

УДК 622.311.1:658.26

А.С. Карпов, В.В. Ярошевич

## ВЕРИФИКАЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ НА ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ

Кольский научный центр РАН

Для большинства электротехнических комплексов вследствие присутствия несимметричных и нелинейных нагрузок актуальными являются вопросы обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ). При этом оборудование, предназначенное для анализа качества электроэнергии (КЭ), присутствующее на электроэнергетическом рынке, отличается по характеристикам и критериям точности. Статья посвящена оценке расхождений двух анализаторов КЭ различных производителей по одинаковым ПКЭ. Оценка проведена с помощью синхронизированных измерений КЭ на действующей подстанции 10/0,4 кВ. Для проведения измерений выбрана четырехпроводная сеть с разнородной и несимметричной по фазам нагрузкой. Проведено сопоставление анализаторов КЭ по ключевым показателям – отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ , коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ), несимметрия напряжений (коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ , коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ), отклонение частоты  $\Delta f$ . Установлено, что при синхронной регистрации между сертифицированными приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» существует разница в измеряемых показателях, превышающая допустимый уровень погрешности.

**Ключевые слова:** анализатор качества электроэнергии, измерения в действующей высоковольтной сети, качество электроэнергии, локализация источников искажения, показатели качества электроэнергии, электрическая подстанция, электромагнитная совместимость.

### 1. Введение

Проблемы качества электроэнергии привлекли внимание многих исследователей, производителей и потребителей электроэнергии. Эти проблемы становятся всё более весомыми вследствие широкого использования несимметричных, нелинейных однофазных и трёхфазных нагрузок. В свою очередь, это всё более затрагивает сети электропередачи в частных, коммерческих и промышленных секторах. Ухудшение качества электроэнергии происходит как из-за возмущений, вызванных переходными процессами (броски и просадки напряжения, импульсные помехи) так и в установившихся режимах (гармонические помехи, несимметричность).

Все искажения должны иметь свои допустимые значения отклонений, установленные стандартами РФ [1-5]. Выход за них ведет к материальному ущербу для потребителей. Нормативной документацией установлена периодичность контроля качества электроэнергии: один раз в два года для всех показателей качества электроэнергии (ПКЭ), и два раза в год для отклонения напряжения [4, 6]. Помимо этого, анализ качества электрической энергии проводят при наличии претензий или замечаний от потребителей, а также в случае выявления существующих или потенциальных несоответствий по показателям качества электроэнергии [4, 7, 8].

### II. Характеристика исследуемой сети

Сеть Кольского научного центра (КНЦ РАН) является хорошим показателем того, как на одной секции шин могут размещаться совершенно разные потребители. Например, мощная трехфазная нагрузка приборов, экспериментальных лабораторий и больницы КНЦ создают скачки тока до 500 А. Они подключены к той же системе шин, что и остальные потребители с однофазной нагрузкой. Такое соседство приводит к искажениям напряжения на всей системе шин. Выражается это несимметрией, несинусоидальностью, провалами напряжениями и перенапряжениями. Именно в сети КНЦ (рис. 1) на ТП-92 10/0,4 кВ и проводились эксперименты.

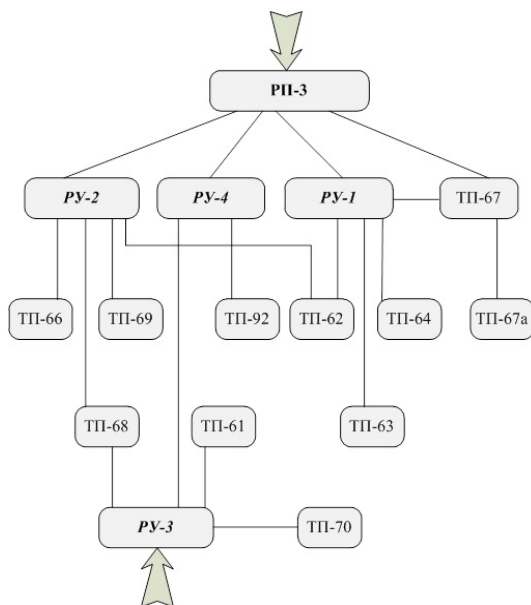


Рис. 1. Схема распределительной сети 10 кВ КНЦ РАН.

Анализируемая сеть (КНЦ РАН) расположена в городе Апатиты Мурманской области. Источником электроэнергии для потребителей КНЦ РАН являются подстанции ПС-24 и ПС-360 Централных электрических сетей филиала ОАО «МРСК Северо-Запада» «Колэнерго». С шин 10 кВ посредством двух кабельных фидеров (Ф-4 и Ф-20) запитаны распределительные подстанции РП-3 и РП-1, расположенные на значительном территориальном удалении друг от друга. Основным питающим узлом для объектов КНЦ РАН является подстанция РП-3. Питание от подстанции РП-1 рассматривается, как резервный источник электроэнергии. Ее особенности более подробно приведены в работе с участием авторов в 2015 году [9].

Проверка качества электроэнергии предполагает регистрацию напряжения и тока и сопоставлением полученных данных с существующими стандартами. Данная проверка проводилась на трансформаторной подстанции ТП-92 (Т-2).

Основными параметрами определения качества для сети 0,4 кВ являются: отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения (коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ , коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ), несимметрия напряжений (коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ , коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ), отклонение частоты  $\Delta f$ .

### III. Анализ сертифицированных анализаторов качества

Для измерения и дальнейшего анализа вышеперечисленных показателей применялось два регистратора: «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M», которые отличаются друг от друга (рис. 2). Сведем их основные параметры в табл. 1.



а.

б.

Рис. 2. Внешний вид регистраторов «Парма РК 3.01» (а); «Ресурс UF2M» (б)

Таблица 1  
 Параметры приборов «Ресурс UF2M» и «Парма РК 3.01»

Измерение ПКЭ	«Ресурс UF2M»	«Парма РК 3.01»
1. Установившееся отклонение напряжения $\delta U_y$ , %	+	+
2. Отклонение частоты $\Delta f$ , Гц	+	+
3. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}$ , %	+	+
4. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U}$ , %	+	+
5. Коэффициент искажения синусоидальности напряжений $K_U$ , %	+	+
6. Кратковременная доза фликера $P_{Si}$ , о.е.	+	-
7. Длительная доза фликера $P_{Li}$ , о.е.	+	-
8. Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$ , о.е.	+	-
9. Размах изменения напряжения $\delta U_1$ , %	+	-
10. Измерение токов	+	-
11. Измерение угла между напряжением и током	+	-
12. Длительность провала напряжения $\Delta t_{II}$ , с	+	+

По количеству измеряемых показателей качества электроэнергии «Ресурс UF2M» во многих аспектах превосходит «Парму РК 3.01». В отличие от РК 3.01, он способен измерять токи и угол между напряжением и током, а также кратковременную дозу фликера, длительность дозы фликера, коэффициент временного перенапряжения и размах напряжения. В то же время «РЕСУРС UF2M» представляет результаты в таком виде, что дальнейшая их обработка практически невозможна [10]. Оба измерительных прибора имеют одинаковый способ подключения – через токовые клещи – и не могут работать на постоянной основе. На рис. 3 показано подключение Ресурс UF2M к трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН). Присоединение Пармы РК 3.01 производится по аналогии с Ресурсом, но исключительно к выводам ТН.

#### IV. Анализ мониторинговых регистраций

Данные с двух регистраторов получены в форме протоколов, электронных массивов, которые могут быть представлены в виде таблиц и графиков. Полученные приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» первичные протоколы регистраций довольно громоздки, имеют большой объем. Протоколы имеют только количественную характеристику, а для оценки качества электроэнергии в сети необходим более детальный анализ.

Трансформаторная подстанция ТП-92 имеет две системы шин, на которой установлены 28 ячеек и два силовых трансформатора ТМ-630/10/0,4 (рис. 4). Регистрация ПКЭ проводилась при помощи «Парма

ПК 3.01» и «Ресурс UF2M», на второй системе шин, поскольку она является более нагруженной и имеет наибольший интерес.

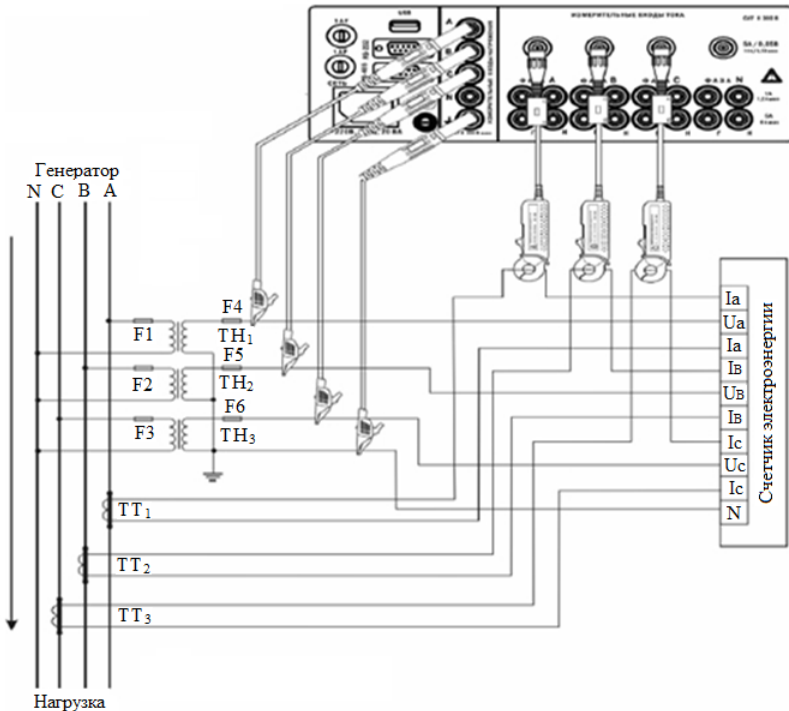


Рис. 3. Схема подключений к трехфазной трехпроводной сети с двумя ТН и двумя ТТ счетчика электрической энергии и измерителя «Ресурс UF2M»

Результаты регистрации отклонений уровня напряжения на ТП-92 (Т-2) сведены в табл. 2. Для наглядности приведем суточный график отклонения напряжения (рис. 5).

На шинах ТП-92 (Т-2) Пармой зарегистрированы отклонения уровня напряжения в среднем на 5,42 % (таблица 2), что выходит за НД значения. Длительность отклонений напряжений превышала нормально допустимые значения (более 5 % от установленного периода времени) и не превышала предельно допустимые нормативные требования стандарта. Среднее значение времени выхода составило 6,04 %, т.е. 1 ч. 27 мин. (табл. 2). Ресурс не зарегистрировал отклонений по данному значению.

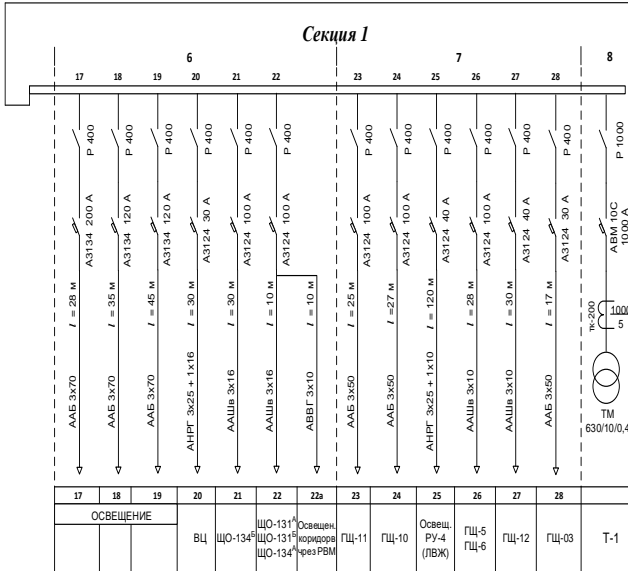
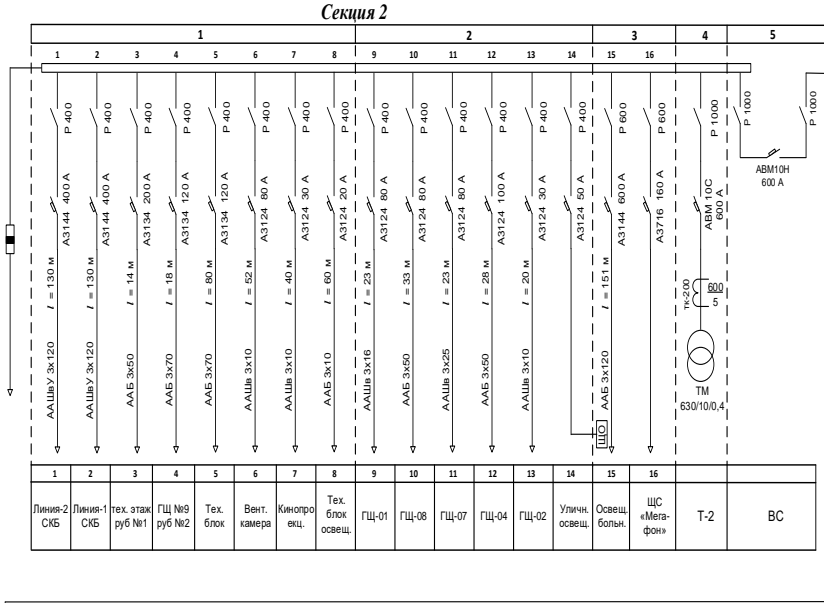


Рис. 4. Принципиальная схема ТП-92

Таблица 2  
Установившееся напряжение

Показатель КЭ	Отклонение значения, %				Время выхода, %				Заключение			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	мин	макс	мин	макс	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД
$\delta U$	00,64	<b>05,34</b>	0,60	4,00	<b>07,38</b>	0	0	0	<b>НС</b>	С	С	С
$U_{AB}$	00,58	<b>05,33</b>	0,20	3,90	04,17	0	0	0	С	С	С	С
$U_{BC}$	00,33	<b>05,15</b>	0,20	3,80	03,45	0	0	0	С	С	С	С
$U_{AC}$	00,94	<b>05,84</b>	1,00	4,50	<b>09,17</b>	0	0	0	<b>НС</b>	С	С	С

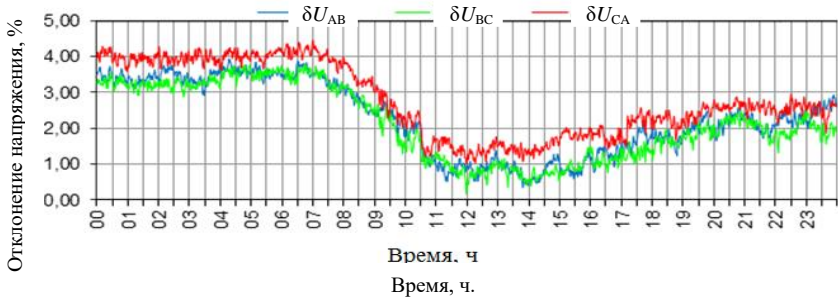


Рис. 5. Суточный график отклонений междуфазных напряжений (регистрация прибором «Ресурс UF2M»)

По гармоническому составу две гармоники (15 и 21) имели величину, превышающую нормативную. В табл. 3 фактические значения с регистраторов и сопоставлены с нормативными значениями для 15-й гармоники. На рис. 6 для наглядности показан суточный график отклонения 15-й гармонической составляющей.

Табл. 3  
Отклонение 15-й гармонической составляющей

Параметры	Отклонения значений, %				Время выхода, %			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД
Норматив	0,3	0,45	0,3	0,45	5	0	5	0
Максимальные величины	01,15		00,90		22,41	04,58	24,20	07,87

Время выхода у коэффициента 15-й гармонической составляющей за НД значения в среднем по двум приборам равнялось 23,3 %, а именно 5 ч. 36 минут, за ПД значения – 6,23 %, т.е. 1 ч. 30 мин.

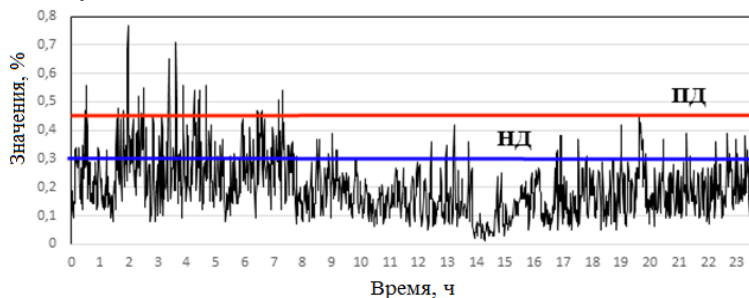


Рис. 6. Суточное отклонение 15-й гармонической составляющей.

В табл. 4 приведены фактические значения с регистраторов и сопоставлены с нормативными значениями для 21-й гармоники, а на рис. 7 для наглядности показан суточный график отклонения 21-й гармонической составляющей.

Таблица 4  
Отклонение 21-ой гармонической составляющей

Параметры	Отклонения значений, %				Время выхода, %			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	НД	ПД	НД	ПД	норм	пред	норм	пред
Норматив	0,2	0,3	0,2	0,3	5	0	5	0
Максимальные величины	00,69		00,64		07,27	01,22	07,43	01,17

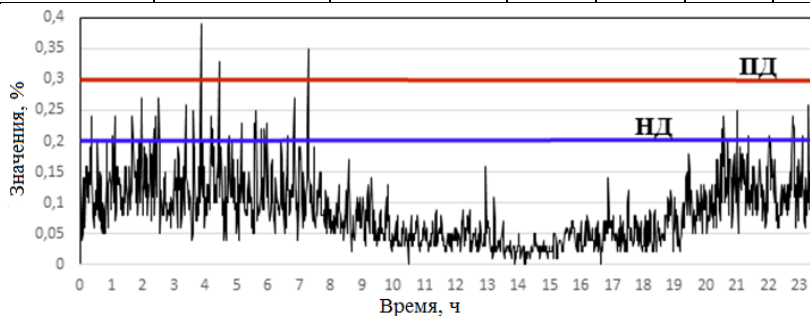


Рис. 7. Суточное отклонение 21-й гармонической составляющей



Время выхода у коэффициента 21-й гармонической составляющей в среднем по двум приборам за НД равнялось 7,35%, т.е. 1 час 46 мин, а за ПД значения составило 1,2%, т.е. 18 мин. Все остальные показатели оставались в пределах нормы. После сравнения ПКЭ зарегистрированных «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» можно заметить, что показания данных приборов отличаются незначительно. Следует отметить, что превышения НД и ПД значения данных гармонических составляющих носит систематический характер (особенно для 21-й гармоники), со стабильным превышением с 21 часа до 8 часов утра. Это связано с тем, что во время рабочего дня в одной из лабораторий подключается установка, потребляющая данные гармонические искажения.

#### У. Заключение

По результатам синхронной регистрации одной системы шин подстанции ТП-92 была выявлена некоторая разница в измеряемых показателях между приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M». Так, «Парма РК 3.01» зарегистрировала время выхода напряжения за НД в 9,17%, а «Ресурс UF2M» не зафиксировал превышения напряжения за НД значения. При регистрации отклонения коэффициента 15-й и 21-й гармонической составляющей у приборов так же было замечено неравенство в показателях. Для 15-й гармонической составляющей «Парма РК 3.01» зарегистрировала отклонение равное 1,15%, а «Ресурс UF2M» – 0,9 %. В 21-й гармонической составляющей показатели приборов довольно близки: «Парма РК 3.01» «показала» отклонение равное 0,69 %, а «Ресурс UF2M» – 0,64 %. С одной стороны, расхождения не критичны, однако ставят под сомнение адекватность тех или иных приборов. Трансформаторная подстанция ТП-92 (Т-2), обследуемая двумя различными регистраторами, показала неудовлетворительные результаты по качеству электроэнергии. При этом была выполнена расшифровка, систематизация и анализ результатов мониторинговых регистраций [10]. Практика показывает, что проблема качества электроэнергии характерна как для промышленных, так и для городских сетей. В проведенном исследовании выполнены мероприятия по регистрации показателей КЭ, расшифровке данных регистраторов и дальнейшего их анализа. На примере действующей подстанции Кольской энергосистемы предложены возможные пути решения.

© Карпов А.С., 2018  
© Ярошевич В.В., 2018

#### Библиографический список

- [1] ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 35 с.

- [2] ГОСТ Р 51317.4.7-2008. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемым к ним техническим средствам. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 39 с.
- [3] ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Методы измерения показателей качества электрической энергии. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 60 с.
- [4] ГОСТ Р 53333-2008. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2009-07-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 31 с.
- [5] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- [6] РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. Введ. 2002-08-01. М.: Энергосервис, 2003. – 25 с.
- [7] Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Ярошевич В.В. Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанций // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. №1. С. 58-64.
- [8] Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Ярошевич В.В., Карпов А.С. Анализ результатов мониторинговой регистрации показателей качества электроэнергии // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. №1. С. 67-76.
- [9] Арефьева Ю.А., Веселов А.Е., Карпов А.С., Токарева Е.А., Фастий Г.П., Ярошевич В.В. Обзор электропотребления разветвленной электрической сети напряжением 10/0,4 кВ Кольского научного центра Российской академии наук // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. №2 (28). Вып. 10. С. 24-33.
- [10] Карпов А.С., Ярошевич В.В., М. Г. Юшков. Обоснование технического решения для разработки программно-аппаратного комплекса, способного локализовать источники искажения электроэнергии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. №4 (19). С. 102-106.

**A.S. Karpov, V.V. Yaroshevich**

**VERIFICATION OF CERTIFIED POWER QUALITY  
ANALYZERS AT REGISTRATION  
ON OPERATING SUBSTATION**

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences

**Abstract.** For most electrical systems due to the presence of asymmetrical and non-linear loads, the issues of ensuring the required power quality parameters (PQP) are relevant. At the same time, the equipment, intended for the power quality (PQ) analysis, present in the electricity market differs in characteristics and accuracy criteria. The article is devoted to estimating the discrepancies between two PQ analyzers of different manufacturers for identical PQP. The estimation was carried out by means of synchronized PQ

measurements at the operating 10/0.4 kV substation. A four-wire network with a different type and asymmetrical phase load was chosen for the measurement. Comparison of PQ analyzers was carried out based on key indicators - voltage deviation, nonsinusoidal voltage (distortion factor of the sine wave of the voltage curve  $K_U$ , coefficient of the  $n$ -th harmonic component of the voltage  $K_{U(n)}$ ), unbalance of voltages (unbalance factor of negative voltage sequence  $K_{2U}$ , unbalance factor of zero voltage sequence  $K_{0U}$ ), frequency deviation  $\Delta f$ . It is established that there is a difference in the measured parameters of synchronous registration exceeding the permissible level of error between certified analyzers «Parma RC 3.01» and «Resource UF2M».

**Keywords:** electrical substation, electromagnetic compatibility, localization of distortion sources, measurement in operating high-voltage network, power quality, power quality analyzer, power quality meter, power quality parameters.

### References

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems, GOST 13109-97, Jan. 1999.
- [2] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 61000-4-7: 2002 (MOD). GOST R 51347.4.7-2008, Jan. 2010.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. IEC 61000-4-30: 2008 (MOD). GOST R 51317-4-30-2008, Jan. 2010.
- [4] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electric energy quality control in the public power supply systems. GOST R 53333-2008. July 2009.
- [5] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. GOST 32144-2013. July 2014.
- [6] Methodical instructions on control and analysis of electric power quality in power systems of general purpose. Analysis of quality of electrical energy. Part 2. RD 153-34.0-15.502-2002. Aug. 2002.
- [7] Yu.M. Nevretdinov, G.P. Fastiy and V.V. Yaroshevich. Analysis of electrical energy quality indexes registration on buses of supply substations // Vestnik of MSTU, vol 12, no. 1, pp. 58-64, 2009.
- [8] Yu.M. Nevretdinov, G.P. Fastiy, V.V. Yaroshevich and A.S. Karpov. Analysis of monitoring registration of electric power quality indices // Vestnik of MSTU, vol 17, no. 1, pp. 67-76, 2014.
- [9] U.A. Arefeva, A.E. Veselov, A.S. Karpov, E.A. Tokareva, G.P. Fastiy and V.V. Yaroshevich. Review on electricity consumption of 10/0.4 kV brached mains voltage of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences // Transactions Kola Science Centre. Energy technology, vol. 2, no. 29, series 10, pp. 24-33, 2015.
- [10] A. S. Karpov, V.V Yaroshevich and M.G. Yushkov. Substantiation of a technical solution for a firmware system capable to localize distortions sources for electric power // Herald of the Kola Science Centre of RAS, vol. 4, no. 19, pp. 102-106, 2014.