

УДК 622.311.1:658.26

Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанций

Ю.М. Невретдинов, Г.П. Фастий, В.В. Ярошевич

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН;

Апатитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики

Аннотация. Выполнен анализ результатов регистраций показателей качества электроэнергии на шинах питающей подстанции ПС-40А Ковдорской группы подстанций. Показано, что энергосистема и нагрузка на стороне 35 кВ не включают источники ухудшения качества электроэнергии и контроль искажений напряжения в точке общего присоединения нескольких потребителей недостаточен для локализации искажающих источников.

Abstract. Electrical energy quality indexes registration results analysis has been performed on buses of a supply substation 40A of Kovdor substation group. The power system and 35 kV side load do not include electrical energy quality decreasing sources; voltage distortions control in the common connection point of several consumers are insufficient for distorting sources localization.

1. Введение

Необходимость сертификации электроэнергии по показателям, установленным ГОСТ 13109-97, регламентируется Законом Российской Федерации "О защите прав потребителей" и Постановлением Правительства России от 13.08.1997 г. № 1013. Актуальность контроля качества электроэнергии связана с увеличением доли электроустановок, искажающих качество электроэнергии (КЭ), а также электроприемников с повышенными требованиями к КЭ. К искажающим установкам относятся мощная промышленная специфическая нагрузка, в том числе электрифицированный транспорт, тиристорные преобразователи, плавильные и электролизные установки, а также приборы с импульсными источниками питания (ГОСТ, 1997).

При выявлении таких источников возникают трудности, вызванные незаинтересованностью промышленных предприятий. Так, в схеме электроснабжения населенного пункта г. Ковдор были выявлены искажения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и предъявлены соответствующие претензии к электроснабжающей организации. Предположительно искажения возникают по вине электроснабжающего предприятия или подключенных промышленных электроустановок. Задачей исследования было выявление уровней ПКЭ и локализация источника искажений.

2. Характеристика исследуемой подстанции

Объектом исследований является подстанция ПС-40А, питающая г. Ковдор, которая является основной в группе подстанций и включает ОРУ 150, 110, 35 и ЗРУ 6 кВ (рис. 1). На подстанции установлены два силовых трансформатора (Т-1, Т-2) и один автотрансформатор (АТ) связи с сетью 110 кВ.

Для рассматриваемого участка сети характерно: 1) значительное удаление (более 200 км) от ближайших электростанций и узла подключения к магистральной сети; 2) гальваническая связь между системами шин 6 кВ через токоограничивающие реакторы, что затрудняет локализацию источников искажений; 3) смешанный характер нагрузки на каждой из систем шин 6 кВ – городские сети, промышленные и иные потребители электроэнергии.

Из схемы (рис. 1) видно, что источниками искажений ПКЭ могут быть сеть 110 и 150 кВ, трансформаторы Т-1, Т-2 и АТ и потребители, подключенные к шинам 6 и 35 кВ.

3. Систематизация и анализ регистраций

3.1. Результаты регистраций отклонений установившегося напряжения

Для изучения характера искажений и локализации их источника были выполнены многочисленные регистрации (длительностью более 700 час) с помощью сертифицированных приборов серии "Парма" – РК3.01 и РК6.05, а также многоканального регистратора, разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН для одновременного контроля напряжения и токов в разных точках сети.

При регистрации на шинах 150 кВ (энергосистема) не зарегистрировано отклонений установившегося напряжения, превышающих нормально допустимые и предельно допустимые значения.

Зарегистрированные отклонения напряжения δU составили от -4,4 % до -2,1 %, т.о. интервал отклонений не превышает 2,3 %.

Результаты обработки регистраций на шинах 35 и 6 кВ подстанции ПС-40А приведены в таблицах 1 и 2. Здесь и далее обозначения ПКЭ даны в соответствии с ГОСТ 13109-97. Уровни отклонений напряжения, превышающие нормально допустимые значения, выделены курсивом, а уровни, превышающие предельно допустимые значения, выделены жирным шрифтом. По ГОСТ-13109-97 нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения соответственно равны $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети.

Как видно из табл. 1, полный объем регистраций на шинах 35 кВ составил 44 часа. За это время зарегистрированы отклонения установившегося напряжения по фазам, которые составили от +0,8 до +11,6 % на 1с-35 и от -2,2 до +12,6 на 2с-35. Это свидетельствует о неравномерном распределении отклонения напряжения по фазам, которое объясняется появлением несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Наибольшее за сутки значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} составило 4,67 % для 1с-35 и 6,99 % для 2с-35. Причем суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые и предельно допустимые значения составляет 100 % от расчетного периода регистрации (24 ч). Отклонения установившегося напряжения по прямой последовательности $U_{1(1)}$ на 1с-35 от +5,3 до +7,8 %, на 2с-35 от +4,7 до +7,8 %. Интервал отклонений составляет 2,5 % и 3,1 %, соответственно. Это объясняется изменением коэффициента трансформации питающих трансформаторов для поддержания напряжения на шинах 6 кВ (Методические указания, 2000).

Рис. 1.
Принципиальная
схема подстанции
ПС-40А
г. Ковдор

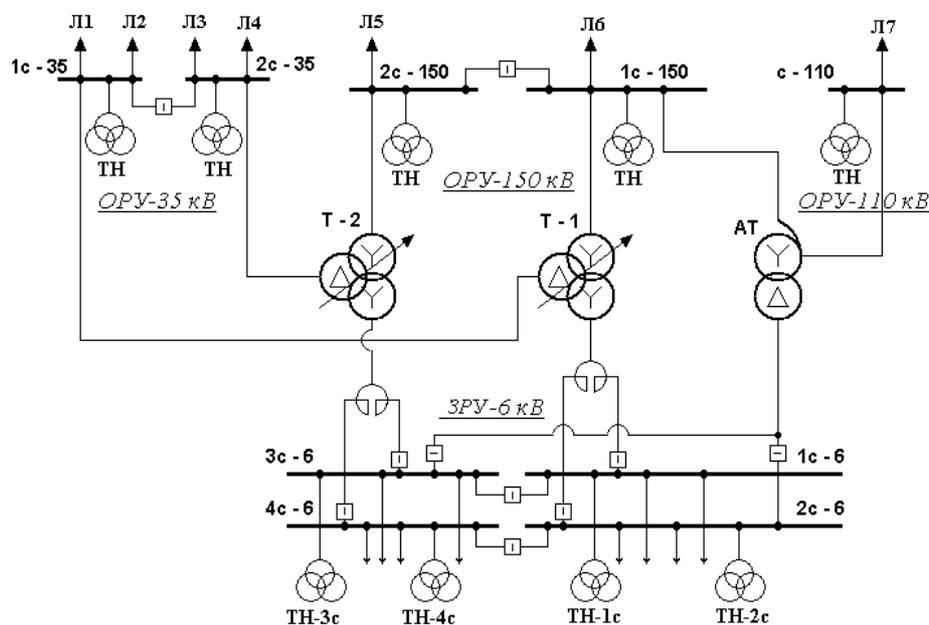


Таблица 1. Результаты систематизации регистраций уровня отклонений напряжения на шинах 35 кВ подстанции ПС-40А г. Ковдора

Место и время измерений	Отклонения, %			Выходы, %		
	Фаза	средн	НБ	НД	Пред	
ТН-1сш 35 кВ с 20.09.07 10 ⁴⁰ по 21.09.07 8 ²⁰	<i>U</i>					
	Фаза А	+2,0	+3,3	+0,8	0	0
	Фаза В	+10,3	+11,6	+9,2	100	63,2
	Фаза С	+7,3	+8,8	+6,1	100	0
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+6,4	+7,8	+5,3	100	0	
ТН-2сш 35 кВ с 12.09.07 16 ⁰⁰ по 13.09.07 14 ⁰⁰	Установившееся напряжение <i>U</i>					
	Фаза А	+9,1	+10,7	+7,3	100	20,2
	Фаза В	+11,2	+12,6	+9,5	100	90,3
	Фаза С	-0,7	+0,6	-2,2	0	0
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+6,4	+7,8	+4,7	98,3	0	

Таблица 2. Результаты систематизации регистраций уровня отклонений напряжения на шинах 6 кВ подстанции ПС-40А г. Ковдора

Место и время измерений	Отклонения, %				Выходы, %	
	Фаза	средн.	НБ	НМ	НД	Пред
ТН-1с 6 кВ с 10.09.07 15 ⁴⁰ по 11.09.07 15 ⁴⁰	Установившееся напряжение U					
	Фаза А	+0,7	+1,7	-0,7	0	0
	Фаза В	+3,6	+5,1	+1,9	0,1	0
	Фаза С	+8,0	+9,7	+6,3	100	0
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+4,0	+5,3	+2,7	4,7	0	
ТН-2с 6 кВ 120 ч	Установившееся напряжение U					
	Фаза А	+0,8 ÷ +6,0	+3,6 ÷ +7,5	-1,8 ÷ +3,0	0 ÷ 93,5	0
	Фаза В	+4,3 ÷ +9,0	+6,6 ÷ +10,4	+1,9 ÷ +7,4	36,9 ÷ 100	0 ÷ 8,9
	Фаза С	+7,4 ÷ +12,6	+10,1 ÷ +13,9	+4,9 ÷ +11,1	99,9 ÷ 100	0,2 ÷ 100
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+4,4 ÷ +9,1	+6,5 ÷ +10,3	+2,6 ÷ +7,9	37,0 ÷ 100	0 ÷ 2,9	
ТН-3с 6 кВ 237 ч	Установившееся напряжение U					
	Фаза А	-4,0 ÷ -3,3	-2,0 ÷ +6,5	-8,1 ÷ -5,6	0,1 ÷ 24,1	0
	Фаза В	+6,4 ÷ +9,6	+9,2 ÷ +16,5	+0,9 ÷ +8,0	85,8 ÷ 100	0 ÷ 45,5
	Фаза С	+9,2 ÷ +15,7	+10,2 ÷ +18,9	+4,1 ÷ +11,3	93,2 ÷ 100	3,2 ÷ 100
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+4,1 ÷ +6,6	+6,0 ÷ +13,7	-0,5 ÷ +6,9	10,9 ÷ 100	0 ÷ 12,8	
ТН-4с 6 кВ с 18.09.07 14 ¹⁰ по 19.09.07 14 ¹⁰	Установившееся напряжение U					
	Фаза А	-4,5	-2,9	-6,7	20,3	0
	Фаза В	+5,1	+7,6	+0,9	57,9	0
	Фаза С	+7,4	+11,0	+4,0	95,4	0,7
	Установившееся напряжение прямой последовательности $U_{1(1)}$					
	+2,5	+4,2	-0	0	0	

Зарегистрированные отклонения установившегося напряжения составили по результатам суточной регистрации: на 1с-6 от +2,7 до +5,3 % (интервал отклонений 2,6 %); на 4с-6 от 0 до +4,2 % (интервал отклонений 4,2 %). По результатам длительных регистраций на 2с-6 и 3с-6 интервал отклонений (за сутки) изменялся на 2с-6 от 2,4 до 6,4 % и на 3с-6 – от 0,9 до 11,5 %. Таким образом, наибольшие изменения напряжения выявлены для секций 2 и 3.

Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} составляет 6,36 % для 1с-6 и 9,22 % для 4с-6. Для 2с-6 и 3с-6 коэффициент K_{0U} зарегистрирован в диапазонах 4,14÷17,33 % и 7,98÷14,91 %, соответственно. Причем суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые и предельно допустимые значения за все время регистрации составляет 100 %.

Результаты регистрации показали, что наибольшие отклонения установившегося напряжения отмечаются на 2с-6 и 3с-6. Превышение предельно допустимых значений не выявлено на 1с-6, а на 4с-6 только на фазе С. Отклонения напряжения зарегистрированы как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, причем на отдельных фазах снижение напряжения достигает 8,1 %. Это подтверждает необходимость уменьшения коэффициента трансформации питающих трансформаторов. Значительные отклонения напряжения на шинах 6 кВ от -8,1 % до +18,9 % свидетельствуют о неравномерном распределении мощности нагрузки.

Регистрации на 2с-6 выявили значительную неравномерность изменений напряжения. На рис. 2 приведены примеры характерных изменений напряжения зарегистрированных на 2с-6 в течение суток 6 и 9 сентября 2007 г.

На рис. 2 видно, что величина отклонения напряжения достаточно велика и достигает 12-14 %. Отклонения имеют не системный (случайный) характер. Между искажающими воздействиями возможны перерывы (более двух суток). Приведенные регистрации показывают, что необходимы длительные регистрации в режиме мониторинга.

Из сопоставления уровня искажений напряжения на шинах 6, 35 и 150 кВ видно, что интервал отклонений имеет наибольшую величину на шинах 6 кВ, а наименьшую на шинах 150 кВ. При этом наибольшие отклонения зарегистрированы на 3с-6 и 4с-6. Наибольшие выходы отмечаются на 2с-6 и 3с-6. Поэтому изменения напряжения на шинах 150 кВ не могут являться причиной ухудшения ПКЭ у потребителя.

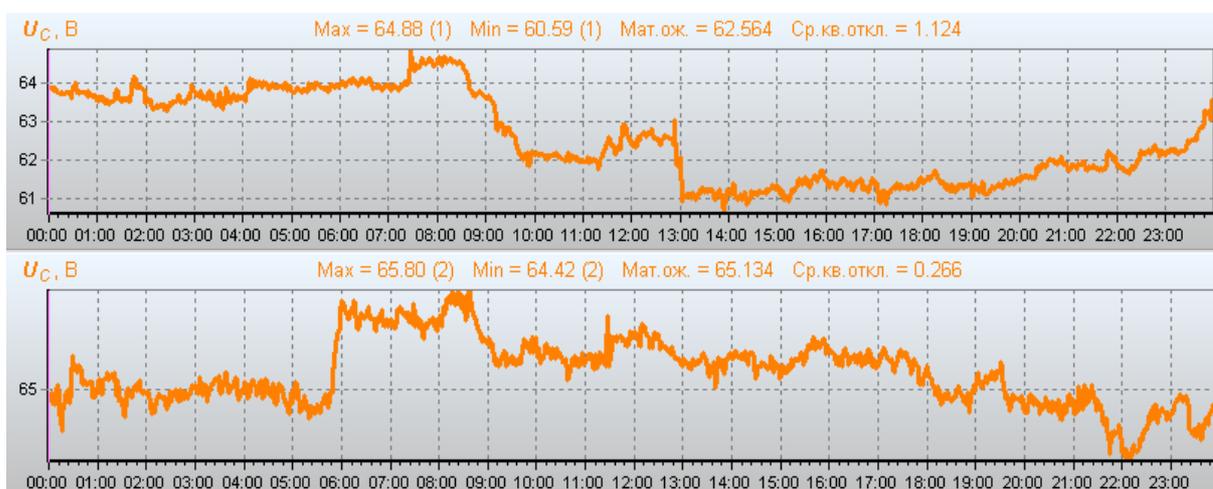


Рис. 2. Изменение напряжений на 2с-6 фаза С (регистрация прибором "Парма" РК3.01 на низкой стороне трансформаторов напряжения)

3.2. Результаты регистраций гармонических отклонений напряжения

Регистрации в режиме мониторинга позволили определить распределение уровней искажений синусоидальности напряжения на шинах подстанции ПС-40А. После проведения систематизации результатов зарегистрированных гармонических искажений выделены наиболее значимые гармоники, на которых присутствовали наибольшие искажения. Выборочно они приведены в табл. 3.

Результаты измерений гармонических искажений напряжения показали, что искажения присутствуют только на шинах, подключенных к трансформатору Т-2. Причем на шинах 150 кВ (2с-150) зарегистрированы искажения с превышением нормально допустимых значений в широком диапазоне нечетных гармоник – с 3 по 21-ю, а также превышение предельно допустимых значений 9, 13 и 15-ой гармоник. Графическая интерпретация зарегистрированных искажений на шинах 2с-150 приведена на рис. 3.

На рис. 3-6 приведены границы нормально и предельно допустимых значений, а также величина коэффициента гармонических искажений в виде диапазона значений за время регистрации.

Таблица 3. Результаты измерений гармонических искажений напряжения на шинах 6, 35 и 150 кВ подстанции ПС-40А

№ п/п	№ гармоники	ГОСТ 13109-97		Изменение коэффициента гармонических составляющих напряжения (%)	Система шин
		Ku(n)норм	Ku(n)пред		
1	3	0,75	1,13	0,66 ÷ 1,03	2 сш 150 кВ
2		1,5	2,25	0,54 ÷ 2,09	2 сш 6 кВ
3		1,5	2,25	2,35 ÷ 4,57	3 сш 6 кВ
4	6	0,3	0,45	0,27 ÷ 2,29	3 сш 6 кВ
5	7	1,0	1,5	0,81 ÷ 1,02	2 сш 150 кВ
6		3,0	4,5	3,01 ÷ 9,79	3 сш 6 кВ
7	8	0,3	0,45	0,33 ÷ 0,98	3 сш 6 кВ
8	12	0,2	0,3	0,19 ÷ 1,05	3 сш 6 кВ
9	14	0,2	0,3	0,13 ÷ 0,54	3 сш 6 кВ
10	15	0,3	0,45	0,26 ÷ 0,32	2 сш 35 кВ
11		0,3	0,45	0,19 ÷ 0,58	3 сш 6 кВ
12	16	0,2	0,3	0,04 ÷ 0,48	3 сш 6 кВ
13	18	0,2	0,3	0,13 ÷ 0,25	2 сш 35 кВ
14		0,2	0,3	0,02 ÷ 0,58	3 сш 6 кВ
15	20	0,2	0,3	0,01 ÷ 0,37	3 сш 6 кВ
16	21	0,2	0,3	0,24 ÷ 0,25	2 сш 150 кВ
17		0,2	0,3	0,22 ÷ 0,29	2 сш 35 кВ
18		0,2	0,3	0,04 ÷ 0,91	3 сш 6 кВ

Примечание: жирным шрифтом выделены системы шин, на которых есть превышения нормально допустимых значений.

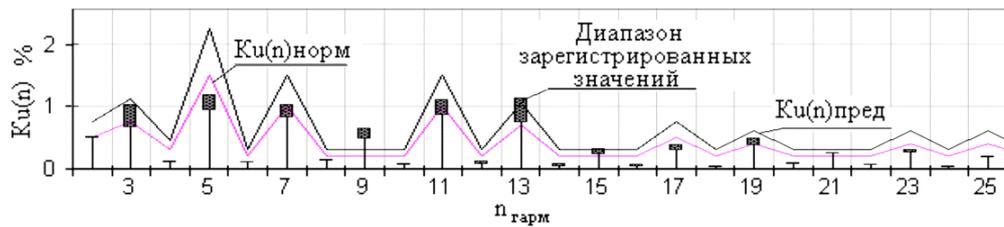


Рис. 3. Гармонические искажения напряжения на 2с-150 ПС-40А

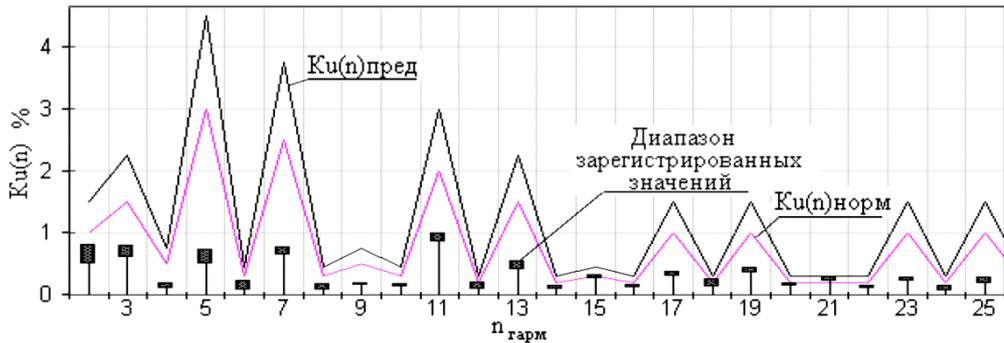


Рис. 4. Гармонические искажения напряжения на 2с-35 ПС-40А

На шинах 35 кВ (2с-35) гармоники, кратные 3 (12, 15, 18 и 21), превышают только нормально допустимые значения ($Ku(n)_{\text{норм}}$) и не превышают предельно допустимых ($Ku(n)_{\text{пред}}$). Причем суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода регистрации. Графическая интерпретация зарегистрированных искажений на шинах 2с-35, приведена на рис. 4.

Из табл. 3 видно, что наибольшие искажения зарегистрированы на шинах 6 кВ, в частности, на 3с-6. Однако на 4с-6 аналогичные искажения отсутствуют, хотя 3с-6 и 4с-6 гальванически связаны между собой через сдвоенный токоограничивающий реактор (см. рис. 1). Для сопоставления зарегистрированные гармонические искажения для 3с-6 и 4с-6 приведены на рис. 5 и 6.

На шинах 3с-6 (рис. 5) имеются наибольшие систематические искажения с превышением предельно допустимых значений в широком диапазоне четных гармоник (с 6-й по 20-ю) и нечетных (3, 7, 15 и 21), а также превышение нормально допустимых значений гармоник — с 3-й по 24-ю. Значения некоторых гармоник превышают предельно допустимые значения в несколько раз (6-й гармоники в 5 раз; 12-й — в 3,5 раза; 3, 9, 14 и 18 гармоник — почти в 2 раза).

На 4с-6 (рис. 6) искажений, превышающих нормально допустимые значения, не выявлено. Это можно объяснить влиянием токоограничивающего реактора, подключенного на вводах. В случае распространения искажений со стороны шин 35 и 150 кВ через силовой трансформатор Т-2 искажения на 3 и 4 системах шин были бы примерно одинаковы. По данным регистрации, гармонические искажения на шинах 6 кВ (1с-6, 2с-6), 35 кВ (1с-35) и 150 кВ (1с-150), подключенных к трансформатору Т-1, не зарегистрированы.

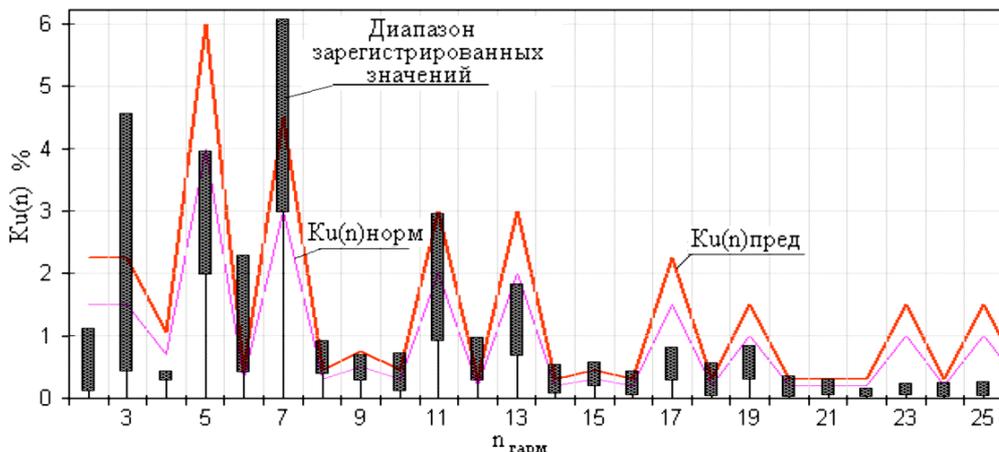


Рис. 5. Гармонические искажения напряжения на 3с-6 ПС-40А

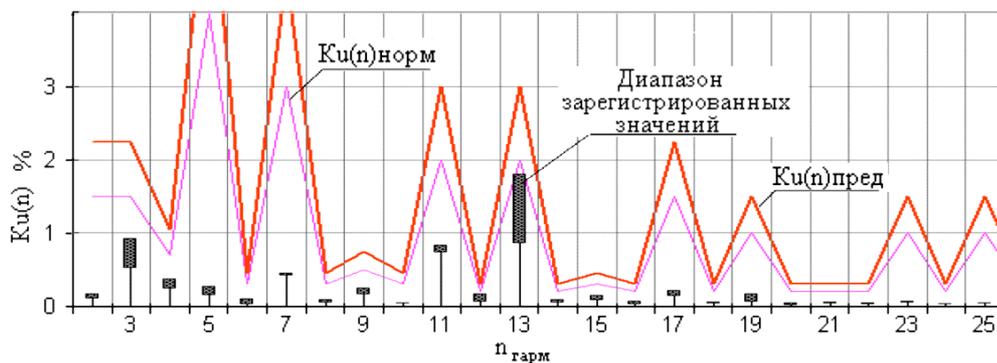


Рис. 6. Гармонические искажения напряжения на 4с-6 ПС-40А

Искажения синусоидальности напряжения на 3с-6 зарегистрированы как в рабочие, так и в выходные дни. При этом искажения на четных гармониках имеют систематический и длительный характер. На рис. 7 приведены примеры зарегистрированных изменений четных гармоник напряжения, превышающих нормально допустимое (0,3) и предельно допустимое (0,45) значение для 6-й и 8-й гармоник. Длительность (выходы) предельно допустимых значений достигала 99-100 % в течение суток.

Изменение гармонических искажений носит резкопеременный характер, причиной которых могут быть мощные преобразовательные установки с неравномерным рабочим графиком.

Сопоставление регистраций спектрального состава напряжения на шинах 6 кВ, 35 кВ и 150 кВ ПС-40А позволяет сделать вывод, что источниками гармонических искажений ПКЭ являются приемники, подключенные к 3с-6 кВ. На этой же системе шин зарегистрированы наибольшие отклонения напряжения с интервалом отклонений до 11,5 %.

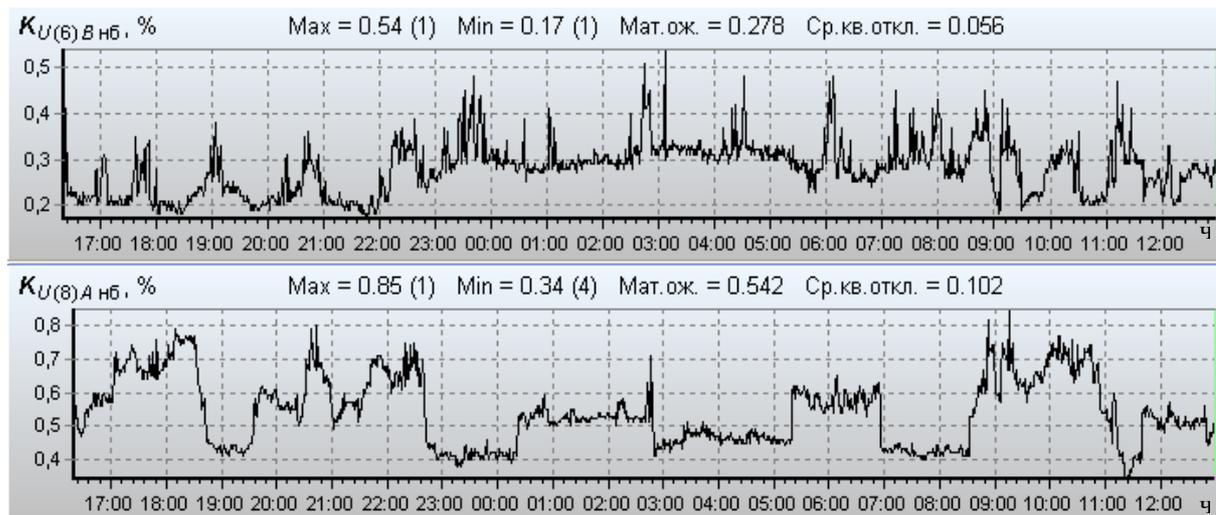


Рис. 7. Изменение 6 и 8 гармоник напряжения на 3с-6 кВ подстанции №40А

4. Изучение возможности локализации присоединений с источниками искажений

Для локализации присоединения с источником искажений с помощью регистрации качества напряжения необходима одновременная регистрация в точках сети, разделенных каким-либо элементом. Например, регистрация на шинах в ЗРУ 6 кВ и на шинах подстанции потребителя, разделенных силовым трансформатором и (или) токоограничивающим реактором. В связи с затруднениями экспериментальных регистраций напряжения на шинах потребителя рассмотрена возможность интерпретации регистраций токов с определением их спектра. Для этого выполнена регистрация токов на вводных выключателях и выключателях присоединений. Гармонический состав тока в сравнении со спектром напряжения непосредственно не позволяет определить источник искажения, т.к. определяется относительно переменной величины – тока в присоединении. Система шин 3с-6 включает восемь присоединений нагрузки, исключая ячейки вводов, подключение ТН, ТСН, конденсаторные батареи БСК и дугогасящего реактора УАРК. Поэтому определены действующие значения гармоник тока на присоединениях 3с-6 с наибольшей нагрузкой, т.е. на фидерах 30, 42, 44, 46 и 48. Распределение токов по гармоникам для указанных фидеров дано на рис. 8.

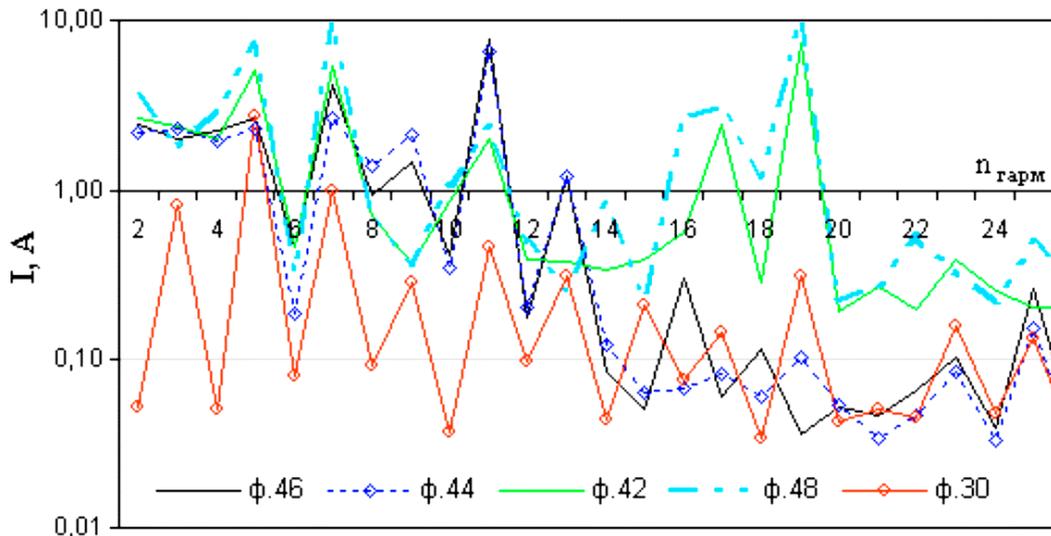


Рис. 8. Распределение токов по гармоникам на фидерах 30, 42, 44, 46, 48, подключенных к 3с-6

Анализ направления эмиссии гармонических искажений КЭ выполняем с учетом сопротивлений подключенной нагрузки. Расчетное сопротивление нагрузок составило на фидере 30 – около 79 Ом, на ф. 42 – около 18 Ом, на фф. 44 и 46 – 68 и 67 Ом соответственно и на ф. 48 – около 7,5 Ом. Например, для 11-й гармоники на фидерах 46 и 44 зарегистрированы наибольшие токи при относительно больших сопротивлениях нагрузки, поэтому можно предположить, что источники искажений находятся на этих присоединениях. Баланс токов каждой гармоники должен учитывать ответвление их в другие присоединения на этой же системе шин (3с-6), а также их ответвление в нагрузку 4с-6 и в сеть 35 и 150 кВ через реактор и силовой трансформатор. Расчеты показывают, что во внешнюю сеть (по отношению к 3с-6) ответвляется около 10 % тока гармоник. С учетом этих ответвлений во внешнюю сеть составление баланса токов для каждой гармоники затруднительно. Для 11-ой гармоники в предположении, что источники искажений находятся на фф. 46 и 44, сумма токов по этим фидерам составляет около 14,3 А, ответвление токов в другие присоединения 3с-6 составляет 4,8 А, следовательно, во внешнюю сеть должно ответвляться около 9,5 А, т.е. около 66 %.

Поэтому для определения источников искажений необходимо проведение регистраций токов гармоник, достаточных для составления точного баланса токов и определения их направления. Результаты выполненных регистраций показывают, что источники гармонических искажений могут присутствовать на нескольких присоединениях.

5. Заключение

- 1) Локализация источника искажений является сложной задачей, при решении, которой требуется большой объем сопоставительных измерений, необходимых для получения доказательной базы.
- 2) Анализ отклонений установившегося напряжения в различных точках питающей сети показал, что "виновниками" искажений могут быть потребители, подключенные к точкам общего присоединения, а не энергоснабжающая организация согласно Приложению А ГОСТ 13109-97.
- 3) Сопоставление регистраций спектрального состава напряжения на всех шинах позволяет определить только систему шин с подключенными источниками гармонических искажений, а не локализовать эти источники.
- 4) Для определения источников искажений необходимо проведение регистраций, достаточных для составления точного баланса гармоник токов с учетом их направления.

Литература

- ГОСТ 13109-97. "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения".
- Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. РД 153-34.0-15.502-2002. М., ОРГРЭС, 56 с., 2000.