

# **Цифровой информационно-измерительный комплекс на базе высоковольтного оптического измерительного преобразователя NXVCT**

*С. Н. Рыкованов, В. И. Ухов, А. В. Мандрик,  
С. Р. Слабостицкий, И. О. Ковцова,  
ООО «Системы телемеханики»*

Традиционные аналоговые измерительные трансформаторы тока и напряжения, основанные на электромагнитных принципах, имеют ряд недостатков, связанных с явлениями насыщения, гистерезиса, резонанса, остаточного намагничивания. Этих недостатков лишены высоковольтные оптические измерительные преобразователи тока и напряжения.

## **Описание проекта «Цифровая подстанция»**

Пилотный проект «Цифровая подстанция» реализован совместными усилиями специалистов ООО «Системы телемеханики» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» в 2011-2013 годах. В рамках этого проекта разработан Цифровой информационно-измерительный комплекс (ЦИИК) в соответствии с требованиями стандарта IEC 61850, включающий интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) уровня присоединения.

В качестве базового элемента полевого уровня в проекте «Цифровая подстанция» (ЦПС) применен высоковольтный оптический измерительный преобразователь тока и напряжения NXVCT-230 [1].

ЦИИК введен в опытную эксплуатацию в феврале 2013 г. и в настоящее время функционирует на ПС 110/10 кВ «Сосновая» в г. Снежинске Челябинской области, обеспечивая решение задач учета электроэнергии, измерения показателей качества электроэнергии, измерения параметров сети, регистрации аварийных событий.

Пуско-наладочные работы ЦИИК на подстанции выполнялись с использованием мобильного поверочного комплекса SysteLLogic УПН.11, обеспечивающего генерацию потоков тестовых данных согласно протоколу IEC 61850-9-2LE с частотой дискретизации 80 и 256 точек на период.

Поверочный комплекс SysteLLogic УПН.11 выполнен на базе промышленного компьютера с сенсорным экраном и обеспечивает три режима работы:

- генерация потоков симметричных сигналов тока и напряжения с одинаковой амплитудой по всем фазам;

- генерация потоков индивидуальных сигналов тока и напряжения по каждой фазе;
- воспроизведение потоков сигналов из csv-файла, в котором предварительно записаны мгновенные значения тока и напряжения.

Структурная схема ЦИИК (рис. 1) включает три уровня:

**Полевой уровень**, представленный высоковольтным оптическим измерительным преобразователем тока и напряжения NXVCT-230.

**Уровень присоединения**, представленный ИЭУ, обеспечивающими прием данных от преобразователя NXVCT-230 по протоколу IEC 61850-9-2LE: SysteLLogic PAC.11, SysteLLogic УИП.12, SysteLLogic ПКЭ.12.

**Станционный уровень**, представленный сервером ЦПС, сервером синхронизации времени и Автоматизированным рабочим местом (АРМ).

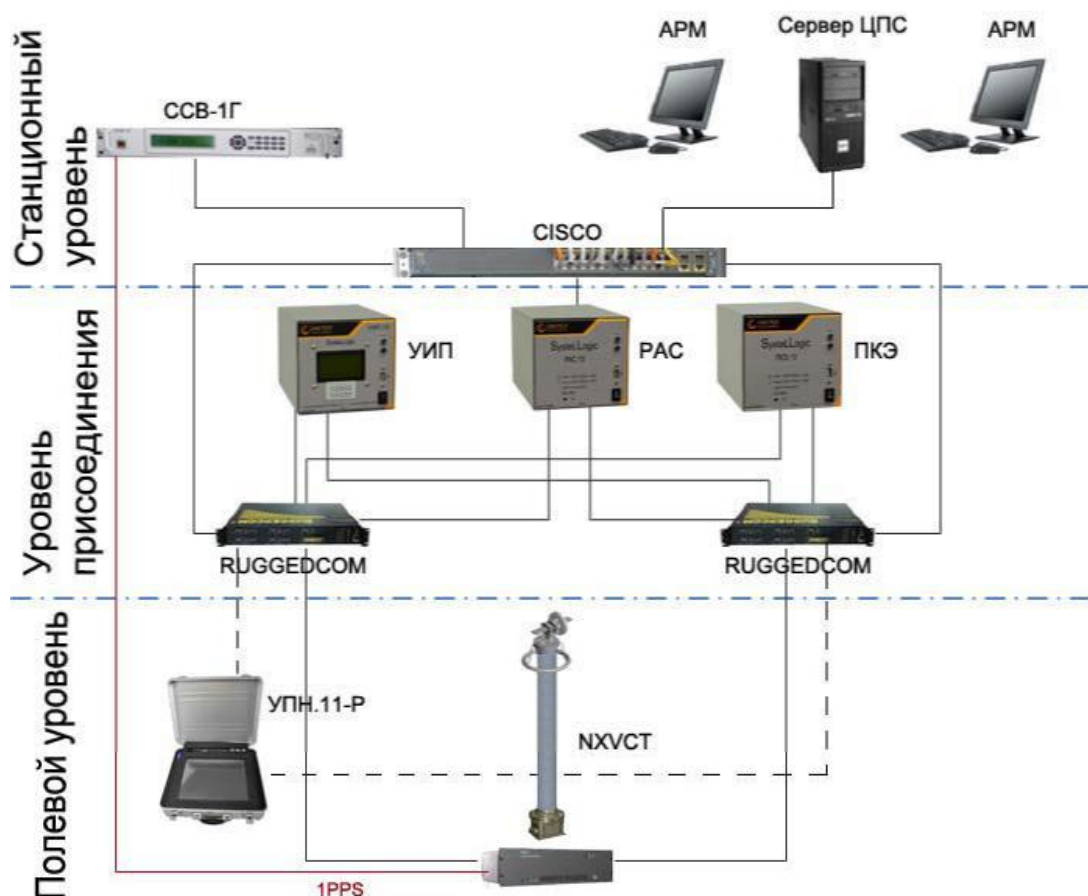


Рис. 1

Физическая реализация станционной шины и шины процесса выполнена на коммутаторах Ethernet.

Для синхронизации времени компонентов ЦИИК используется сервер точного времени ССВ-1Г, обеспечивающий формирование эталонных сигналов 1PPS и поддерживающий протоколы NTP и SNTP.

Преобразователь NXVCT-230 установлен в ОРУ-110 кВ (рис. 2) и используется как первичное средство измерения, альтернативное традиционным трансформаторам тока и напряжения. Вторичное измерительное оборудование и вычислительные средства размещены в шкафах, установленных в помещении ЗРУ 6 кВ (рис. 3).



Рис. 2

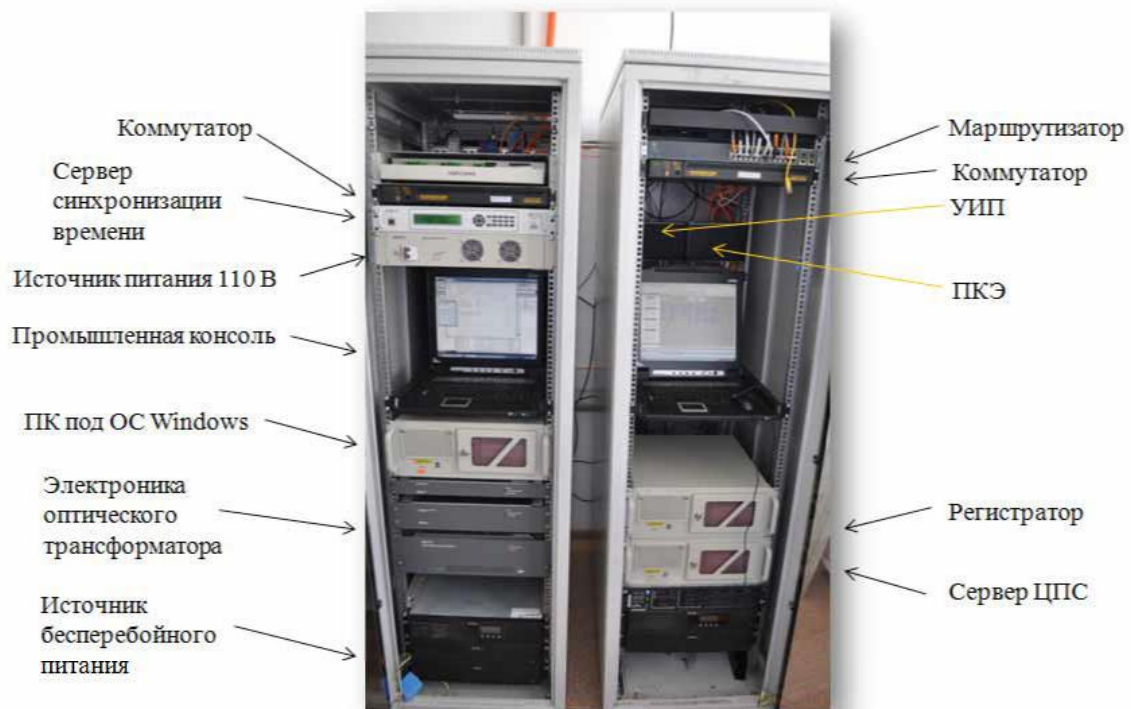


Рис. 3

Преобразователь NXVCT-230 измеряет мгновенные значения тока и напряжения по фазам А, В, С первичной сети и выдает их в виде потоков цифровых сигналов согласно протоколу IEC 61850-9-2LE (с частотой дискретизации 256 точек на период). Дополнительно NXVCT-230 предусматривает выдачу измерений в виде аналоговых сигналов.

В ЦИИК в качестве вторичного измерительного оборудования используются следующие интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), принимающие поток данных от устройства полевого уровня NXVCT-230 и передающие результаты их обработки на стационарный уровень по протоколу IEC 61850-8-1 [2]:

1) **SystemLogic УИП.12** - для учета электроэнергии и мощности, измерения параметров электрической сети: напряжения, тока, частоты, коэффициента мощности и т.д.

Конфигурация устройства и отображения параметров обеспечивается человеко-машинным интерфейсом (рис. 4), предусматривающим несколько режимов представления данных:

- мультиметр: мгновенные значения измеряемых параметров сети;
- счетчик: суммарная энергия, принятая энергия, отданная энергия нарастающим итогом;
- профили: основные параметры учета электроэнергии на заданном интервале (1мин., 30 мин., на начало суток, на начало месяца).

ПАРАМЕТРЫ	А	В	С	АВС
Ток, А	0.999552	0.999552	0.999535	0.999546
Напряжение, В	119.995180	119.994879	119.994879	119.994973
Активная мощность, Вт	103.872355	-118.118882	112.708025	98.459498
Реактивная мощность, Вар	59.970518	20.827662	-41.021189	39.777011
Полная мощность, ВА	119.941357	119.941076	119.939086	359.821519
Сосф	0.866026	-0.984808	0.939694	0.273634
Частота, Гц	50.000000	50.000000	50.000000	50.000000

ЛИНЕЙНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, В			УГОЛ СДВИГА ФАЗ, °		
АВ	ВС	СА	А	В	С
225.516949	169.698385	101.424388	330.000089	190.000055	19.999789

НЕЙТРАЛЬ	
Ток, А	Напряжение, В
0.000000	0.000000

Рис. 4

2) **SystemLogic ПКЭ.12** - для измерения показателей качества электроэнергии и их сопоставления с нормативными значениями (в со-

ответствии с ГОСТ Р 54149-2010). К основным показателям КЭ относятся: частота, фликер, провалы напряжения и перенапряжения, прерывания напряжения, несимметрия напряжения, гармоники и интергармоники тока и напряжения и т.п.

Устройством осуществляется архивация результатов измерений на основных интервалах времени: 10/12 периодов, 150/ 180 периодов, 10 минут и 2 часа.

Конфигурация устройства и представление результатов обеспечивается человеко-машинным интерфейсом (рис. 5), предусматривающим несколько режимов представления данных:

- базовые показатели качества электроэнергии;
- гармоники и интергармоники;
- фликер;
- профили (основные показатели качества электроэнергии на заданном интервале).



Рис. 5

3) **SystemLogic PAC.11** - для регистрации и хранения осциллограмм стационарных и переходных процессов, предшествующих и сопутствующих аварийным режимам в электрических сетях. Обеспечивается регистрация:

- переходных/аварийных процессов по заданному набору уставок (превышение установленных максимальных значений тока и напряжения);

- текущих значений тока и напряжения.

ИЭУ SystemLogic PAC.11 обеспечивает одновременную регистрацию 4-х потоков мгновенных значений согласно IEC 61850-9-2LE, прием дискретных сигналов по протоколу IEC 61850-8-1 посредством GOOSE-сообщений.

Конфигурирование и визуализация данных, регистрируемых устройством, осуществляется с помощью человеко-машинного интерфейса (рис. 6).

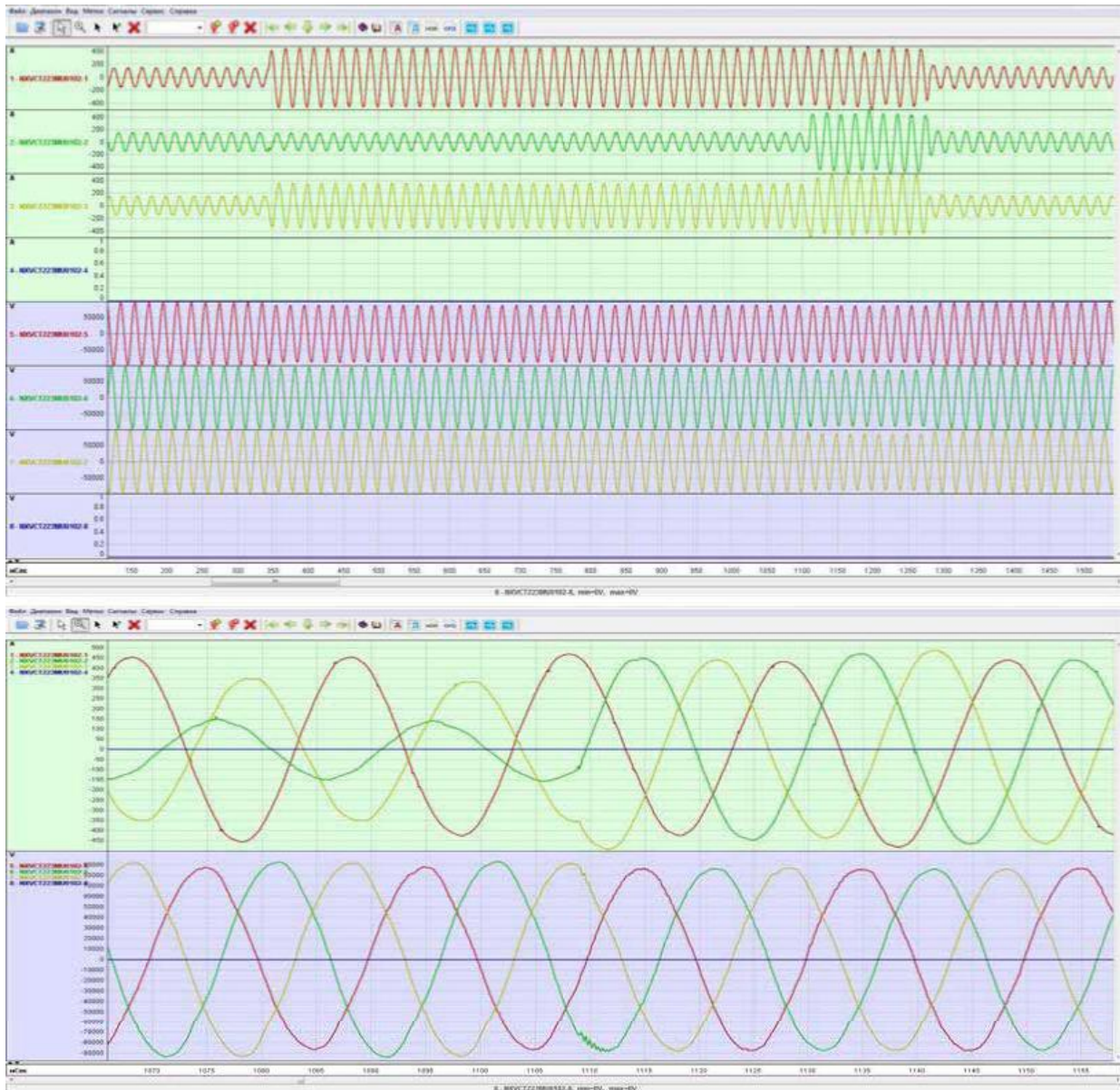


Рис. 6

Сервер ЦПС позволяет выполнять:

- информационный обмен с ИЭУ уровня присоединения по протоколу IEC 61850-8-1;
- ведение архивов текущих и аварийных событий;

- информационный обмен с устройствами, поддерживающими отличные от IEC 61850-8-1 протоколы;
- передачу данных на верхний уровень (ЦУС, РДУ и т.п.) по каналам связи с использованием протоколов МЭК 870-5-101/104;
- информационный обмен с АРМ станционного уровня;
- управление конфигурацией (в соответствии с IEC 61850-8-6).

Хранение оперативных данных в сервере ЦПС осуществляется с использованием объектной модели, соответствующей требованиям стандарта IEC 61850.

Сервер ЦПС, помимо поддержки протоколов стандарта IEC 61850 для сбора данных от ИЭУ поддерживает протокол IEC 870-5-104 для сбора данных от «традиционных» устройств, включенных в состав ЦИИК (устройство телемеханики МТК-30.КП, счетчики «Фотон» и «Протон-К»).

Сервер ЦПС обеспечивает хранение данных, получаемых от ИЭУ и перечисленных выше «традиционных» устройств, в том числе данных об аварийных срабатываниях релейных защит и связанных с ними осциллограмм.

Для взаимной интеграции «традиционных» и «цифровых» устройств и систем разработан преобразователь протоколов SysteLLogic ПП, выполняющий преобразование протокола IEC 61850-8-1 в протоколы IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-103, IEC 870-5-104 и наоборот. С помощью такого преобразователя можно «включать» ИЭУ в «традиционные» АСУ ТП, а также интегрировать функционирующие устройства телемеханики, терминалы РЗА и приборы учета в «Цифровую подстанцию».

## **Анализ метрологических характеристик**

Для проведения сравнительного анализа метрологических характеристик измерительного канала на базе **NXVCT-230** в ЦИИК используются один основной цифровой и два дополнительных аналоговых измерительных канала, реализованные с использованием:

- ИЭУ SysteLLogic УИП.12, сопряженного с цифровым выходом преобразователя NXVCT-230 и принимающего данные по протоколу МЭК 61850-9-2LE;
- счетчика электрической энергии «Протон-К» (класс точности 0.2S), подключенного к аналоговым выходам преобразователя NXVCT-230;
- счетчика электрической энергии «Фотон» (класс точности 0.2S), подключенного к вторичным цепям измерительных ТТ и ТН (класс точности 0,5S).

Таким образом, измерения параметров сети (ток, напряжение, частота, активная и реактивная мощности и т.д.) для ВЛ 110 кВ «Сосновая -

Снежинская», а также учет электроэнергии (активная и реактивная энергия за полчаса/час/сутки/месяц) проводились одновременно по трем измерительным каналам (рис.7).



Рис. 7

## Статистический анализ данных

На рис.8 представлены графики зависимости напряжения от времени по трем каналам за один зимний и один летний день, а на рис.9 - графики зависимости тока от времени по трем каналам (фазы А и В) за 3 и 4 августа 2013 г.

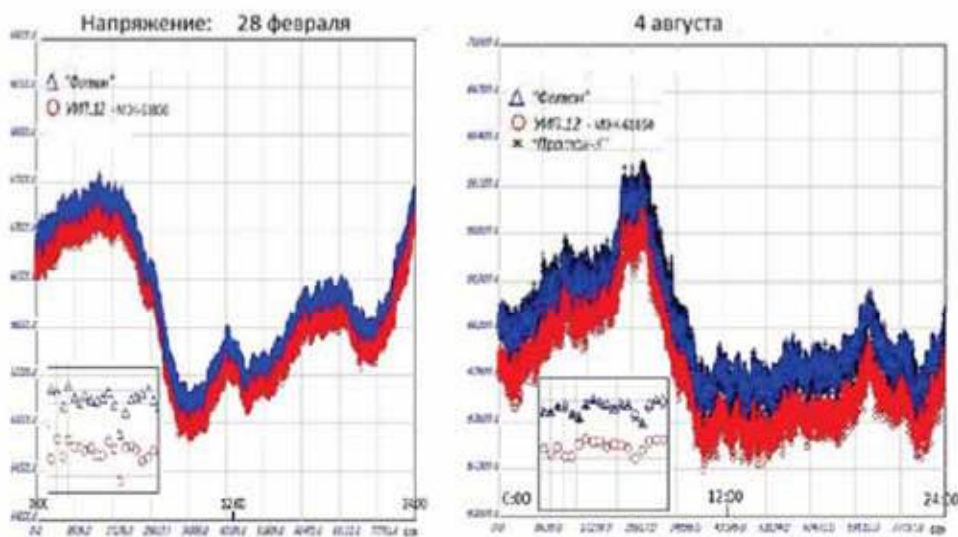


Рис. 8



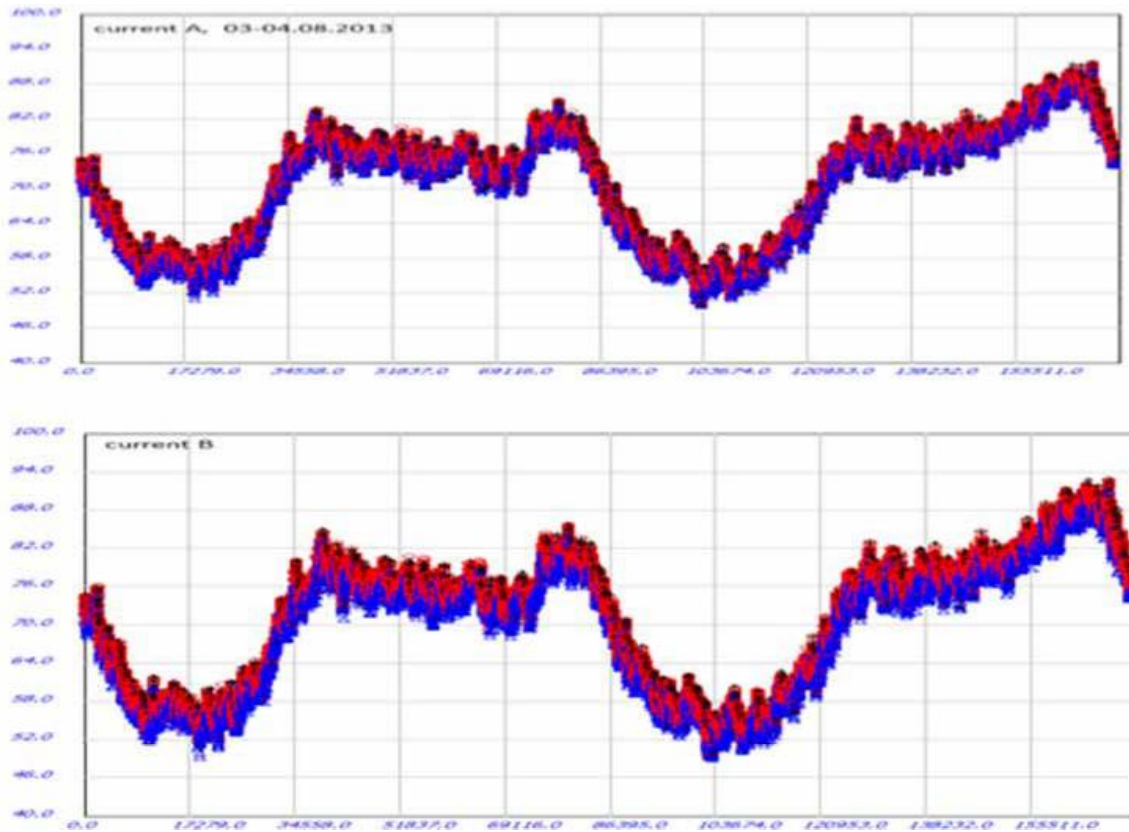


Рис. 9

Измерения параметров сети, проведенные по трем каналам, хорошо согласуются между собой с учетом класса точности приборов в широком динамическом диапазоне.

Отметим, что по данным счетчика «Протон-К» можно анализировать работу собственно высоковольтного оптического измерительного преобразователя тока и напряжения. Для сравнительного анализа метрологических характеристик измерительного канала на основе традиционных ТТ и ТН и измерительного канала на основе преобразователя NXVCT-230 использовались данные от счетчика «Фотон» и цифрового прибора SystemLogic УИП.12 за несколько дней проведения измерений, при этом даты (дни) выбирались произвольно.

Измерения выполнялись с интервалом в 10 секунд (данная величина является настраиваемой, минимальное значение 1 секунда). В результате дневная выборка содержит

$$N = 8640 \quad (1)$$

действующих значений.

Первичными (измеряемыми) сигналами являются:

- действующие значения токов (по трем фазам);
- действующие значения напряжения (по трем фазам);

- частота (по трем фазам).

Остальные параметры (мощность, напряжение между фазами,  $\cos \varphi$ , ...) являются вычисляемыми.

Для сравнения использовались действующие значения параметров для каждой фазы (А, В, С): напряжение (U), ток (I), мощности: активная (P), реактивная (Q), полная (S),  $\cos \varphi$  и частота (f).

Для сравнения вычислялся коэффициент соответствия синхронно измеряемых параметров счетчиком «Фотон» и прибором SysteLLogic УИП.

Например, для фазы А

$$r = \frac{V_{\Phi;A}}{V_{Y;A}} \quad (2)$$

где  $V_{\Phi;A}$  и  $V_{Y;A}$  - значения (напряжения, тока, ...) фазы А для счетчика «Фотон» и SysteLLogic УИП. Аналогичные соотношения используются и для сравнения других параметров.

Для определения статистической значимости использовались «интегральные» характеристики: среднее отношения по выборке (сутки) и среднее квадратичное отклонение:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_k; \quad \sigma_R = \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_k^2 \right) - R^2} \quad (3)$$

Заметим, что среднее квадратичное отклонение является статистической погрешностью.

Абсолютная погрешность интегрального отношения определяется статистической и систематической погрешностями:

$$\Delta R = \sqrt{\sigma_R^2 + (\Delta r)^2}; \quad \Delta r = R \cdot \delta r \quad (4)$$

где величины относительных систематических погрешностей для коэффициента соответствия ( $\delta r$ ).

Ниже представлены относительные систематические погрешности для коэффициентов соответствия измеренных параметров ( $\Phi$  – «Фотон»,  $Y$  – SysteLLogic УИП).

Коэффициент соответствия	$U_{\Phi}/U_Y$	$I_{\Phi}/I_Y$	$P_{\Phi}/P_Y$	$S_{\Phi}/S_Y$	$\cos \varphi_{\Phi}/\cos \varphi_Y$	$f_{\Phi}/f_Y$
$\delta r$ (%)	0.574	0.735	0.608	0.608	0.860	0.10

На рис. 10 приведена зависимость коэффициента соответствия для различных параметров от времени (секунды с начала суток – 00:00). Характер поведения коэффициента соответствия для измерений, сделанных в различные дни, практически не меняется. Поэтому далее, как типовые, приведены графики коэффициента соответствия для измерений выполненных 4 августа.

Графики коэффициента соответствия, приведенные на рис. 10, относятся к фазе А, графики для фаз В и С имеют такой же вид. На рис. 11 показаны (для примера) графики коэффициентов соответствия тока и напряжения для всех трех фаз А, В, С.

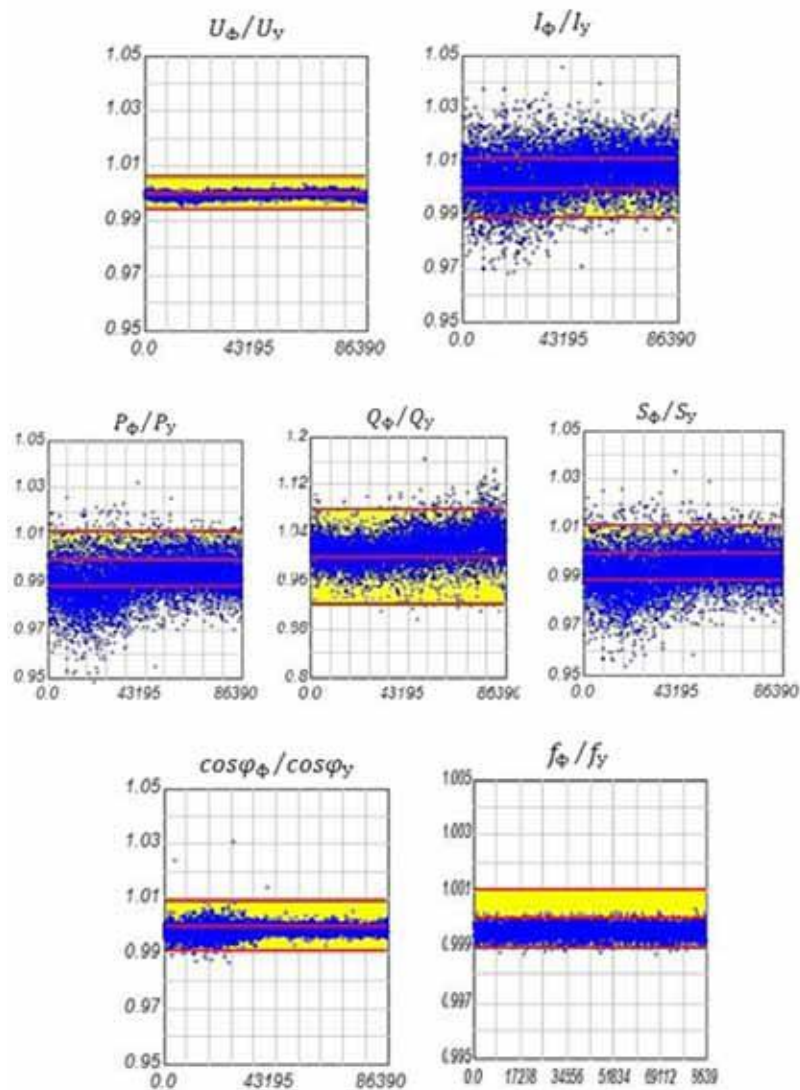


Рис. 10

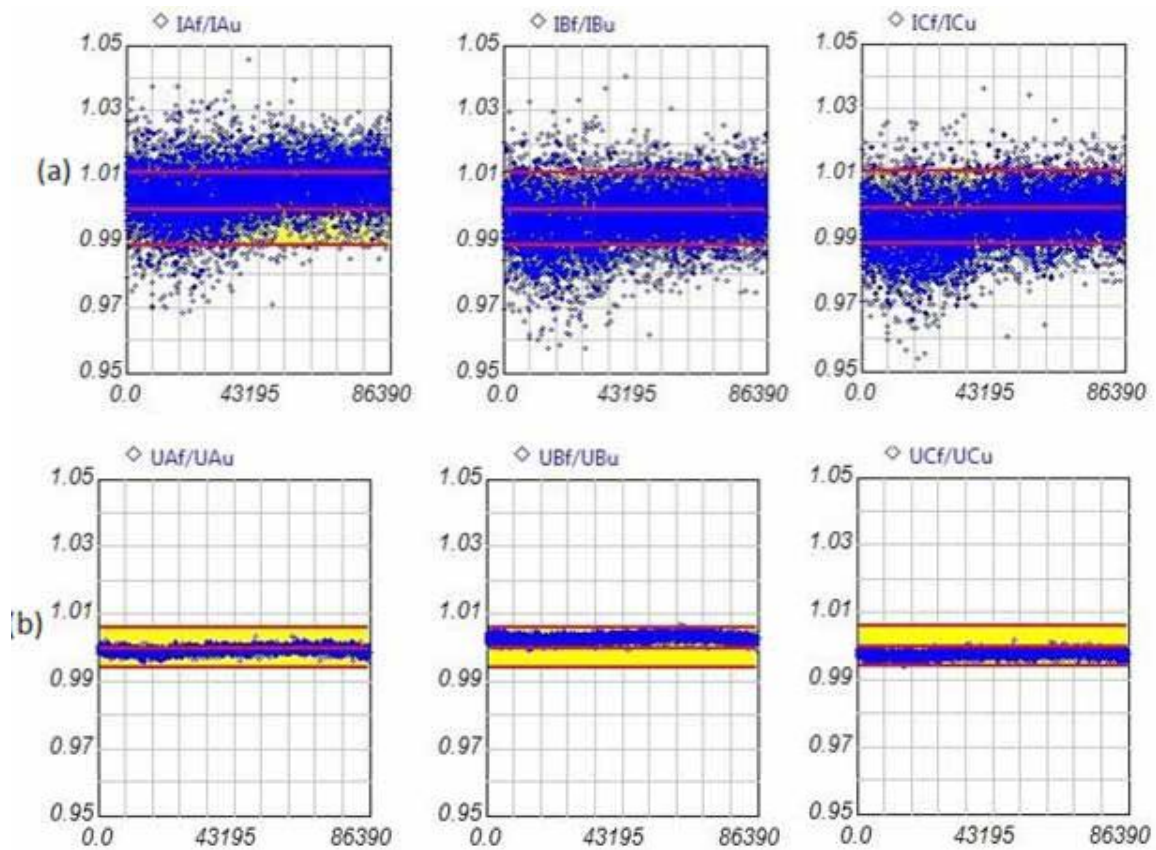


Рис. 11

Исходя из проведенного анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод что коэффициенты соответствия различных параметров для фаз А, В, С на протяжении всего времени работы ЦИИК были стабильны и близки к единице.

## Оценка статистической значимости

Для определения статистической значимости полученных результатов использовалась оценка методом  $\chi^2$

$$\chi_{exp}^2 = \chi^2(N) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(R_0 - R_k)^2}{(\Delta R)^2} \quad (5)$$

где  $R_0 = 1$  - ожидаемое значение,  $\Delta R$  – погрешность, вычисляемая по формуле (4).

Для оценки статистической значимости использовался критерий Пирсона. А именно, гипотеза

$$R_k = R_0 = 1 \quad (6)$$

принимается с вероятностью  $\beta$ , если выполняется неравенство:

$$\chi_{exp}^2 \leq \chi_{\alpha;N}^2 \quad (7)$$

Теоретические значения критерия  $\chi_{\alpha;N}^2$  при  $N = 8640$  (что соответствует одному измерению параметра с интервалом в 10 с) для различных значений вероятностей  $\beta$  равны:

$$N = 8640; \chi_{\alpha;N}^2 = \begin{cases} 8336 \text{ при } \alpha = 0.999 = 99.9\% \\ 9050 \text{ при } \alpha = 0.01 = 1\% \end{cases}$$

Полученные значения коэффициента соответствия, статистические ( $\Delta R_{stat}$ ), систематические ( $\Delta R_{syst}$ ) и общие погрешности ( $\Delta R$ ) для измеренных величин приведены в нижеследующей таблице.

$V$	$R = V_\phi / V_y$	$\Delta R_{stat}$	$\Delta R_{syst}$	$\Delta R$	$ 1 - R $	$\chi_{exp}^2$
$U_A$	0.9994	0.00081	0.00574	0.00580	0.0006	259.9
$U_B$	1.0029	0.00085	0.00574	0.00581	0.00287	2283.4
$I_A$	1.0059	0.00809	0.00735	0.0109	0.00587	7053.1
$I_B$	0.9979	0.00843	0.00735	0.01118	0.00207	5285.1
$P_A$	1.00377	0.00867	0.00762	0.01154	0.00377	5711.3
$P_B$	1.00006	0.0089	0.00762	0.01178	0.00006	5046.5
$Q_A$	1.02778	0.0253	0.07637	0.08047	0.00278	1697.4
$Q_B$	1.01284	0.0258	0.0834	0.08732	0.00128	892.1
$S_A$	1.00526	0.00835	0.00762	0.01133	0.00526	6447.39
$S_B$	1.00079	0.00870	0.00762	0.01156	0.00079	4928.7
$\cos \varphi_A$	0.99852	0.00243	0.00860	0.00894	0.00148	606.8
$\cos \varphi_B$	0.99927	0.00202	0.00860	0.00884	0.00073	385.8
$f_A$	0.99955	0.00023	0.0010	0.00101	0.00045	2079.9
$f_B$	0.99955	0.00023	0.0010	0.00101	0.00045	2077.3

Из таблицы следует, что значения параметров сети, измеренные как традиционным способом, так и с помощью преобразователя NXVCT-230, совпадают с вероятностью не хуже 99.9%:

$$\chi_{exp}^2 < \chi_{0.999;8640}^2 \quad (8)$$

## Результаты

Получен практический опыт реализации инновационных решений в части разработки ЦИИК для цифровой подстанции и его опытной эксплуатации на действующей подстанции в течение длительного времени, подтверждена стабильность функционирования комплекса.

Исследованы метрологические характеристики ЦИИК на большой статистической выборке, полученной в течение года непрерывной работы ЦИИК, в том числе в зимний и летний период. Показано что измерения основных параметров электрической сети, полученные с использованием преобразователя NXVCT-230 и традиционных измерительных средств, совпадают в пределах заявленных погрешностей.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» Ю.В. Румянцеву, А.В. Проскуруину, В.В. Сергодееву, В.С. Краеву и С.Ю. Шепель, выполнивших большой объем организационных и экспериментальных работ.

### Список литературы

1. «NXVCT. Преобразователь измерительный высоковольтный оптический напряжения и тока» - Руководство по установке, эксплуатации и техническому обслуживанию.
2. Рыкованов С.Н., Ухов В.И., Слабоспицкий С.Р., Ковцова И.О. Пилотный проект «Цифровая подстанция». // Журнал Релейщик. №1. 2014.

### Сведения об авторах:

*Рыкованов Сергей Николаевич,*

ООО «Системы телемеханики», генеральный директор, к. т. н.

*Ухов Владимир Иосифович,*

ООО «Системы телемеханики», заместитель генерального директора, к. ф.-м. н.

*Мандрик Андрей Владимирович,*

ООО «Системы телемеханики», ведущий инженер, к. т. н.

*Слабоспицкий Сергей Ростиславович,*

ООО «Системы телемеханики», ведущий специалист, д. ф.-м. н.

*Ковцова Ирина Олеговна,*

ООО «Системы телемеханики», инженер