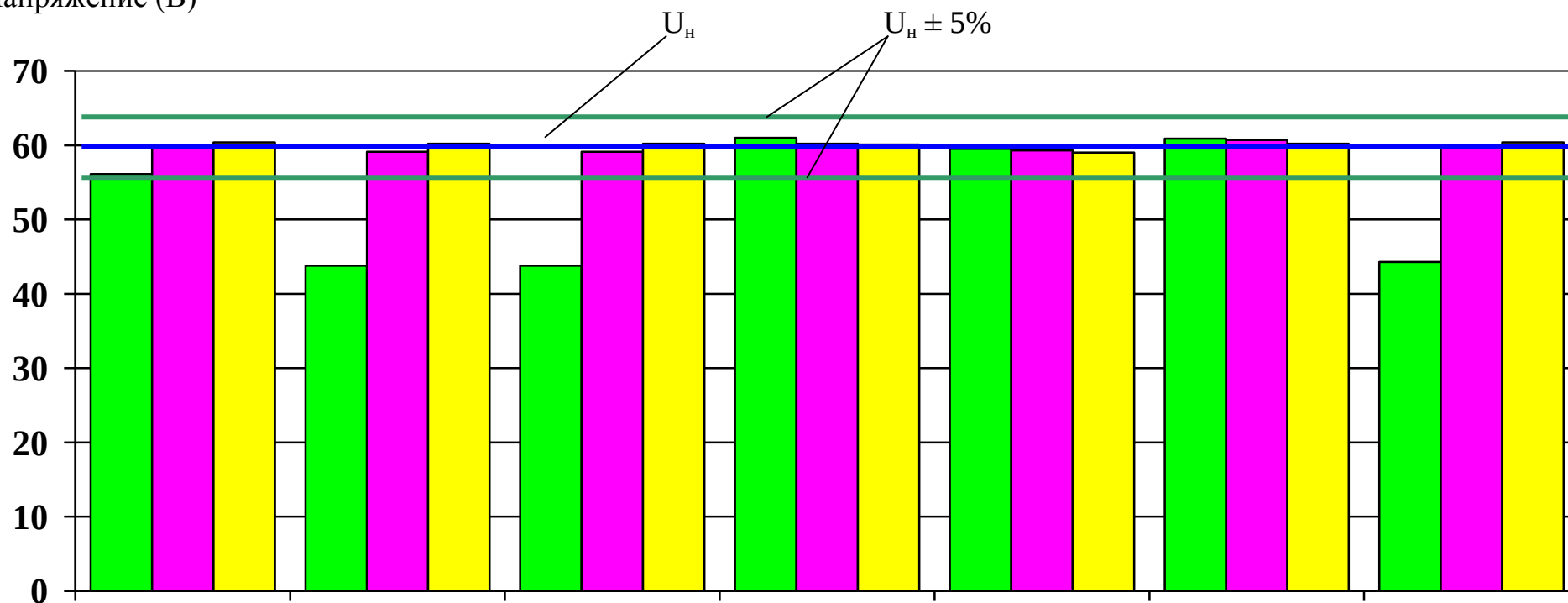
2.7. Отключить АД 3, отключив ШР-6 кВ и МВ-6 кВ яч.12. Повторить измерения согласно п.2.1.

3. Обработка результатов измерений.

По результатам измерений построить потенциальные диаграммы. Оценить влияние сопротивления нагрузки в цепи $3U_0$ на величину смещения нейтрали и искажения напряжений.

На основании протоколов измерений напряжений на 1 и 2 секциях 6 кВ построены графики динамики изменения фазных напряжений и напряжений смещения нейтрали, которые приведены на рисунках 3 - 10.

Напряжение (В)



■ R=1200 Ом на обм. АД-Хд

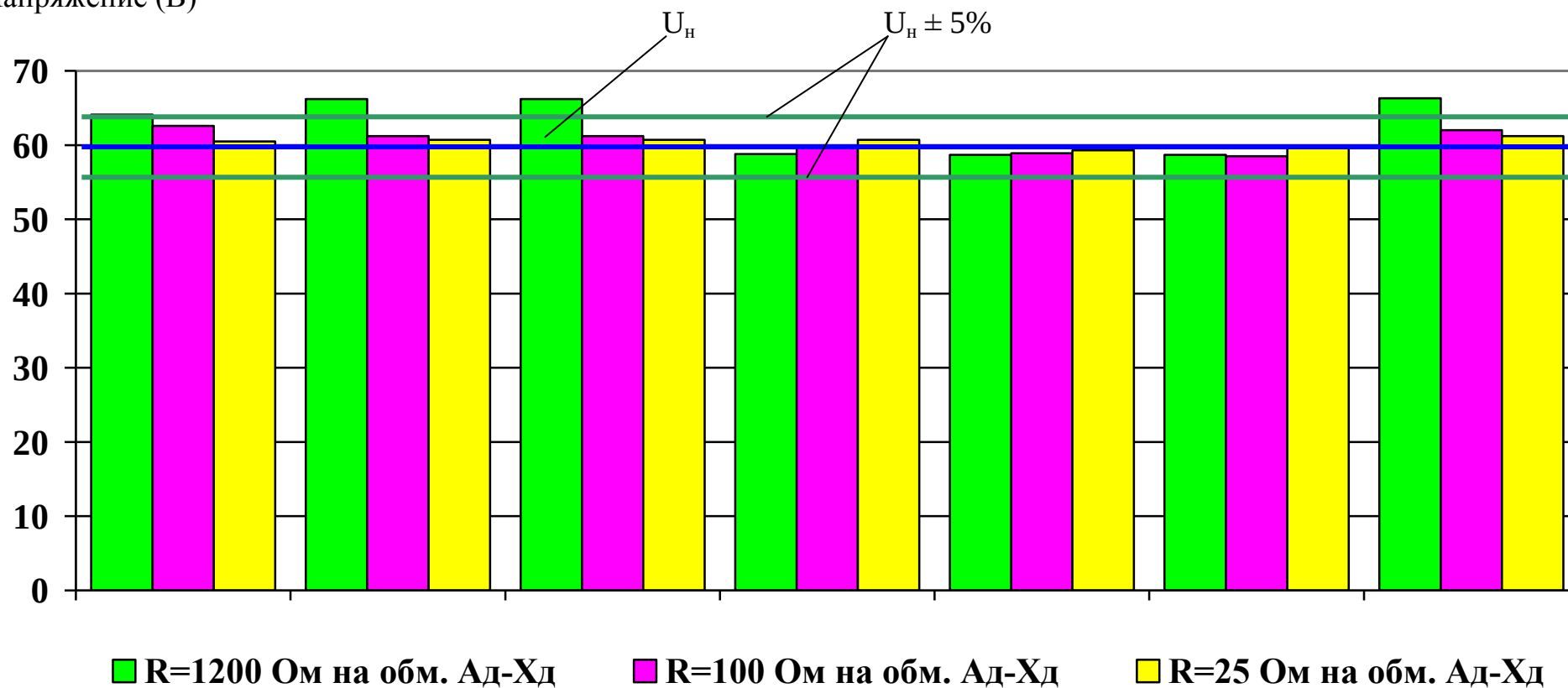
■ R=100 Ом на обм. АД-Хд

■ R=25 Ом на обм. АД-Хд

В работе	ТН-1 (НАМИТ)	ТН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1, АД-2	ТН-1, ТСН-1, АД-1
Включается	*	ТСН-1	0,4 кВ	АД-1	АД-2	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-2	АД-1

Рисунок 3 - Динамика изменения напряжения фазы А относительно земли на 1 секции 6 кВ

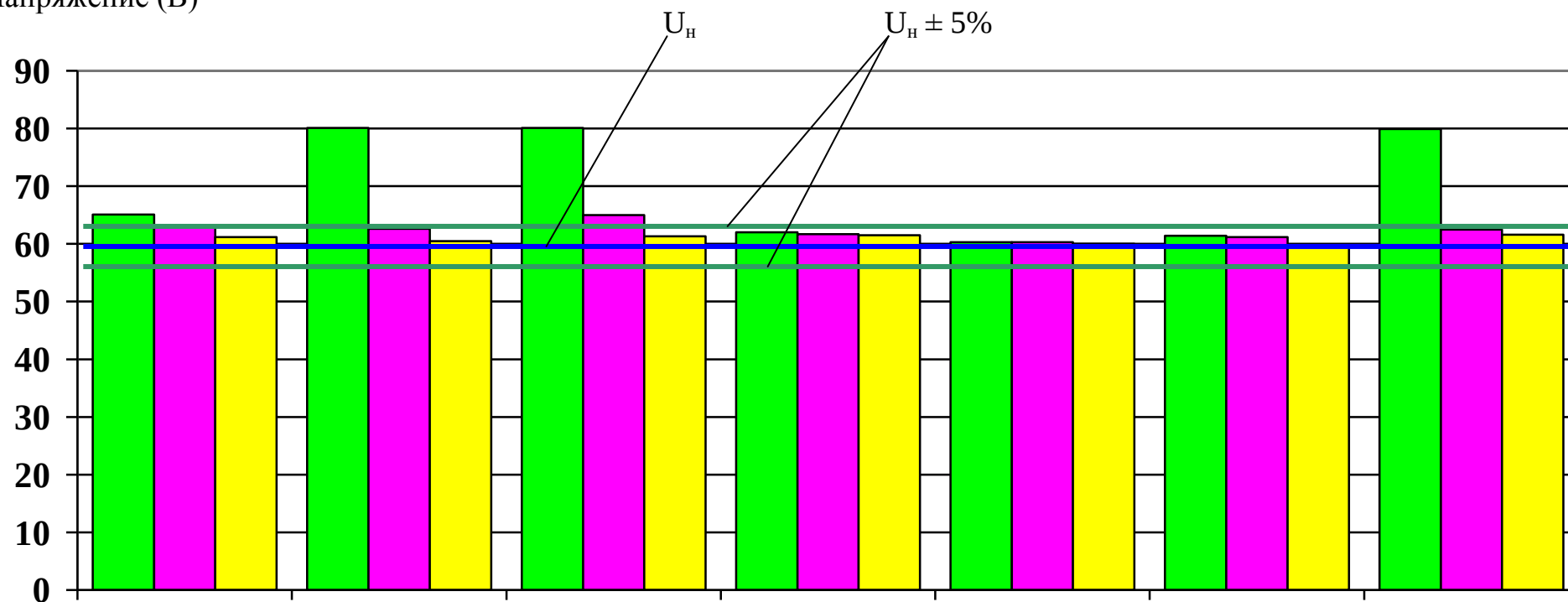
Напряжение (В)



В работе	ТН-1 (НАМИТ)	ТН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1, АД-2	ТН-1, ТСН-1, АД-1
Включается	*	ТСН-1	0,4 кВ	АД-1	АД-2	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-2	АД-1

Рисунок 4 - Динамика изменения напряжения фазы В относительно земли на 1 секции 6 кВ

Напряжение (В)



■ $R=1200 \text{ Ом}$ на обм. АД-Хд

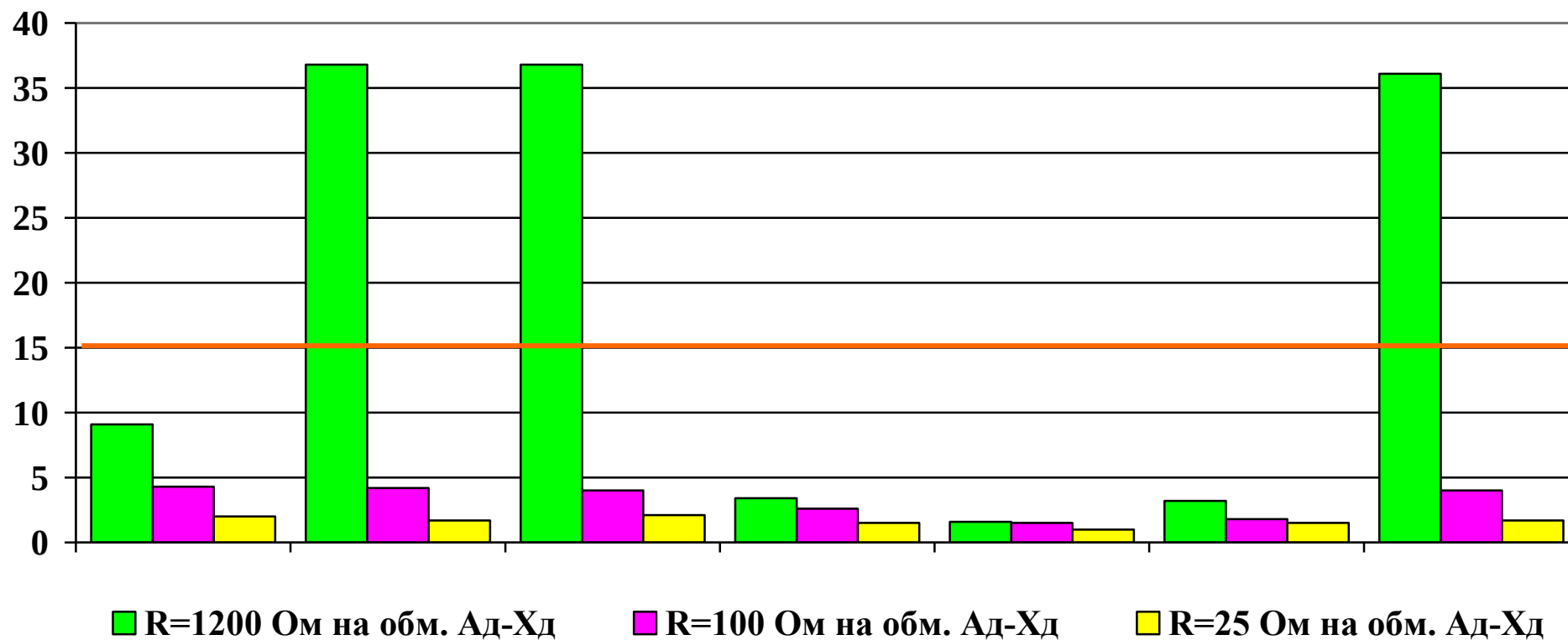
■ $R=100 \text{ Ом}$ на обм. АД-Хд

■ $R=25 \text{ Ом}$ на обм. АД-Хд

В работе	ТН-1 (НАМИТ)	ТН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1, АД-2	ТН-1, ТСН-1, АД-1
Включается	*	ТСН-1	0,4 кВ	АД-1	АД-2	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-2	АД-1

Рисунок 5 - Динамика изменения напряжения фазы С относительно земли на 1 секции 6 кВ

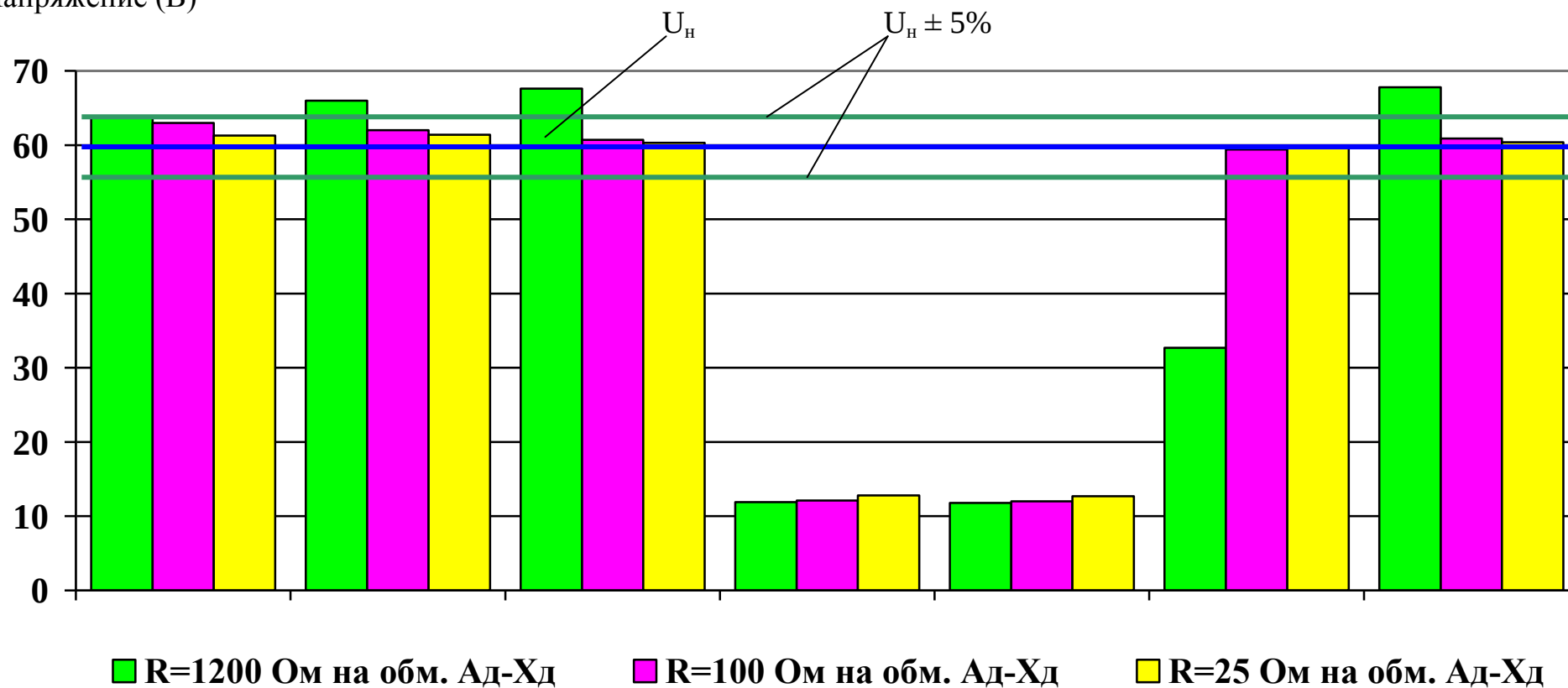
Напряжение (В)



В работе	ТН-1 (НАМИТ)	ТН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1	ТН-1, ТСН-1, АД-1, АД-2	ТН-1, ТСН-1, АД-1
Включается	*	ТСН-1	0,4 кВ	АД-1	АД-2	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-2	АД-1

Рисунок 6 - Динамика изменения напряжения смещения нейтрали на 1 секции 6 кВ

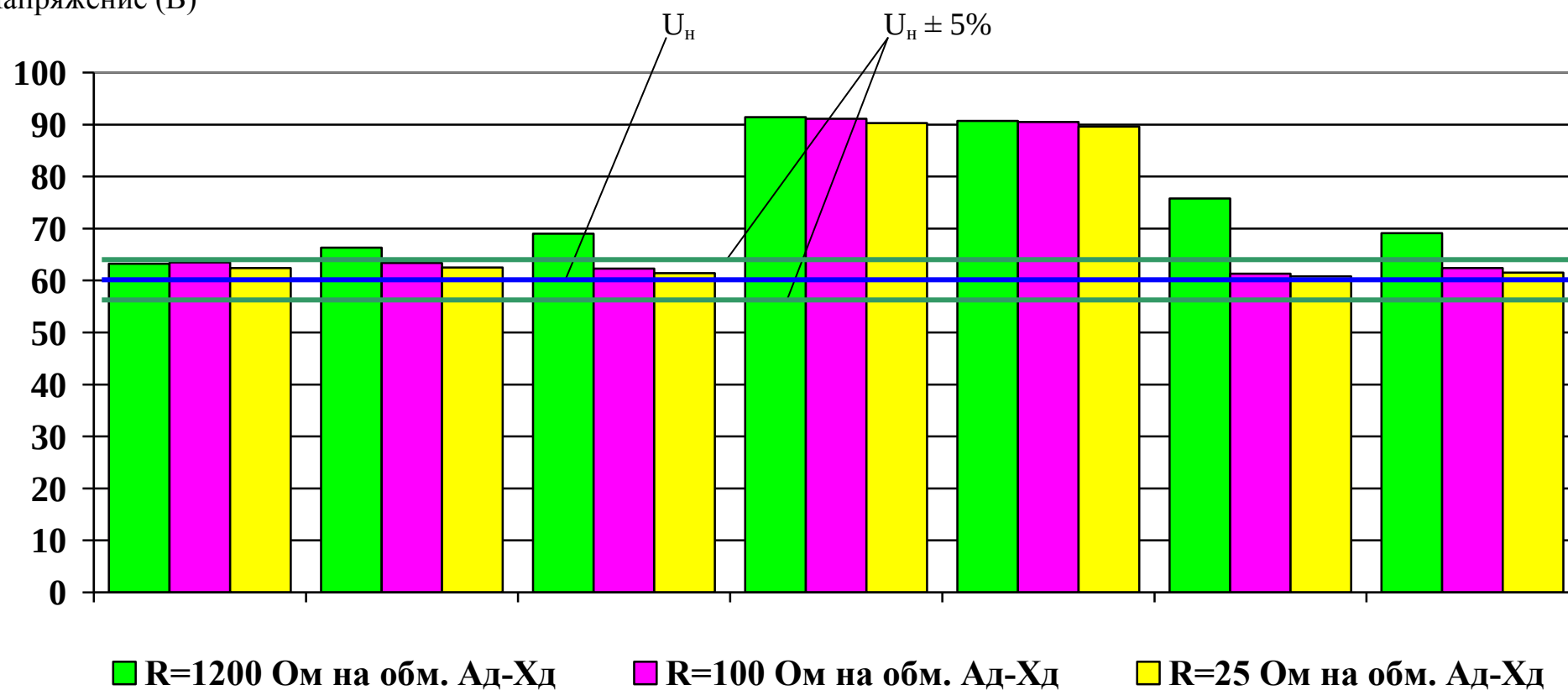
Напряжение (В)



В работе	ТН-2 (НТМИ)	ТН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2, АД-4	ТН-2, ТСН-2, АД-4, АД-3	ТН-2, ТСН-2, АД-3
Включается	*	ТСН-2	0,4 кВ	АД-4	АД-3	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-4	АД-3

Рисунок 7 - Динамика изменения напряжения фазы А относительно земли на 2 секции 6 кВ

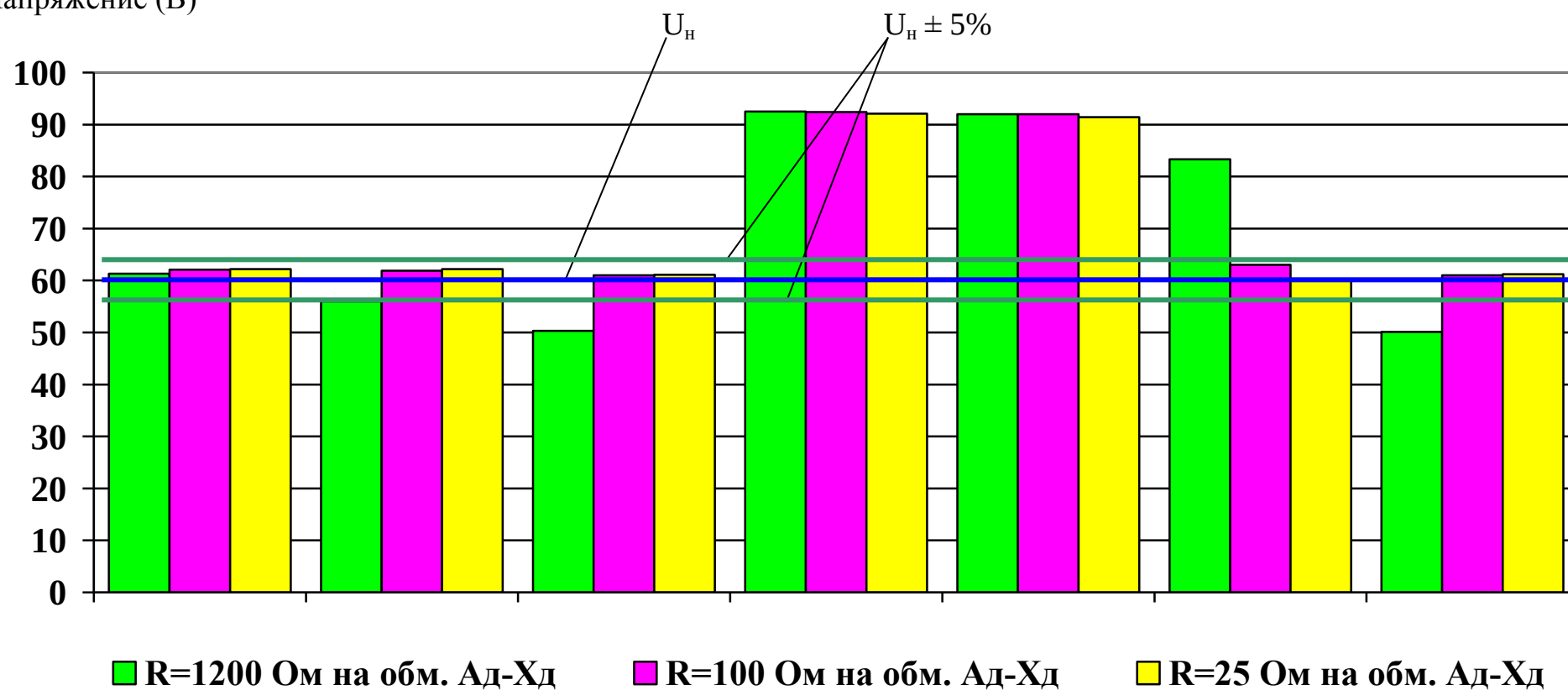
Напряжение (В)



В работе	ТН-2 (НТМИ)	ТН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2, АД-4	ТН-2, ТСН-2, АД-4, АД-3	ТН-2, ТСН-2, АД-3
Включается	*	ТСН-2	0,4 кВ	АД-4	АД-3	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-4	АД-3

Рисунок 8 - Динамика изменения напряжения фазы В относительно земли на 2 секции 6 кВ

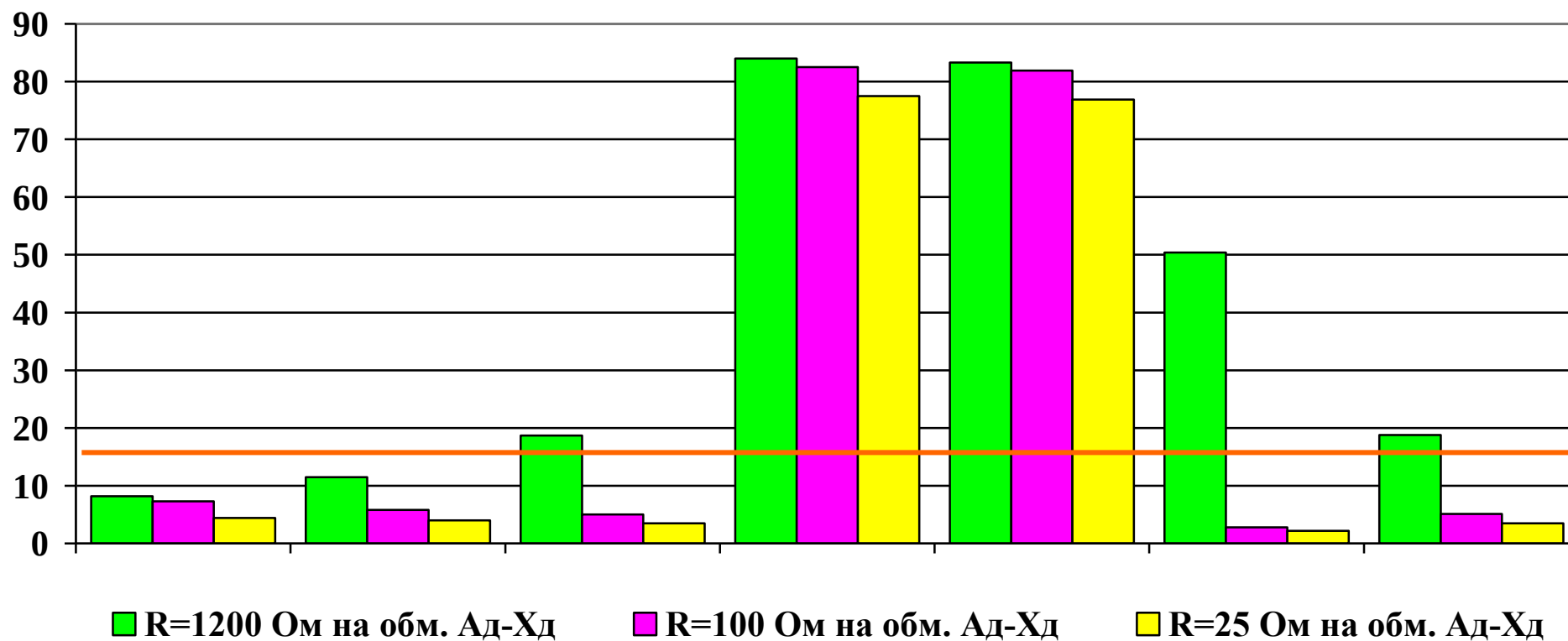
Напряжение (В)



В работе	ТН-2 (НТМИ)	ТН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2, АД-4	ТН-2, ТСН-2, АД-4, АД-3	ТН-2, ТСН-2, АД-3
Включается	*	ТСН-2	0,4 кВ	АД-4	АД-3	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-4	АД-3

Рисунок 9 - Динамика изменения напряжения фазы С относительно земли на 2 секции 6 кВ

Напряжение (В)



В работе	ТН-2 (НТМИ)	ТН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2	ТН-2, ТСН-2, АД-4	ТН-2, ТСН-2, АД-4, АД-3	ТН-2, ТСН-2, АД-3
Включается	*	ТСН-2	0,4 кВ	АД-4	АД-3	*	*
Отключается	*	*	*	*	*	АД-4	АД-3

Рисунок 10 - Динамика изменения напряжения смещения нейтрали на 2 секции 6 кВ

Из рисунков 3-6 (замеры на 1 секции 6 кВ) следует, что в исходном состоянии системы напряжение находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8]. При переключении ТСН-1 наблюдается падение напряжения $R=1200$ Ом на обм.АД-Хд, та же ситуация наблюдается при определении влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ и при выводе из работы АД-1. При включении АД-1, АД-2 и отключении АД-2 (4-6 режим), напряжение находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8].

Напряжение смещения нейтрали в исходном состоянии системы находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8]. При переключении ТСН-1 наблюдается возникновение смещения нейтрали на 1 секции 6 кВ на $R=1200$ Ом на обм.АД-Хд, та же ситуация наблюдается при определении влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ и при выводе из работы АД-1. При включении АД-1, АД-2 и отключении АД-2 (4-6 режим), напряжение смещения нейтрали находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8].

Проведенные измерения в других режимах показывают, что уровень напряжения смещения нейтрали находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8].

Из рисунков 7-10 (замеры на 2 секции 6 кВ) следует, что в исходном состоянии системы напряжение находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8]. При включении ТСН-2 наблюдается возникновение перенапряжения на 2 секции 6 кВ на $R=1200$ Ом на обм.АД-Хд, та же ситуация наблюдается при определении влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ и при выводе из работы АД-3, АД-4. При включении АД-3, АД-4 наблюдается падение напряжения на 2 секции 6 кВ на резисторах на 75%. При выводе из работы АД-4 наблюдается падение напряжения на $R=1200$ Ом на обм.АД-Хд на 45%.

Напряжение смещения нейтрали на 2 секции 6 кВ насосной станции в исходном состоянии системы находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8]. При включении АД-3 и АД-4 наблюдается возникновение смещения нейтрали на 2 секции на всех резисторах. При определении влияния коммутаций на стороне 0,4 кВ и при отключении АД-3 и АД-4 наблюдаются перенапряжения на 2 секции 6 кВ на $R=1200$ Ом на обм.АД-Хд. Проведенные измерения во 2 режиме показывают, что уровень напряжения смещения нейтрали находится в рамках допустимого отклонения $\pm 5\%$ в соответствии с нормами ГОСТ 32144-2013 [8].

Анализатор AR-5 производит до 40 измерений за период. Измерения производятся, если анализатор обнаруживает искажения. Уровень чувствительности принят достаточно высокий, т.е. записывается синусоида с низким уровнем искажений. Результаты измерений выбросов и провалов напряжения, спектра гармоник тока и напряжения показаны на графиках, сформированных по экспериментальным замерам в 1-3 дни проведения испытаний прибором AR-5. За время опыта в нормальном режиме работы и при включениях и отключениях двигателей приводов насосов значимых перенапряжений не зафиксировано.

Программы переключений высоковольтного оборудования на ВНС-02 приведены в таблице 3.

Данные результатов измерений спектров гармоник напряжения и кривых фазных напряжений при различных переключениях высоковольтного оборудования ВНС-02 приведены на рисунках 11 – 23.

Таблица 3 - Программа переключений высоковольтного оборудования на ВНС-02

Дни замеров	Время переключения	Вкл. – включение, откл. – отключение двигателя, № АД	Двигатели, продолжающие работу после переключения
1 день	0:00	---	3, 5
	2:05	откл. 5	3
	5:40	вкл. 1	1, 3
	7:00	вкл. 5	1, 3, 5
	8:25	откл. 5	1, 3
	17:00	вкл. 5	1, 3, 5
	23:00	откл. 1	3, 5
2 день	0:00	---	1, 3, 4
	2:10	откл. 4	1, 3
	3:05	откл. 1, 3	---
	3:20	вкл. 4	4
	5:05	вкл. 3	3, 4
	7:15	вкл. 1	1, 3, 4
	10:00	откл. 3, 4 вкл. 2	1, 2
	10:25	откл. 2 вкл. 3	1, 3
	16:00	откл. 3	1
	22:20	вкл. 3	1, 3
26.03.2014	2:00	откл. 1	3
	5:30	вкл. 4	3, 4
	9:15	вкл. 1	1, 3, 4
	23:25	откл. 1	3, 4

Примечание: к 1 секции 6 кВ подключены АД-1, АД-2; ко 2 секции подключены АД-3, АД-4.

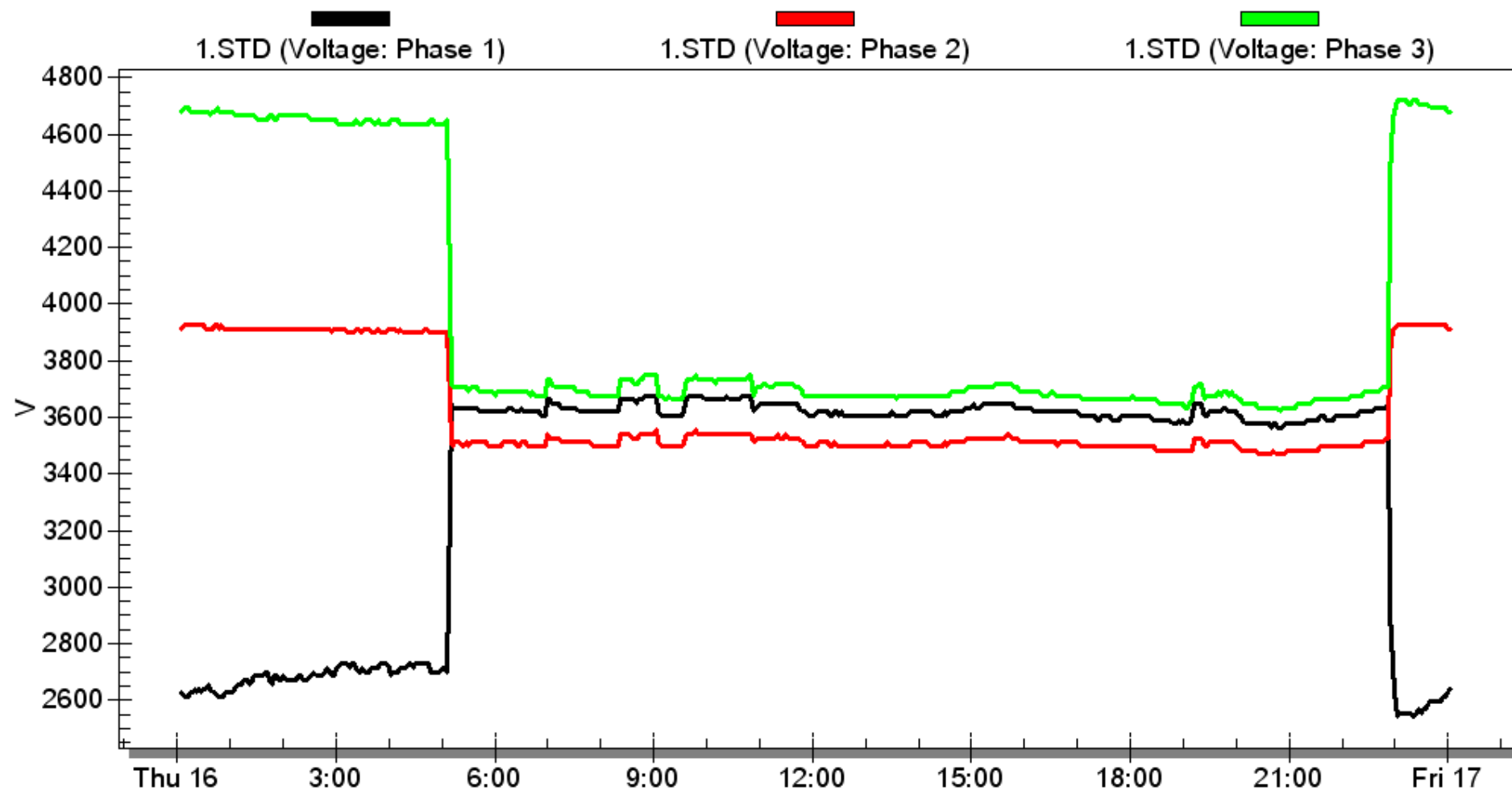


Рисунок 11 - Фазные напряжения на секции 1 ВНС-02 (1 день замеров)

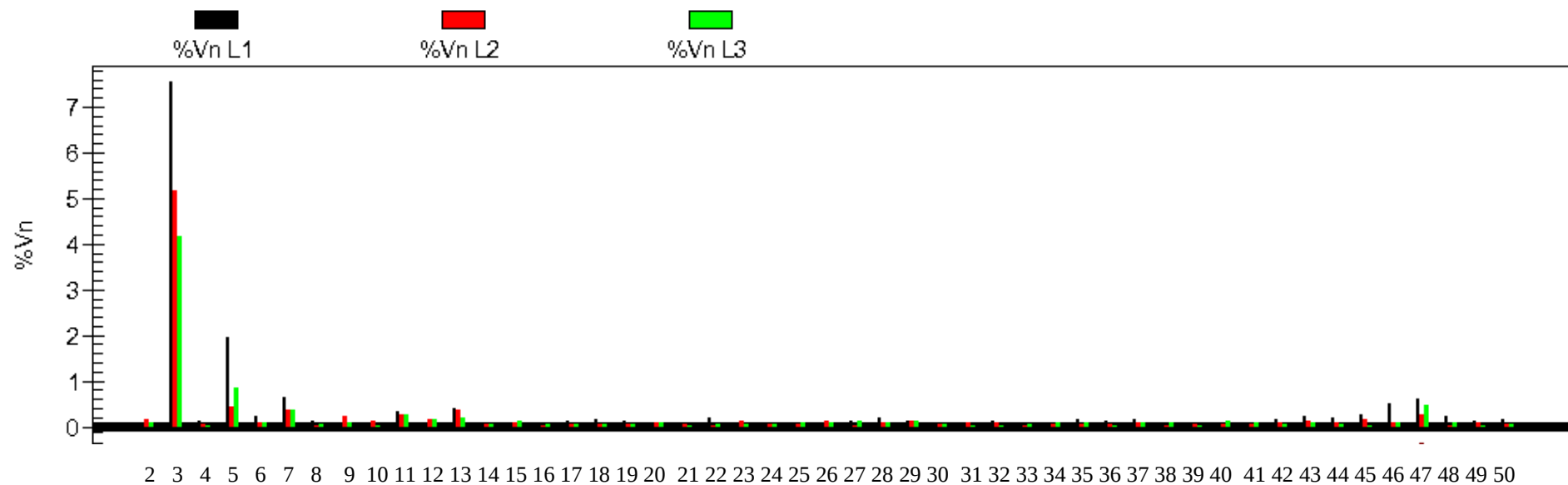


Рисунок 12 - Спектр гармоник напряжения при работе АДЗ – режим 1 (секция 1 ВНС-02), $K_U = 7,9 \%$

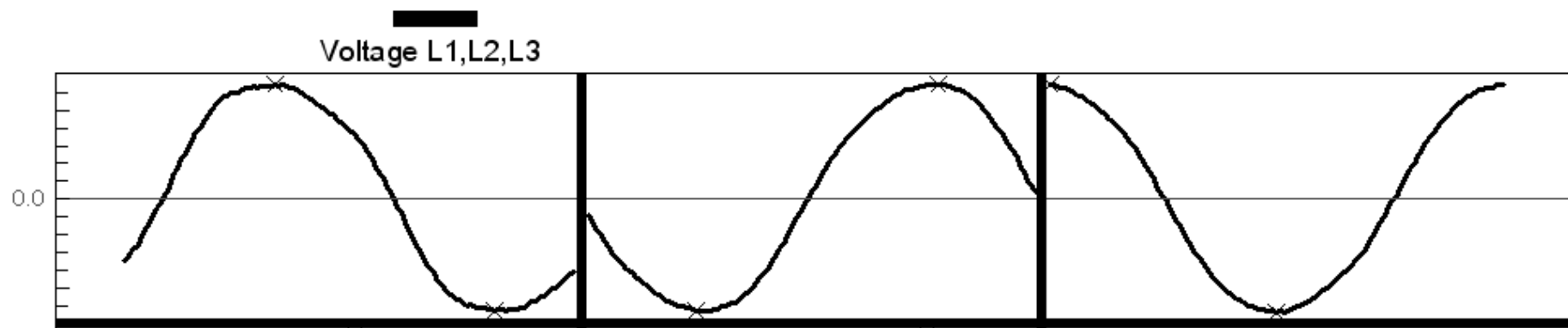


Рисунок 13 - Кривые фазных напряжений при работе АДЗ (секция 1 ВНС-02)

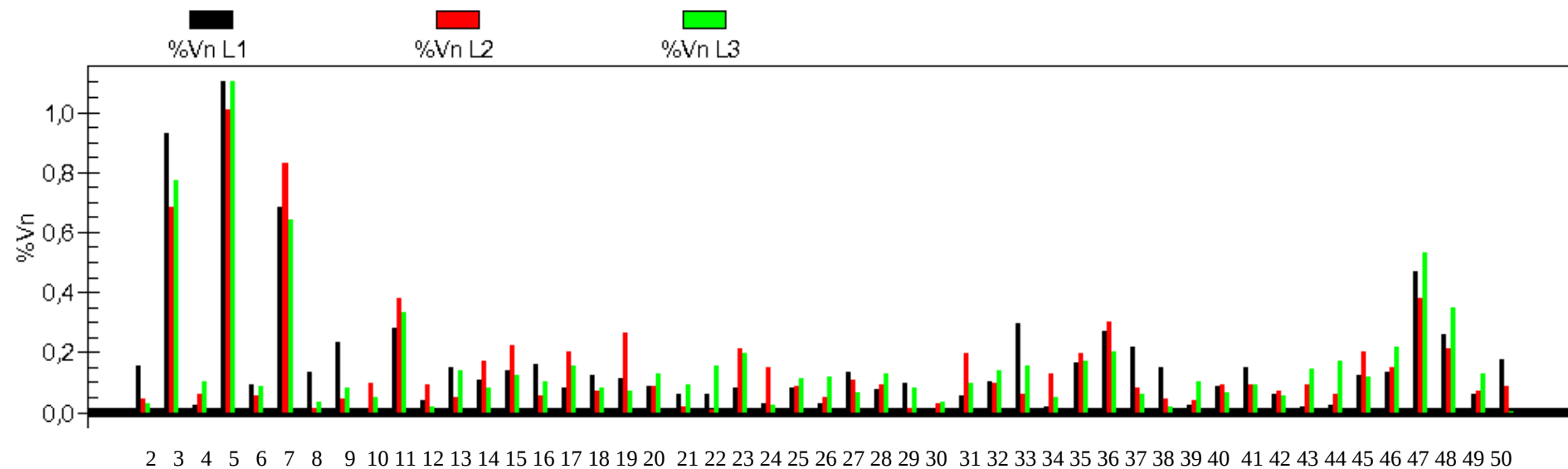


Рисунок 14 - Спектры гармоник напряжения при работе АД1, АД3 – режим 2 (секция 1 ВНС-02), $K_U = 1,9 \%$

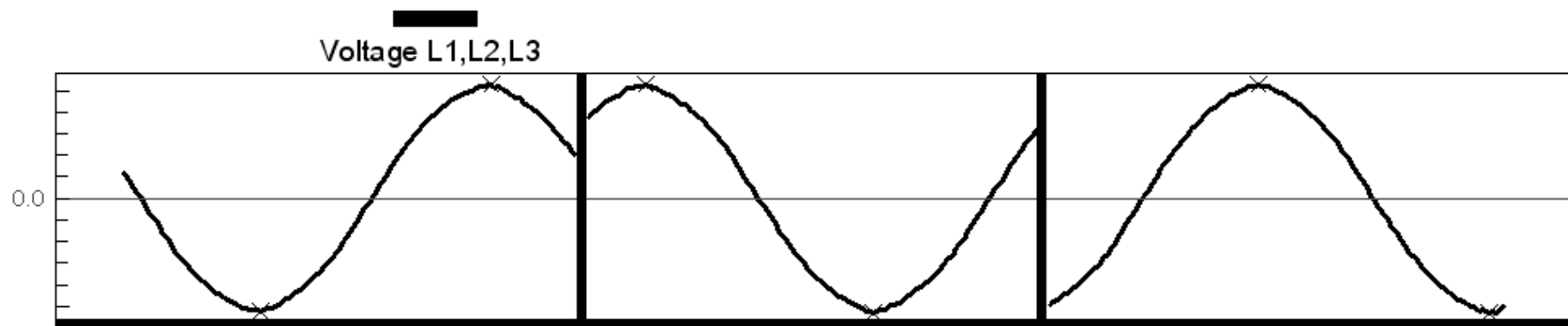


Рисунок 15 - Кривые фазных напряжений при работе АД1, АД3 (секция 1 ВНС-02)

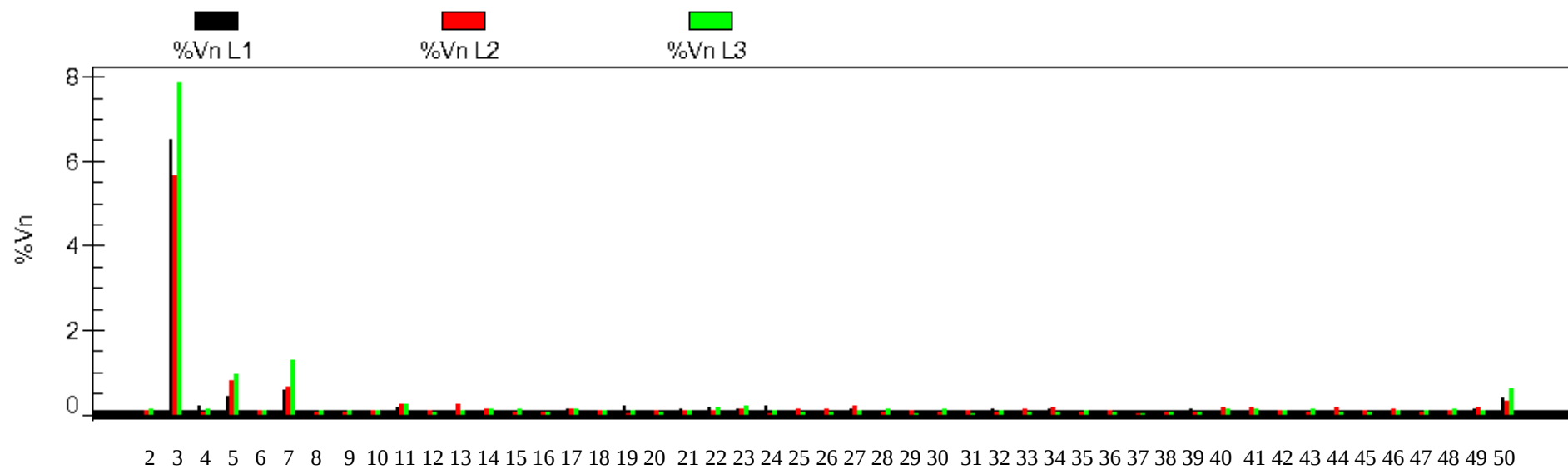


Рисунок 16 - Спектры гармоник напряжения при выключенных АД – режим 3 (секция 1 ВНС-02) , $K_U = 8\%$

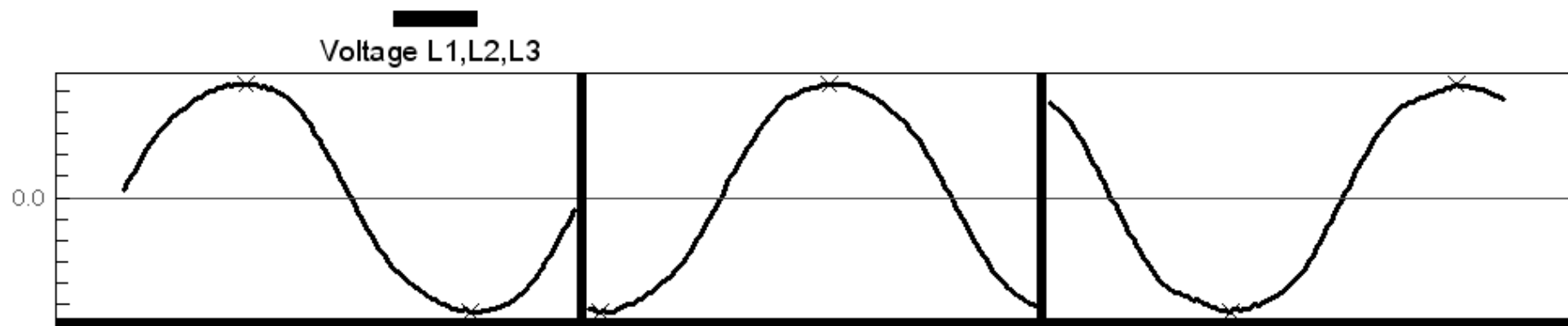


Рисунок 17 - Кривые фазных напряжений при выключенных АД (секция 1 ВНС-02)

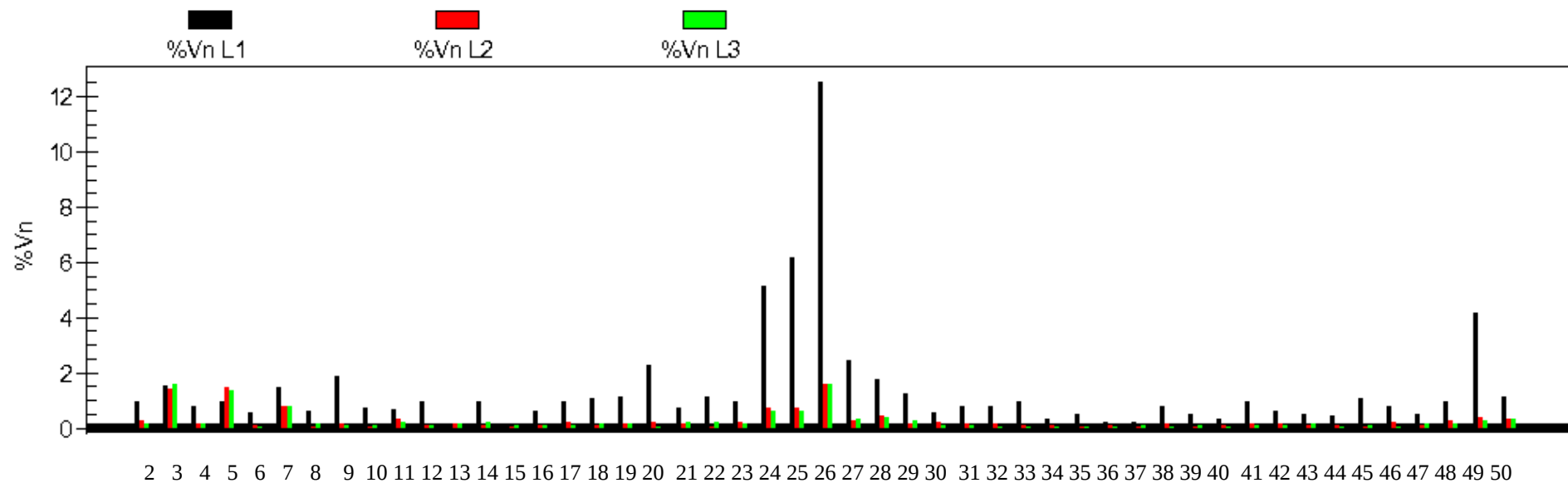


Рисунок 18 - Спектры гармоник напряжения при работе АД1, АД3, АД4 – режим 4 (секция 2 ВНС-02) , $K_U = 16,6 \%$

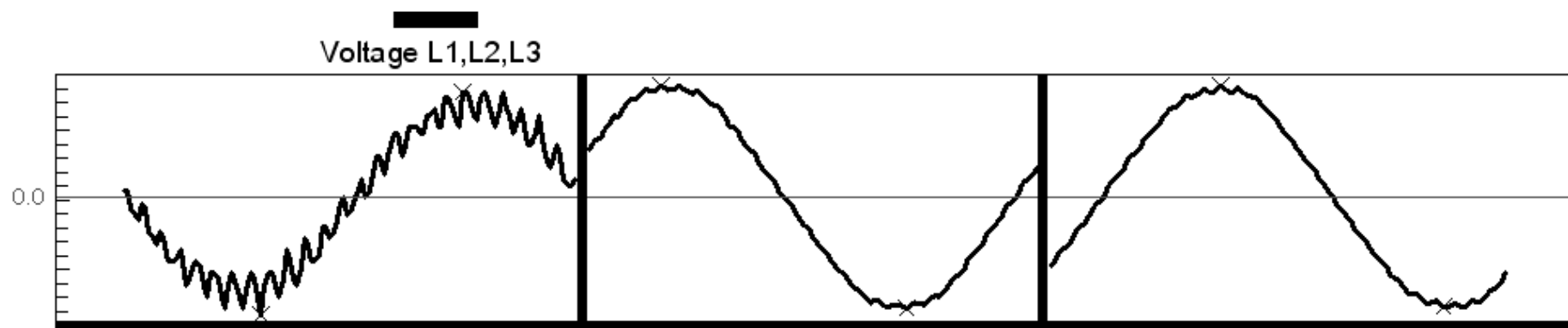


Рисунок 19 - Кривые фазных напряжений при работе АД1, АД3, АД4 (секция 2 ВНС-02)

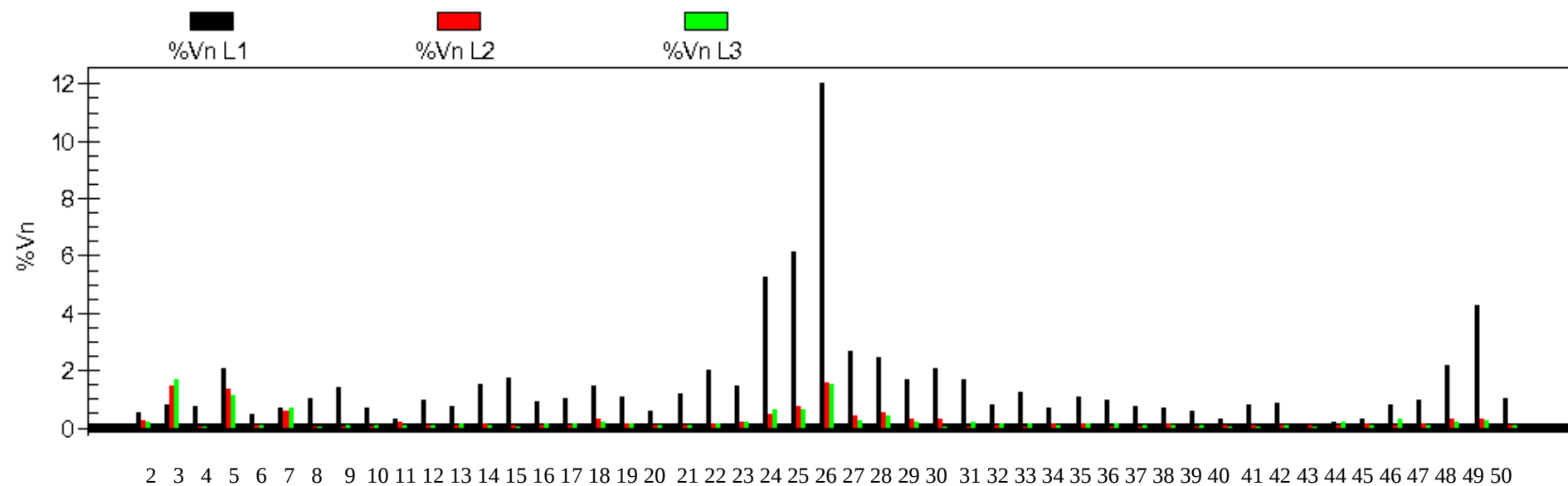


Рисунок 20 - Спектры гармоник напряжения при работе АД3, АД4 – режим 5 (секция 2 ВНС-02) , $K_U = 16,9 \%$

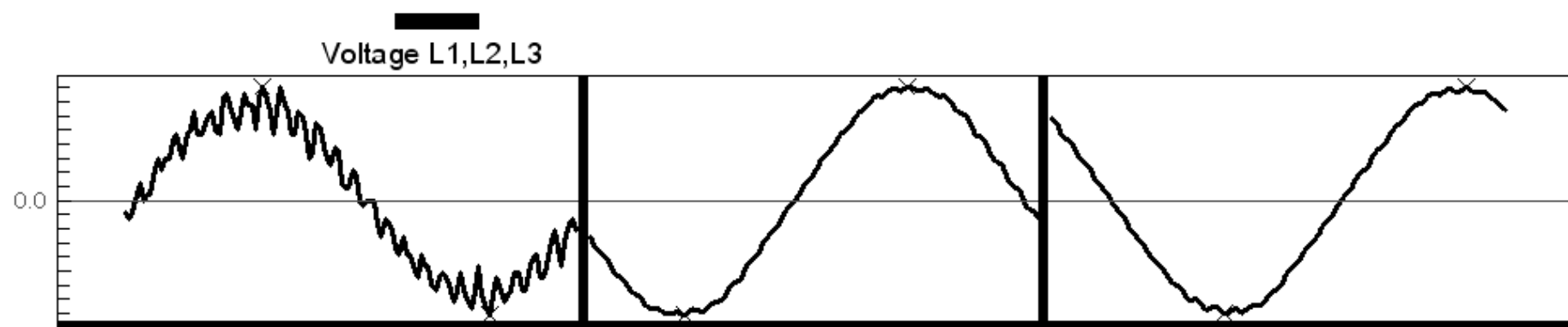


Рисунок 21 - Кривые фазных напряжений при работе АД3, АД4 (секция 2 ВНС-02)

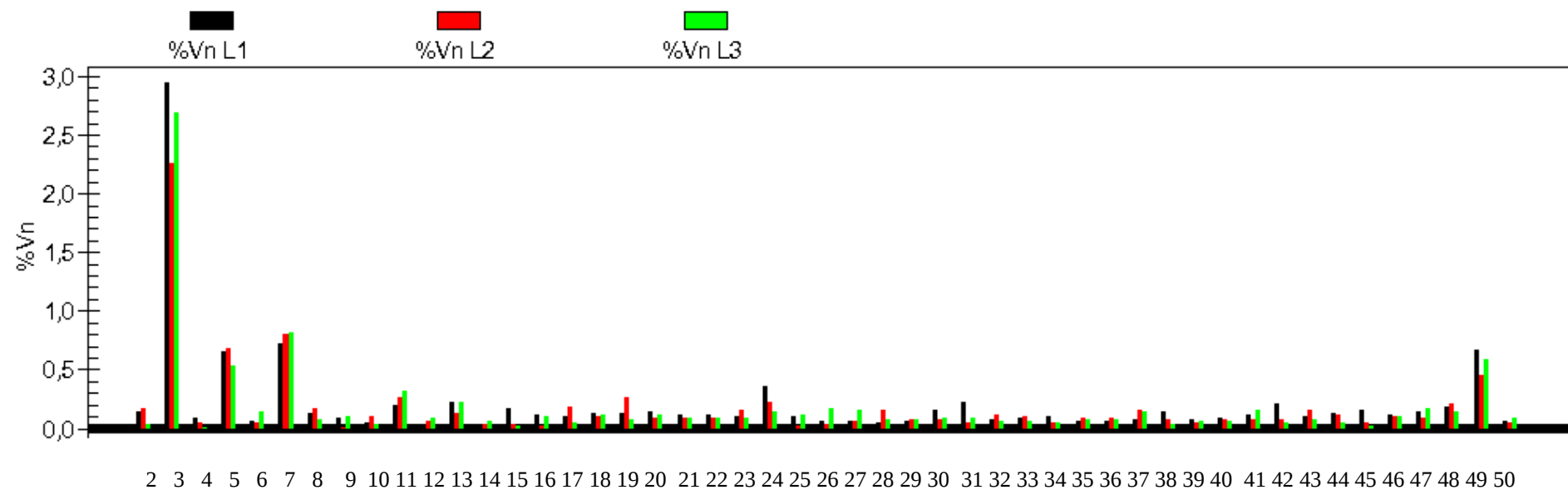


Рисунок 22 - Спектры гармоник напряжения при работе АДЗ – режим 6 (секция 2 ВНС-02) , $K_U = 3,3 \%$

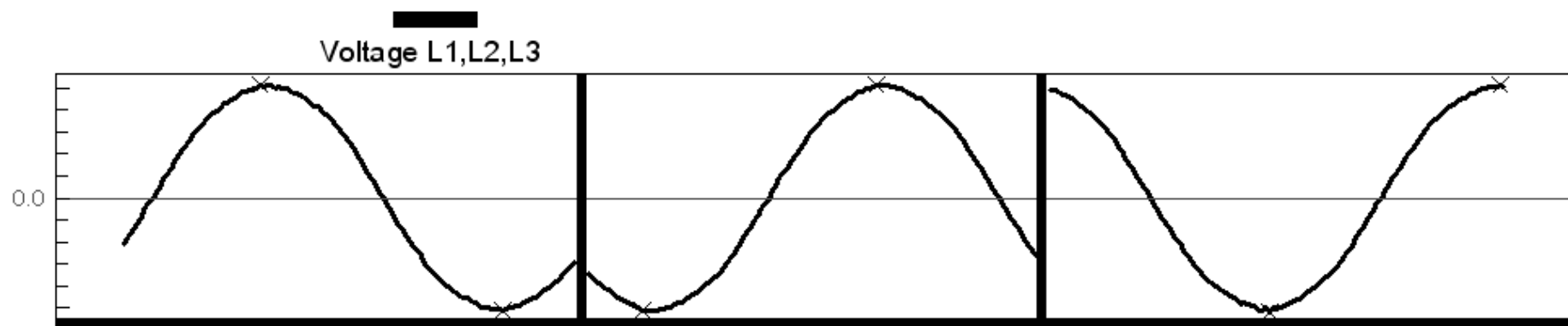


Рисунок 23 - Кривые фазных напряжений при работе АДЗ (секция 2 ВНС-02)

Из рисунков 12 - 23 видно, что значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на шинах 6 кВ на 1 и 2 секции ВНС-02 находятся пределах $K_U = 1,9 - 16,9 \%$. Для режимов 1, 3, 4, 5 значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения превышают нормально допустимое значение, установленное ГОСТ 32144-2013 [8] – в этих режимах наблюдался перекося фаз.

При $K_U = 16,9 \%$ значения коэффициентов напряжений гармонических составляющих: третьей - 1,9 %, пятой - 2,05 %, седьмой - 0,7%. Наибольшее значение имеют гармоники более высоких порядков: 24, 25 и 26-я – соответственно 5%, 6% и 12%.

При $K_U = 1,9\%$ наибольшие значения коэффициентов напряжений гармонических составляющих: третьей - 0,99%, пятой - 1,1% и седьмой - 0,8%.

Таким образом, в результате обработки и анализа данных инструментальных обследований на стороне 6 ЗРУ6 кВ ВНС-02 можно сделать вывод, что в сети 6 кВ наблюдается самопроизвольное смещение нейтрали, которое развивается без замыкания на землю (или с малыми токами замыкания на землю меньше 1 А). Феррорезонансные перенапряжения являются следствием самопроизвольного смещения нейтрали, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенных в таблицах 1, 2, а так же характерным спектром высших гармоник напряжения ЗРУ 10/6 кВ ВНС-02 – преобладанием 3, 5, 7 гармоник напряжения (рисунки 12, 16, 18, 20).

3 Регистрация кривых напряжения, показателей качества электроэнергии на стороне 10 кВ ЗРУ 10/6 кВ ВНС-02

Для производства измерений использована схема, приведенная на рисунке 2. Измерения проводились на ГПП 3 ОАО «Электросеть» (в настоящее время ЗАО «ССК»), секция 2, яч. 24, к которой подключен ввод 1 ВНС-02.

Результаты измерений выбросов и провалов напряжения, спектра гармоник напряжения анализатором AR-5 показаны на графиках, полученных по результатам экспериментальных замеров 16.05.2014, когда на ВНС-02 перекося фазных напряжений и выделение озона не наблюдалось, и 19.05.2014, когда был отмечен перекося фазных напряжений и выделение озона. В работе на ВНС-02 находились двигатели АД-1, АД-3. Данные результатов измерений на шинах 10 кВ ГПП-3 приведены на рисунках 24-35.

В результате выполненных замеров получено, что перекося фаз на шинах 10 кВ ГПП-3 не наблюдалось и значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения не превышали нормально допустимых значений, установленных ГОСТ 32144-2013 [8] и составили $K_U = 1,5\%$.

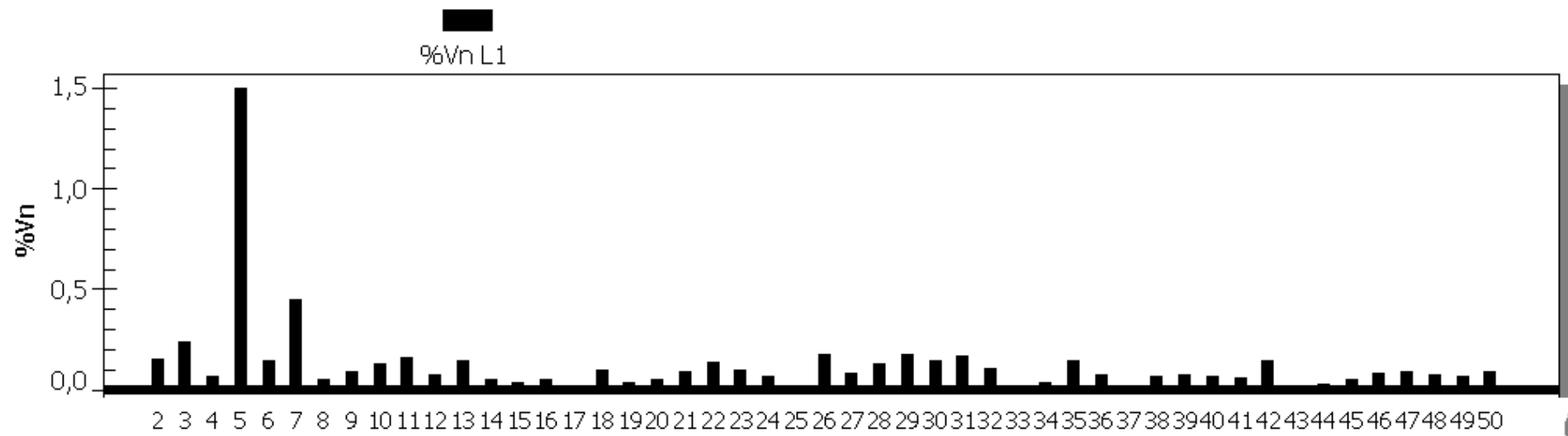


Рисунок 24 - Спектр гармоник напряжения в фазе А (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 16.05.2014

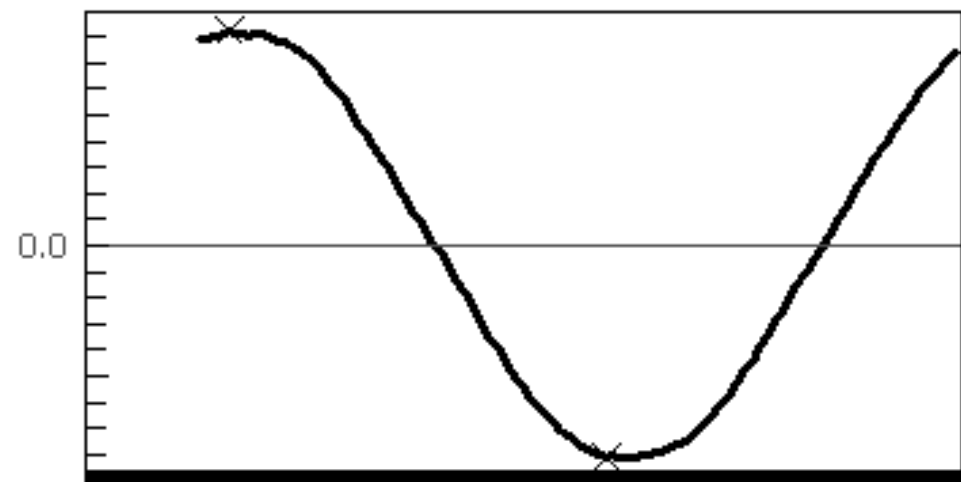


Рисунок 25 - Кривая фазного напряжения в фазе А (яч.24 ГПП-3) , замеры выполнены 16.05.2014

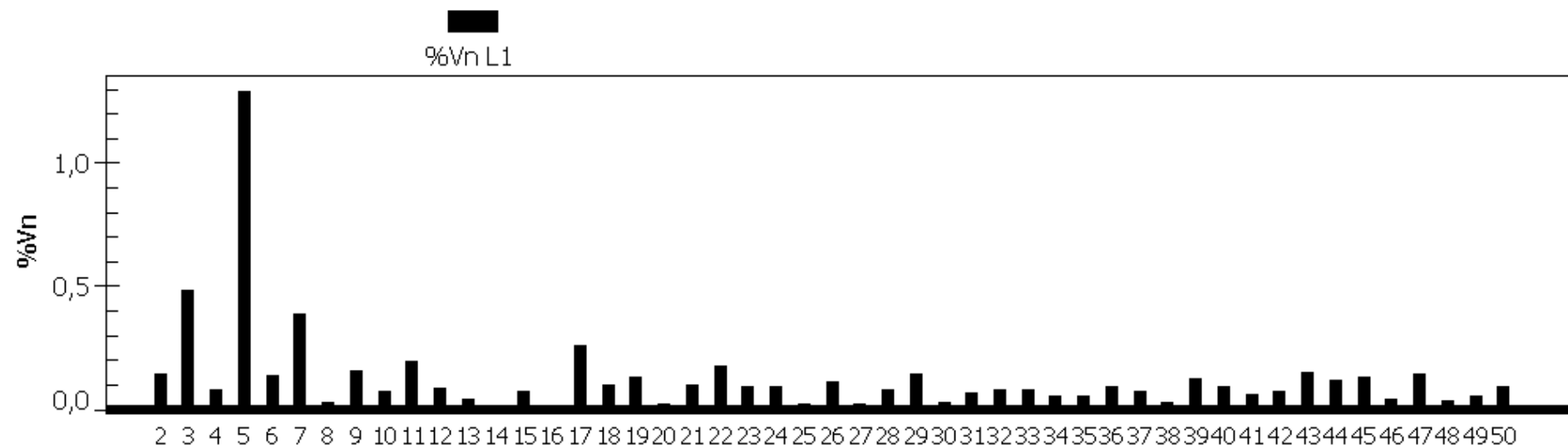


Рисунок 26 - Спектр гармоник напряжения в фазе В (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 16.05.2014

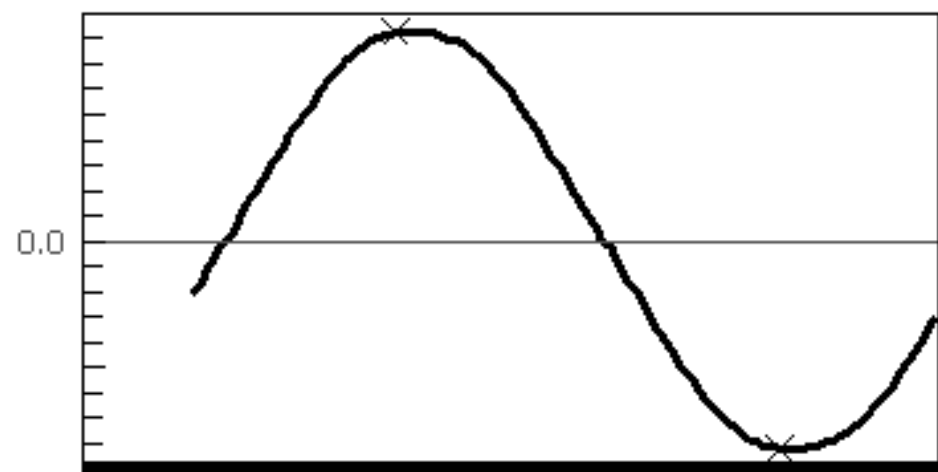


Рисунок 27 - Кривая фазного напряжения в фазе В (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 16.05.2014

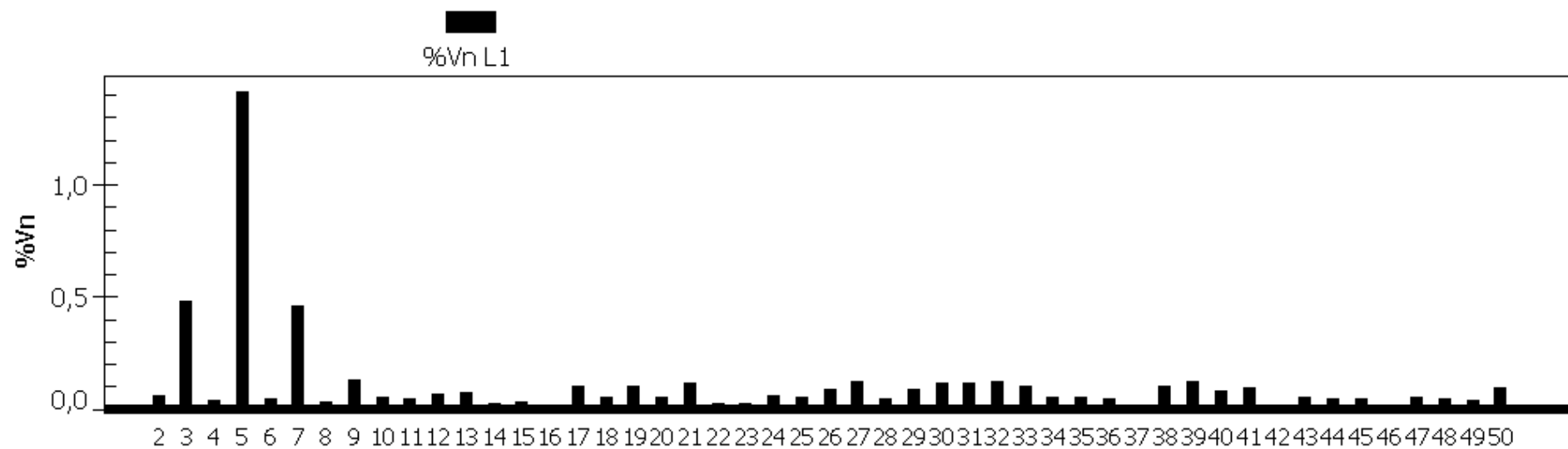


Рисунок 28 - Спектр гармоник напряжения в фазе С (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 16.05.2014

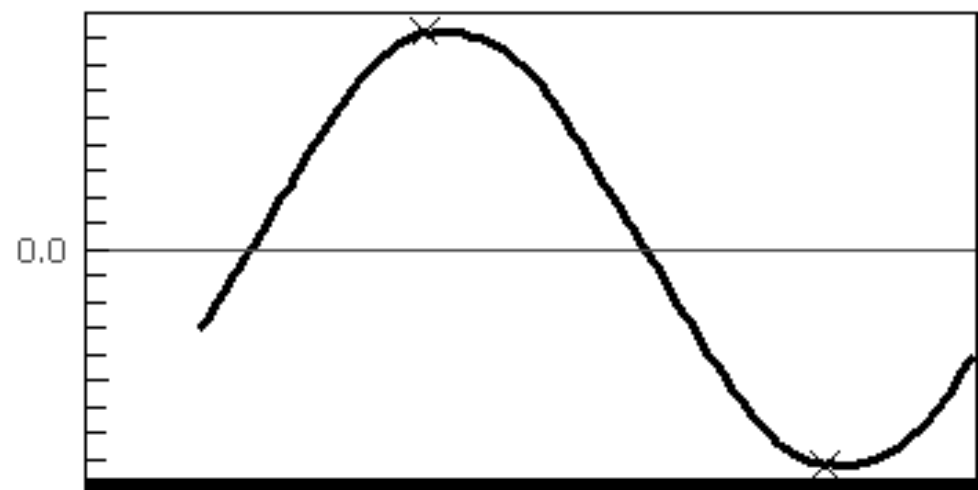


Рисунок 29 - Кривая фазного напряжения в фазе С (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 16.05.2014

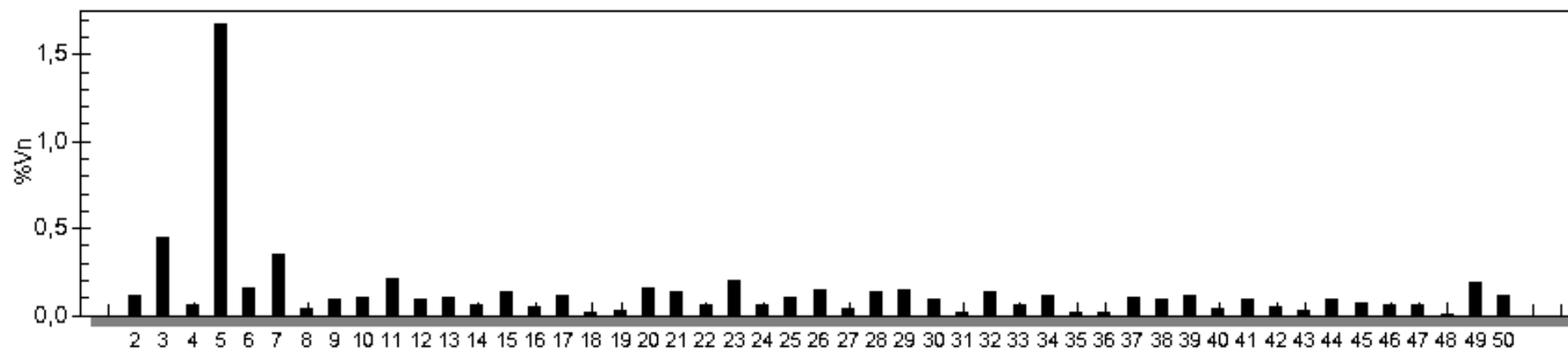


Рисунок 30 - Спектр гармоник напряжения в фазе А (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

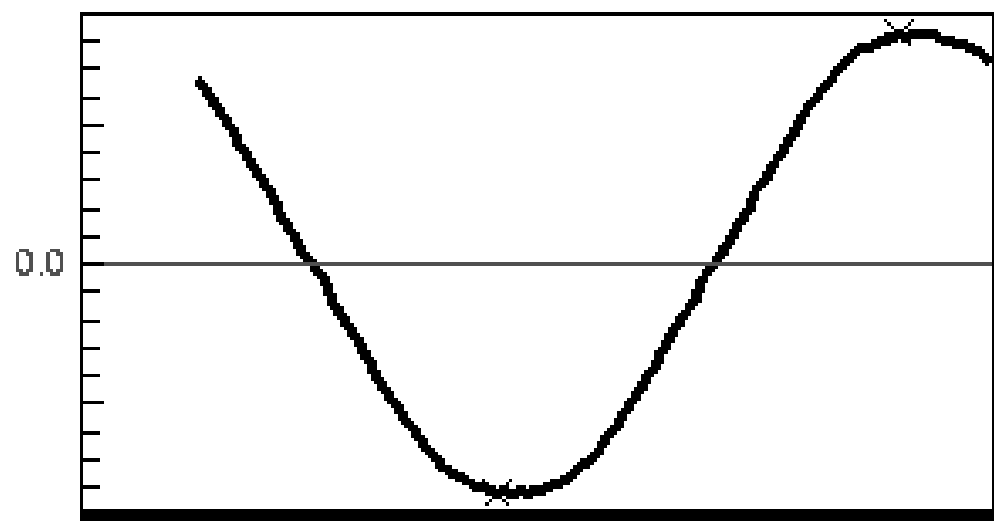


Рисунок 31. Кривая фазного напряжения в фазе А (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

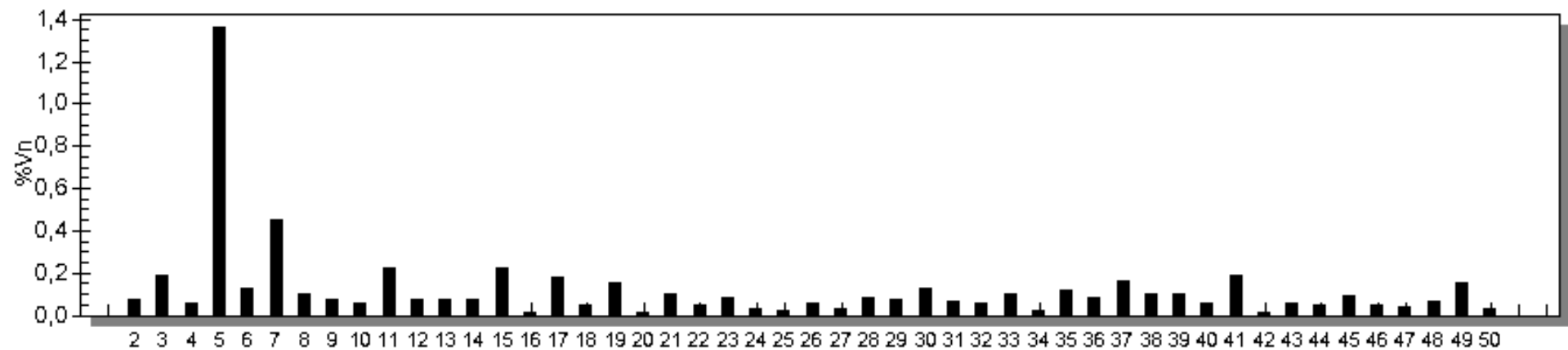


Рисунок 32 - Спектр гармоник напряжения в фазе В (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

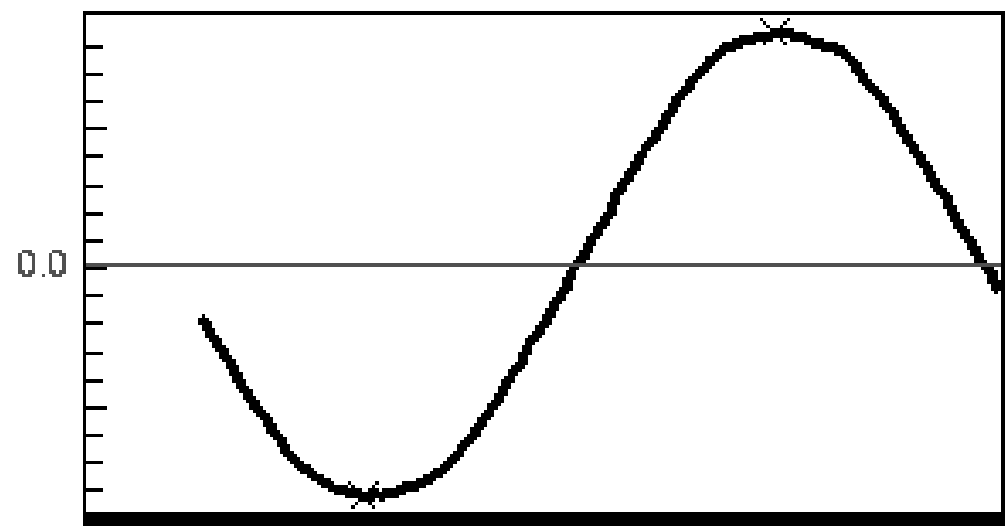


Рисунок 33 - Кривая фазного напряжения в фазе В (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

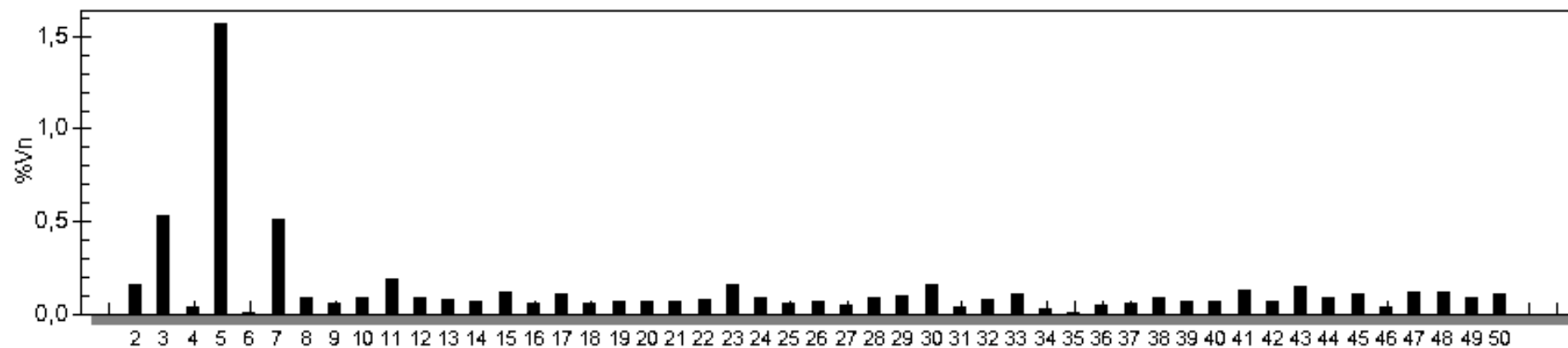


Рисунок 34 - Спектр гармоник напряжения в фазе С (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

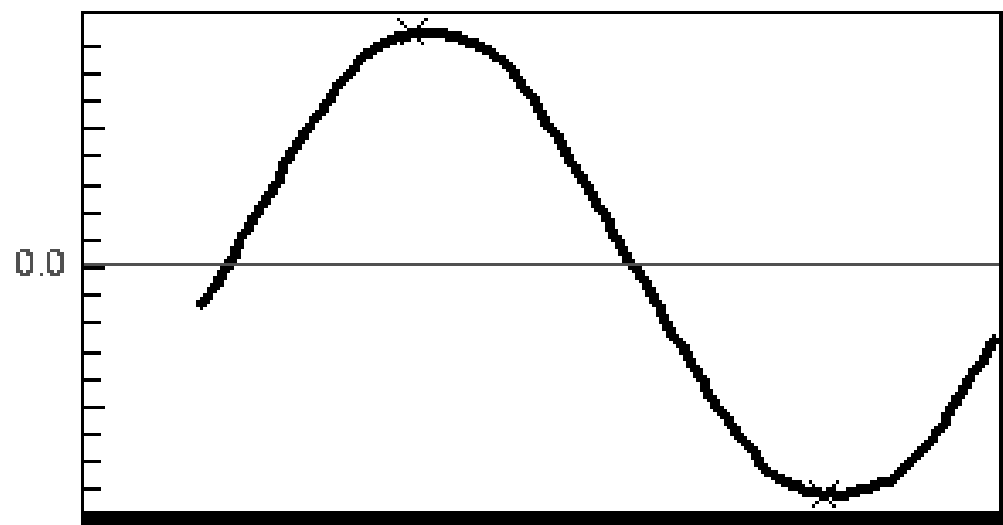


Рисунок 35 - Кривая фазного напряжения в фазе С (яч.24 ГПП-3), замеры выполнены 19.05.2014

4 Расчет токов ОЗЗ в сети 6 кВ насосной ВНС-02

Расчет произведен в соответствии с «Руководством по выполнению заземления нейтрали промышленных электрических сетей 6-35 кВ» [5].

Значение емкостного тока однофазного замыкания на землю определяется как сумма емкостных токов присоединений, электродвигателей напряжением выше 1 кВ, присоединенных к данной сети с учетом емкости распределительных устройств, по формуле:

$$I_c = (\Sigma I_{c.кл.} + \Sigma I_{cd}) \cdot K_{py}, (A), \quad (5.1)$$

где K_{py} - коэффициент, учитывающий увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю за счет емкости оборудования распределительного устройства. Для кабельной сети 6 кВ величина $K_{py} = 1,05$;

$I_{c.кл.}$ - собственный емкостной ток однофазного замыкания на землю кабельной линии присоединения состоящей из m параллельных кабелей длиной l км. Определяется по формуле:

$$I_{c.кл.} = I_{co} \cdot l \cdot m, (A), \quad (5.2)$$

где I_{co} (А/км) - значение собственного емкостного тока единицы длины (l км) кабельной линии. Составляет для кабеля 6 кВ:

для марки ААШВ-3 х 150 -1,1 А/км,

для марки АСБГ- 3 х 35 - 0,52 А/км.

I_{cd} - собственный емкостной ток отдельных электродвигателей. Значение определяется по данным завода изготовителя, либо вычисляется по формуле:

$$I_{cd} = 2\pi f \cdot 3U_H \cdot 0,0187 \cdot S_{НОМ} 10^{-3} / \sqrt{3} \cdot 1,2 \cdot \sqrt{(1+0.08U)}, (A). \quad (5.3)$$

Значение $I_{сд}$ получается в амперах, если номинальная частота сети f выражена в герцах, номинальная мощность электродвигателя в МВА, а номинальное напряжение в кВ.

Расчетные значения емкостного тока для каждой секции 6 кВ и каждого присоединения приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Расчетные значения емкостного тока

№ присоед. (яч.)	Наименование присоединения	Наименование подключенного оборудования	Ток ОЗЗ, А
4	ТСН-1	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 22 м	0,011
6	АД-1	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 40 м Электродвигатель 6 кВ, тип А4-355х315	0,02 0,006
7	АД-2	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 42 м Электродвигатель 6 кВ, тип А4-355х315	0,022 0,006
8	Ввод № 1	Кабель 6 кВ, ААШВ 3х150, длина 50 м	0,055
	1 секция шин	См. формулу (1)	0,126
11	Ввод № 2	Кабель 6 кВ, ААШВ, 3х150, длина 55 м	0,06
12	АД-3	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 46 м Электродвигатель 6 кВ, тип А4-355х315	0,024 0,006
13	АД-4	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 50 м Электродвигатель 6 кВ, тип А4-355х315	0,026 0,006
15	ТСН-2	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 16 м	0,008
17	АД-5	Кабель 6 кВ, АСБГ 3х35, длина 50 м Электродвигатель 6 кВ, тип А4-355х315	0,026 0,006
	2 секция шин	См. формулу (1)	0,17
	1 и 2 секции шин	Максимальный ток однофазного замыкания на землю	0,3

Анализ расчетных величин токов однофазных замыканий на землю в сети 6 кВ насосной ВНС-02 позволяет предположить, что есть как минимум три причины самопроизвольного смещения нейтрали и как следствие возникновение перенапряжений:

1. Наличие в сети присоединения с однофазным замыканием на землю;
2. Емкостная несимметрия;
3. Феррорезонансные процессы.

Первая причина отпадает, поскольку в результате высоковольтных испытаний однофазных замыканий не обнаружено.

Известно, что в электроустановках, имеющих малые значения токов однофазных замыканий, менее 1 А, высока вероятность самопроизвольных смещений нейтрали сети из-за емкостной несимметрии.

Физика явления представляется следующим образом. Вследствие несимметрии емкостей между отдельными фазами и землёй, а также изменений сопротивления холостого хода трансформатора напряжения в зависимости от приложенного к нему напряжения возможна частичная компенсация указанных емкостей (не на всех трех фазах) индуктивностью трансформатора напряжения.

При разном характере сопротивлений между фазами и землей происходит смещение нейтрали, которое может сопровождаться значительным возрастанием фазных напряжений. Это вызывает коронные разряды с выделением озона, а также усиленное повреждение изоляции.

Замыкания на землю при малых токах (менее 1 ампера) носят неустойчивый характер и могут существовать достаточно долго, так как не фиксируются защитами, реагирующими на величину тока нулевой последовательности. Минимальный первичный ток, при котором обеспечивается чувствительность защит, выполненных на реле типа РТЗ-50, подключенных к трансформатору тока типа ТЗЛМ, составляет 3 ампера [5].

Следует иметь ввиду, что в сетях с малыми ёмкостными токами возможно возникновение низкочастотных (субгармонических) колебаний в

контуре, состоящем из ёмкости фаз на землю и индуктивности трансформатора напряжения. Такие субгармонические колебания не сопровождаются значительным повышением напряжения, но опасны для трансформаторов напряжения, так как при этом в его первичных обмотках могут протекать большие токи.

Такие элементы сети как сборные шины распределительного устройства, трансформаторы, в отличие от кабелей, имеют естественную несимметрию емкостей фаз относительно земли. Сама по себе эта несимметрия мала по величине, и, как правило, несоизмерима с ёмкостями фаз кабелей. Однако в рассматриваемой сети, где ёмкость кабелей ничтожно мала, несимметрия шин и трансформаторов становится соизмеримой с ней.

5 Разработка рекомендаций по восстановлению стабильности нормальных фазных напряжений при электроснабжении электродвигателей 6 кВ насосной станции ВНС-02

В результате анализа схемы электроснабжения высоковольтных электродвигателей насосной станции ВНС-02, обработки и анализа данных инструментальных обследований на стороне 6 и 10 кВ ЗРУ-10/6 кВ ВНС-02, а также расчетных данных по токам однофазного замыкания на землю насосных станций, установлены причины возникновения самопроизвольного смещения нейтрали и феррорезонансных перенапряжений в сети 6 кВ, на основании чего разработаны рекомендации по восстановлению стабильности нормальных фазных напряжений на стороне 6 кВ ЗРУ-10/6 кВ ВНС-02.

1. На 1 секции, на релейной панели трансформатора напряжения, выполнить схему цепей защиты трансформатора напряжения НАМИТ-10-2 от феррорезонансных процессов в соответствии со схемой на рисунке 44 [16].

2. На 2 секции, на релейной панели трансформатора напряжения, типа НТМИ-6, в цепи обмотки $3U_0$ установить резистор 25 Ом, 400 Вт (рисунок 2).

3. С целью исключения перенапряжений фазных напряжений при неустойчивых однофазных замыканиях установить на сборных шинах 6 кВ на 1 и 2 секций по комплекту из трех ограничителей перенапряжения, типа ОПН - РС 6/7,6 кВ изготавливаемых АО ГК «Таврида-Электрик», г.Самара [9] (рисунок 45).

4. Поскольку известные защиты от замыканий на землю не могут селективно определять поврежденный фидер из-за недостаточной чувствительности, то отыскание поврежденного фидера производить путем поочередного отключения оперативным персоналом.

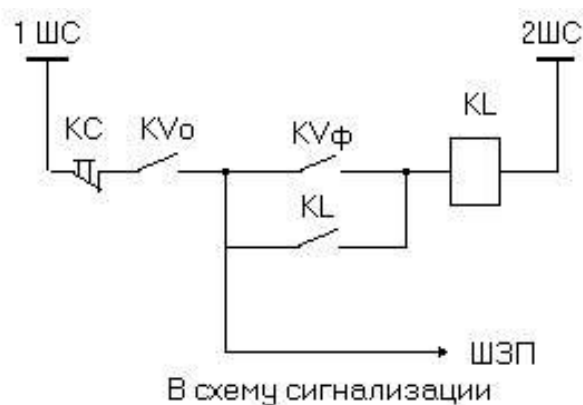


Рисунок 44 - Схема цепей защиты от феррорезонансных процессов трансформатора напряжения НАМИТ-10-2

KVo – реле напряжения РН-53/60Д; KVФ – реле напряжения РН-53/200; KL – промежуточное реле РП-25 или РП-23; КС – кнопка съема сигнала; ШС – шины сигнализации; ШЗП – шина предупредительной сигнализации

Заключение

В результате проведенных обследований ЗРУ-10/6 кВ ВНС-02 установлено, что при оперативных переключениях электрооборудования происходит самопроизвольное смещение нейтрали, которое вызывает перекос фазных напряжений. Это приводит к возникновению перемежающихся дуговых (коронных) разрядов в ослабленных местах изоляции статорной обмотки АД на корпус, что вызывает появление озона в помещении ВНС-02.

Установлено, что перемежающиеся дуговые замыкания на землю способствуют проявлению феррорезонансных явлений в сетях с малым емкостным сопротивлением и наличием нелинейного индуктивного сопротивления. Эти явления отрицательно сказываются на работе высоковольтных электродвигателей ВНС-02.

Разработаны рекомендации, позволяющие исключить самопроизвольное смещение нейтрали при оперативных переключениях электрооборудования ЗРУ-10/6 кВ ВНС-02 и снизить перенапряжения от феррорезонансных явлений.

Список использованных источников

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2015.
2. Правила устройств электроустановок. – 7-е изд. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2009.
3. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2009.
4. ГОСТ 1516.3 – 96. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. - М.: Изд-во стандартов, 1998.
5. Руководство по выполнению заземления нейтрали электрических сетей 6 – 35 кВ. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.
6. Приказ Минэнерго России от 30.06.2014 № 400 «Об утверждении требований к проведению энергетического обследования и его результатам и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования» (Зарегистрировано в Минюсте России 03.12.2014 N 35079).
7. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика выполнения измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2010.
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014.
9. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения/ Под ред. И.М. Баумштейна и С.С. Бажанова. – 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2012.

10. Перенапряжения в электрических системах и защита от них/ В.В. Базуткин и др. - СПб.: Энергоатомиздат, 2013.
11. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ/ Под ред. Ф.А. Гиндуллин. - М.: Энергоатомиздат, 2011.
12. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсация емкостных токов/ Ф.А. Лихачев. - М.: Энергетика, 2009.
13. Электрические машины : Трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; под ред. И.П. Копылова. – М. : Высш. школа, 2012.
14. Дергилев, М.П. Перенапряжения в сетях 6-10 кВ с двигательной нагрузкой при различных способах заземления нейтрали / М.П. Дергилев, М.К. Обабков. // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 - 35 кВ : сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск, 2014.
15. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей/ И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. - Киев: Наук. думка, 2005.
16. Левин, В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи/ В.Н. Левин. - М.: Энергия, 2014.
17. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.4/ Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов); 8-е изд., испр. и доп. М: Издательство МЭИ, 2002.
18. Electrical equipment for a.c. voltages from 1 to 750 kV. Requirements for dielectric strength of insulation : interstate standards. – М., 2010.
19. IEEE Recommended Practice for Ground of Industrial and Commercial Power Systems // Published by the IEEE inc. NG 2012.
20. William, R. Earthing in high voltage systems / William, R. - Blacksburg, Virginia. January 2003. –173 p.

21. IEEE Working Group progress report : Impulse voltage strength of a.s. rotating machines// IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 2013. - №8. – vol.100. – p.4041-4044.

22. Zotos, P.A. Motor Failure due to Steep Fronted Switching Surges / P.A. Zotos // IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 2014. - №6. – vol.30. – P. 1514-1524.