

Измерение напряжения в КРУЭ на подстанциях с цифровой техникой

ИВАНОВ А.С., МЕСТЕРГАЗИ В.А., НОСИК Л.П., ОСТАПЕНКО Е.И., ПАРФЕНОВ Д.Е., СОБАКАРЬ Т.В., ЧЕМЕРИС В.С.

Для построения полностью цифровой подстанции требуется перейти от аналоговых средств измерения к цифровым, в частности к цифровым измерителям напряжения. Рассмотрен такой измеритель высокого напряжения с выходным цифровым интерфейсом. Первичный датчик расположен в корпусе под газовым давлением и основан на принципе емкостного делителя. Вторичный датчик находится вне корпуса первичного датчика и совмещен с устройством цифрового преобразования.

Ключевые слова: *комплектные распределительные устройства, измерение напряжения, емкостный датчик, устройство цифрового преобразования*

Трансформатор напряжения (ТН) является неотъемлемой составной частью распределительных устройств подстанций. Сигналы ТН используются устройствами защит, системами управления, контроля и мониторинга подстанции. В настоящее время прослеживается тенденция к реализации измерительных средств на базе микропроцессорной техники. Для построения полностью цифровой подстанции требуется перейти от аналоговых средств измерения к цифровым, в частности к цифровым измерителям напряжения. Стандарт МЭК 61850 регламентирует основные задачи и этапы перехода к цифровым подстанциям. Стандарт МЭК 60044-7 определяет требования к цифровым измерителям напряжения.

Для сбора, передачи и обработки информации на цифровой подстанции используются волоконно-оптические линии связи, исключающие большое количество коммуникаций проводами и устройств обработки. Все эти соединения и устройства обработки заменены единой станционной технологической шиной. Переход на цифровые измерительные датчики и реализация обмена с потребителями с помощью процессорной шины реального времени позволяет исключить остаточный объем проводных соединений. Кроме того, цифровые измерительные датчики и сети позволяют реализовать функции проверки и исправления ошибок, исключить появление дополнительных погрешностей, повысить ЭМС оборудования.

Цифровая подстанция является новым и перспективным направлением в электроэнергетиче-

A changeover from analog to digital measurement tools, in particular, to digital voltage measurement devices, must be made in order to construct a fully digital substation. A high-voltage measurement device of this sort equipped with a digital output interface is considered. The primary sensor, which operates based on the principle of a capacitive divider, is placed in the shell under the gas pressure. The secondary transducer is outside the primary sensor's shell and is combined with a digital conversion device.

Key words: *gas insulated switchgears, voltage measurement, capacitive sensor, digital conversion device*

ской отрасли. Для успешного развития автоматизации процессов передачи, преобразования и распределения электроэнергии в масштабах единой общероссийской электрической сети разрабатывается общая концепция программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции.

Со времени начала разработок в отечественной электроэнергетике проектов АСУ ТП подстанции произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления для применения на электрических подстанциях. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения; разрабатывается первичное и вторичное электросетевое оборудование со встроенными коммуникационными портами; производятся микропроцессорные контроллеры, оснащенные инструментальными средствами разработки, на базе которых возможно создание надежного программно-аппаратного комплекса подстанции (ПС); принят международный стандарт МЭК 61850, регламентирующий представление данных о ПС как объекте автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (IED) подстанции, включая устройства контроля и управления, релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, счетчики электроэнергии и т.д. Все это создает предпосылки для построения подстанции нового поколения – цифровой подстанции, в которой организация всех потоков информации при

решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления подстанцией позволит: сократить затраты на кабельные вторичные цепи и каналы их прокладки, приблизив источники цифровых сигналов к первичному оборудованию;

повысить электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования – микропроцессорных устройств и вторичных цепей благодаря переходу на оптические связи;

упростить и, в конечном итоге, удешевить конструкцию микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств за счет исключения трактов ввода аналоговых сигналов;

унифицировать интерфейсы устройств IED, существенно упростить взаимозаменяемость этих устройств (в том числе замену устройств одного производителя на устройства другого производителя) и др.

Технические характеристики. Цифровой измеритель напряжения разрабатывался для использования в КРУЭ на номинальное напряжение 220 кВ для цифровых подстанций. Основные технические характеристики цифрового измерителя напряжения соответствуют государственному стандарту РФ ГОСТ 1983–2001 «Трансформаторы напряжения. Общие технические условия», а также стандартам МЭК 60044-7 и МЭК 61850:

Изоляционная среда	Элегаз
Напряжение:	
номинальное	$220/\sqrt{3}$ кВ
наибольшее рабочее	$252/\sqrt{3}$ кВ
динамический диапазон рабочего напряжения	$11/\sqrt{3}$ – $252/\sqrt{3}$ кВ
Класс точности тракта измерения напряжения	0,2
Частота переменного тока сети	50 Гц
Полоса частот измеряемых сигналов	0,05–2,0 кГц
Электрическая прочность фаза–земля:	
грозовой импульс	950 кВ
промышленной частоты	395 кВ
Потребляемая мощность	Не более 50 Вт
Рабочий диапазон температур окружающей среды	–45 , +40 °С
Верхнее значение относительной влажности при 25 °С	98%
Высота установки над уровнем моря	До 1000 м
Сейсмичность по шкале MSK	До 6 баллов
Окружающая среда	Невзрыво- опасная

При переходе к более низкой предельной температуре высоковольтная часть аппарата заполняется смесью газов, исключающей конденсацию

элегаза, а в устройстве цифрового преобразования заменяется нагревательный прибор на более мощный.

Цифровой измеритель напряжения ячейки КРУЭ (рис. 1) предназначен для измерения высокого напряжения и передачи измеренных значений в системы защит, контроля и мониторинга подстанции. Чаще всего измеритель напряжения устанавливается на отходящей от подстанции линии или на сборных шинах подстанции, этим определяется его расположение в ячейке распределительного устройства. Цифровой измеритель напряжения функционально и конструктивно делится на две части: первичный датчик напряжения (в данном случае емкостный делитель) и устройство цифрового преобразования.

Первичный датчик напряжения построен по принципу емкостного делителя. Высоковольтное плечо делителя находится в газовой изоляции и представляет собой коаксиальную систему проводника высокого потенциала и цилиндра низкого потенциала, электрически связанного с низковольтным плечом делителя. Низковольтное плечо реализуется с помощью набора высокоточных конденсаторов, которые располагаются за пределами металлического корпуса измерителя напряжения, предусматривается возможность терморегулирования и размещение совместно с блоком АЦП.

Трансформатор на принципе емкостного делителя обладает рядом преимуществ перед традиционным электромагнитным трансформатором на-

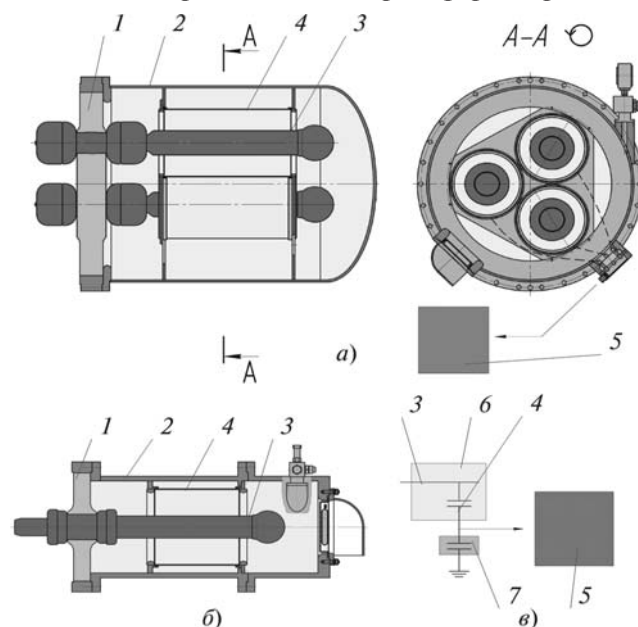


Рис. 1. Схема конструкции цифрового измерителя напряжения в трехфазном исполнении (а); в однофазном исполнении (б) и схема замещения емкостного делителя в измерителе напряжения (в): 1 – изолятор с электростатическими экранами; 2 – металлический корпус; 3 – проводник высокого потенциала; 4 – цилиндр низкого потенциала; 5 – устройство цифрового преобразования; 6 – высоковольтное плечо; 7 – низковольтное плечо

пряжения (рис. 2): уменьшенный вес и габариты (размеры сокращаются практически вдвое, а вес более чем в 4 раза); простота изготовления, поскольку исключается необходимость в обмотке с высокой трудоемкостью; упрощается монтаж, число деталей значительно сокращается; предполагаемая стоимость не увеличивается, а в процессе развития цифровых подстанций будет значительно уменьшаться.

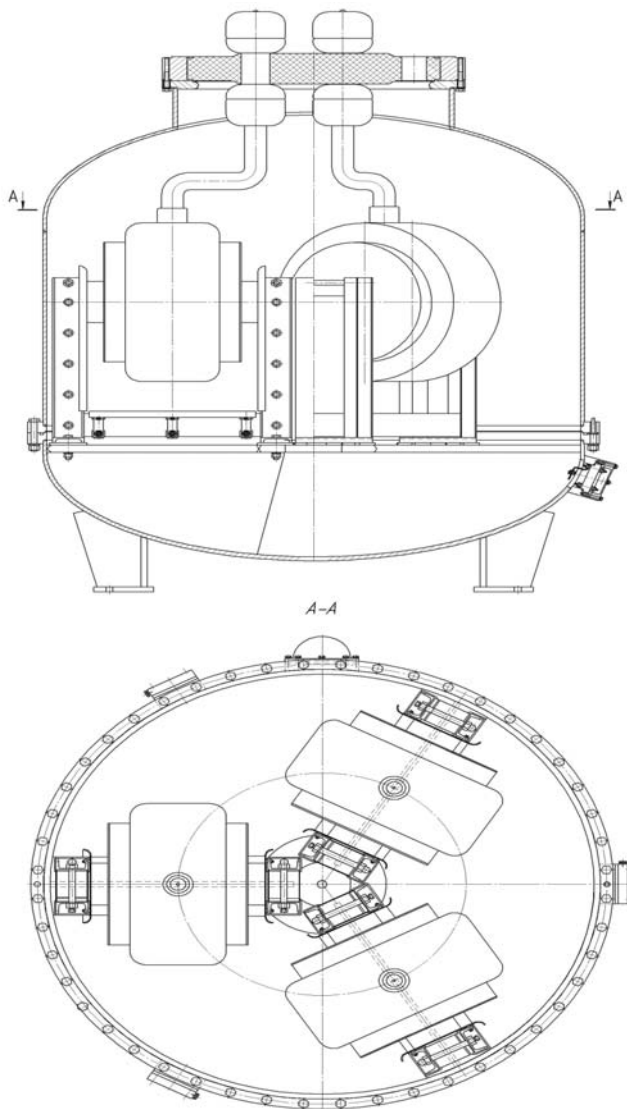


Рис. 2. Схема конструкции традиционного электромагнитного трансформатора напряжения

Измеритель напряжения (рис. 1,а) представляет собой трехфазную конструкцию, расположенную в одном общем заземленном корпусе. Конструкция состоит из трехфазного герметичного изолятора с электростатическими экранами, герметизированного корпуса, заполненного изоляционным газом, с закрепленной на корпусе предохранительной мембраной и выводами низкого напряжения. В измерителе предусматривается установка датчиков

плотности, давления и температуры газа, они устанавливаются в зависимости от требуемых задач. В корпусе находится высоковольтное плечо каждой из фаз, представляющее собой коаксиальную систему из проводника высокого потенциала и цилиндра низкого потенциала. С цилиндра низкого потенциала измеряемый сигнал передается по проводам в устройство цифрового преобразования. Также на устройство цифрового преобразования будут приходить сигналы с датчиков плотности, давления и температуры, которые могут участвовать в обработке сигнала измерения и совместно с сигналом измерения могут передаваться на пульт управления подстанцией. Конструкция однофазного измерителя напряжения аналогична трехфазному (эскиз — см. рис. 1,б).

Принцип ТН, основанного на емкостном делителе, иллюстрируется рис. 1. Высокое напряжение приложено к проводнику 3, закрепленному в изоляторе 1. Цилиндр 4 составляет с проводником 3 высоковольтное плечо 6 емкостью C_1 , сигнал с цилиндра передается через вывод низкого напряжения в корпусе 2 на низковольтное плечо 7 емкостью C_2 . С низковольтного плеча сигнал поступает на вход АЦП устройства цифрового преобразования 5 и после объединения с другими измерительными сигналами ячейки передается по оптоволокну в виде фрейма цифровых выборок в системы защит, мониторинга и управления подстанцией (в соответствии с протоколом МЭК 61850-2LE).

Для предварительных расчетов и оценок расчетную емкость высоковольтного плеча C_1 можно определить по формуле

$$C_1 = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{l}{R_2 / R_1},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — электрическая постоянная; R_1 — радиус проводника; R_2 — радиус цилиндра; l — длина цилиндра.

В действительности емкость будет несколько больше из-за влияния краевых эффектов и расположения цилиндра в корпусе и должна быть определена экспериментально при нормальных условиях окружающей среды.

Основной показатель измерителя — это погрешность измерения напряжения по значению и фазе. Предварительные расчеты показали, что погрешность измерения по значению не превышает 0,2%, что соответствует классу точности 0,2 по ГОСТ 1983—2001. Погрешность является составной величиной, и при расчете погрешности были учтены следующие факторы.

1. Температурное линейное расширение элементов конструкции делителя. По оценке этот фактор

вносит нестабильность измерения не более 0,02% с учетом изменения температуры от -45°C (нижнее значение рабочей температуры воздуха при эксплуатации) до $+80^{\circ}\text{C}$ (возможный максимальный нагрев газа). Получение такой погрешности достигается применением материалов с минимальным линейным расширением.

2. *Изменение свойств элегаза из-за изменения плотности, температуры и давления.* По данным [1 и 2] была получена зависимость диэлектрической проницаемости от плотности, температуры и давления. На основании этой зависимости погрешность измерений не будет превышать 0,1%.

3. *Добавление паразитных емкостей,* в том числе вносимых проводами, оценивается в 0,05%. После монтажа, калибровки и настройки устройства цифрового преобразования не рекомендуется проводить какие-либо операции по перемещению измерительных кабелей связи. Влияние паразитной емкости кабеля РК75-2-21 ГОСТ 11326.40—79, выбранного для измерительных цепей, может быть оценено погрешностью в 0,006% на один погонный метр.

4. *Температурное изменение емкости низковольтного плеча* компенсируется программным способом за счет контроля температуры в измерительной секции, поэтому температурная погрешность оценивается не более 0,05%.

5. *Погрешность АЦП* составляет около 0,01, 0,02%. Среднеквадратичное суммирование указанных погрешностей позволяет сделать вывод, что ожидаемая суммарная погрешность измерения высокого напряжения не будет превышать $\pm 0,2\%$, что соответствует измерительным трансформаторам напряжения с классом точности 0,2 по ГОСТ 1983—2001.

Отличия и преимущества цифрового измерителя напряжения. Цифровой измеритель напряжения емкостного типа имеет ряд преимуществ перед традиционным электромагнитным измерительным трансформатором напряжения. Сопоставление технико-экономических характеристик трансформаторов напряжения традиционного (электромагнитного) типа и на основе емкостного делителя с оптоэлектронным цифровым выходом приведено в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика (параметр)	Электромагнитный трансформатор напряжения (рис. 2)	Цифровой измеритель напряжения (рис. 1,а)
Преобразование напряжения	Трансформация с помощью обмоток высокого и низкого напряжения	Емкостный делитель с высоковольтным и низковольтным плечом

Область применения	КРУЭ	КРУЭ
Номинальное напряжение	220 кВ	220 кВ
Шкала номинальных напряжений	$220/\sqrt{3}/0,1/\sqrt{3}/0,1/\sqrt{3}/0,1$ кВ	Выход на АЦП
Способ соединения	УО/УО/УО разомкнутый треугольник	Выход на АЦП
Наибольшее первичное рабочее напряжение	$252/\sqrt{3}$ кВ	$252/\sqrt{3}$ кВ
Номинальная частота	50 Гц	50 Гц
Точность измерения	0,2/0,5/3Р,	0,2
Номинальная выходная мощность	100 В _А /150 В _А /300 В _А	Параметр не является ограничительным
Предельная выходная мощность (постоянная)	1000 В _А	Параметр не является ограничительным
Номинальное выдерживаемое напряжение:		
грозовой импульс	950 кВ	950 кВ
напряжение промышленной частоты для первичной стороны	395 кВ (1 мин)	395 кВ (1 мин)
то же для вторичной стороны	3 кВ (1мин)	
Кратность перенапряжения кратковременной промышленной частоты	1,9 (30 с) 1,2 (непрерывно)	1,9 (30 с) 1,2 (непрерывно)
Диапазон рабочих температур по техническим требованиям для КРУЭ	-45°C , $+40^{\circ}\text{C}$	-45°C , $+40^{\circ}\text{C}$
Давление элегаза	0,4 МПа	0,4 МПа
Габаритные размеры (диаметр ϕ продольный размер)	1820 ϕ 2400 мм	965 ϕ 1255 мм
Заполняемый газовый объем	3,25 м ³	0,63 м ³
Общая масса в рабочем состоянии	~1600 кг	~380 кг
Проведение испытаний	Отдельно повышенной частотой	Возможно совместно с другим оборудованием
Срок службы	30 лет	50 лет
Стоимость материалов	1 500 000 руб.	200 000 руб.

В табл. 1 не проводится сравнение вторичных цепей, так как постоянно идет усовершенствование и удешевление микропроцессорных средств.

Устройство цифрового преобразования — это вторая функциональная и конструктивная часть цифрового измерителя напряжения. Оно выполняет функции АЦП и узла объединения (MU) сигналов ячейки в единый пакет цифровых выборок мгновенных значений этих сигналов, так называемый фрейм. В набор сигналов входят не только сигналы фазных напряжений, но и линейные токи, сигналы от датчиков давления и температуры. Структурная схема цифрового измерения и преобразования аналоговых сигналов ячейки КРУЭ показана на рис. 3. Представленная структурная схема является общей для сигналов от датчиков тока и напряжения, что соответствует требованиям стандартов по построению объединительного устройства. В данной статье рассматриваются вопросы измерителя напряжения.

Особенностью реализации устройства цифровой обработки в данном случае является возможность подачи аналоговых сигналов от датчиков напряжения на входы АЦП без применения гальваноразвязок. Поскольку вторичные цепи датчиков заземлены на оболочку КРУЭ, то целесообразно присоединить на этот же потенциал нуль АЦП и всего цифрового устройства преобразования. При этом

изоляция вторичных потребителей цифровой информации от измерительных датчиков обеспечивается применением оптических Ethernet-каналов, которые и выполняют роль гальваноразвязок.

Низковольтное плечо емкостного делителя реализуется в виде набора высокоточных конденсаторов. Поскольку входы АЦП и нижнего плеча датчика напряжения имеют общий нуль, привязанный к «земле» оболочки КРУЭ, целесообразно конденсаторы нижнего плеча располагать не внутри оболочки, подверженной значительному перепаду температур, а в составе устройства цифрового преобразования (в виде специальной платы), где легко можно принять недорогие меры по термостатированию как нижнего плеча делителя напряжения, так и собственно устройства АЦП.

Напряжение в средней точке делителя рассчитывается исходя из заданного максимального фазного напряжения на высоком потенциале и входного диапазона АЦП. Возможный наброс напряжения при коммутациях и авариях в силовых цепях не страшен для входов АЦП, так как в АЦП предусмотрена встроенная защита от перенапряжения. Гораздо опаснее для данной схемы импульсные перенапряжения, вызванные грозовыми разрядами большой мощности. В этом случае требуются энергопоглощаемые элементы защиты от перенапряже-

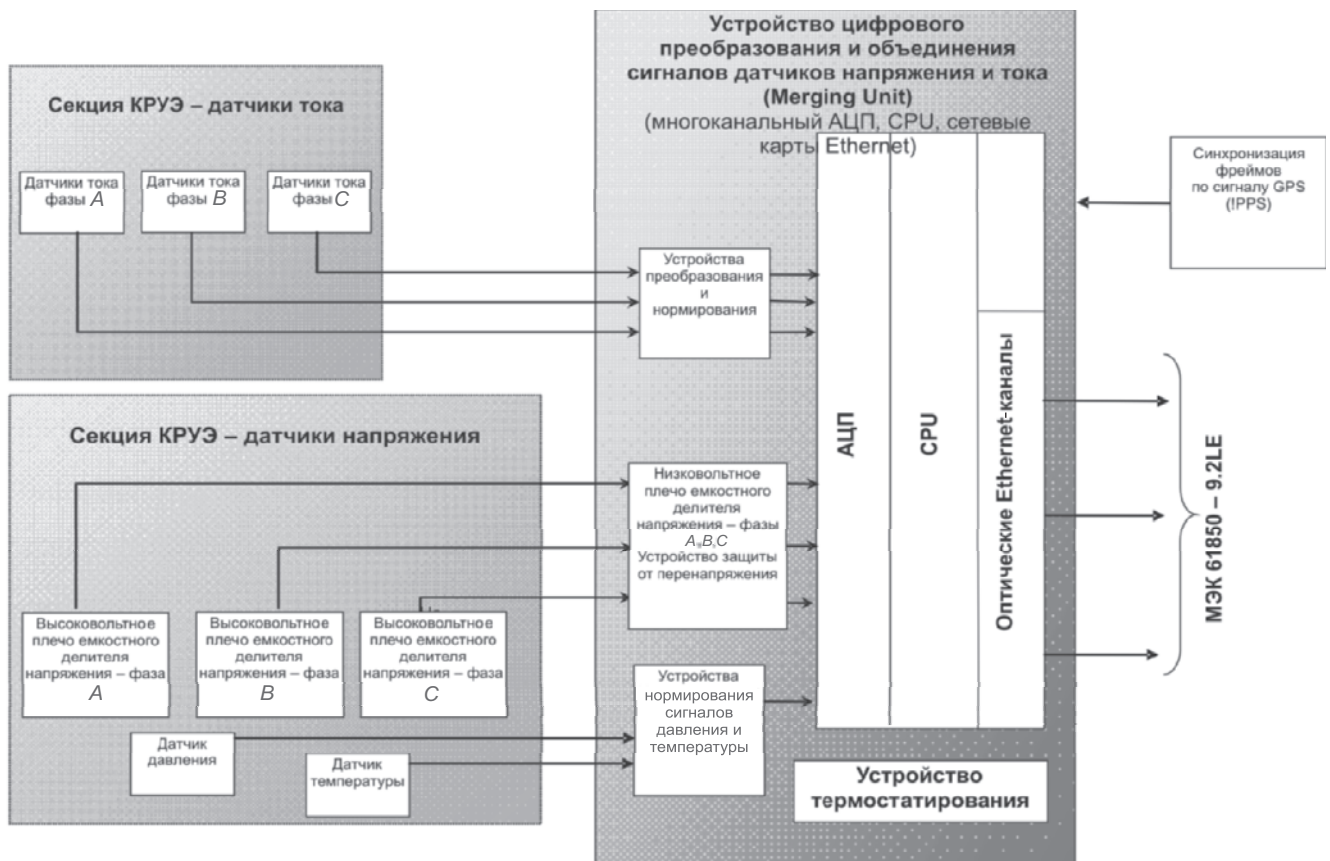


Рис. 3. Структурная схема цифрового преобразования сигналов измерения для ячейки КРУЭ

ния. Эту проблему можно решить применением быстродействующих варисторов или симметричных TVS-диодов.

Задачи аналого-цифрового преобразования известны, но в данном случае есть ряд особенностей. Помимо того что АЦП должно быть многоканальным, оно должно иметь программные настройки входных диапазонов, а в лучшем случае и коэффициентов усиления отдельно для каждого канала. Это позволит получить максимальную разрешающую способность, а как следствие — и точность для всех каналов, обрабатывающих как сигналы фазных напряжений, так и сигналы от датчиков давления и температуры. Вторым условием является параллельная обработка сигналов или применение мультиплексирования для малого числа каналов. Третьим условием является необходимость программирования частоты запуска и реализации синхронизации запуска от внешних сигналов синхронизации типа 1PPS службы GPS или ГЛОНАСС. Указанным требованиям удовлетворяют многоканальные программируемые АЦП производства фирмы «РУДШИЛ».

Все сигналы подаются в устройство цифрового преобразования, где нормируются и преобразуются АЦП в цифровую форму. Следующей задачей являются объединение сигналов в единый фрейм и организация коммуникации со всеми потребителями цифровой информации. Эта задача реализована в соответствии с требованиями на цифровые трансформаторы напряжения МЭК 60044-7 и требованиями построения интерфейсов для цифровых подстанций согласно МЭК 61850.

Задачу преобразования сигналов в цифру и объединения сигналов в единый фрейм можно выполнить, разработав и изготовив специальное устройство. Оно, конечно, будет выгодно отличаться малыми габаритами, энергопотреблением и т.д., но требует значительных средств на разработку и освоение производства. Авторы статьи использовали типовые унифицированные составные части и элементы, широко доступные на рынке.

Задачу формирования фрейма и коммуникации информации выполняют процессорная плата с шиной PCI (на эту же шину работает и АЦП «РУДШИЛ») и набор сетевых карт с оптическим интерфейсом. Процессор считывает сигналы одной выборки (сигналы тока и напряжения трех фаз одной ячейки, а также сигналы от датчиков давления и температуры), объединяет их в выходной Ethernet-фрейм (в соответствии с протоколом 9.2 LE стандарта МЭК 61850). Частота передачи фреймов задается программно. Моменты съема сигналов и формирования фреймов для всех ячеек под-

станции синхронизируются от общего сигнала точного времени.

Для выполнения требований по метрологической точности в заданном диапазоне температур устройство выполнено в виде термобокса с автономным поддержанием режима термостатирования. Следует отметить, что во избежание дополнительного нагрева устройства цифрового преобразования от оболочки КРУЭ устройство размещается в отдельном малогабаритном шкафу, который монтируется в ячейке КРУЭ на отдельно стоящих кронштейнах или стойках.

При компоновке первичных датчиков напряжения и устройства цифровой обработки особое внимание уделялось ЭМС и помехозащищенности. Устройство цифровой обработки размещается в непосредственной близости от секций с датчиками напряжения. Все цепи должны быть выполнены витыми парами в экране, экран изолирован от металлических частей ячейки. В соответствии с требованиями ПУЭ вторичные цепи всех датчиков заземлены — в данном случае присоединены к корпусу заземленной оболочки ячейки, к этой же точке присоединены экраны измерительных кабелей, идущих к цифровому устройству. Таким образом, обеспечена одноточечная схема заземления цифрового датчика напряжения в целом. Это исключает влияние контурных токов земли.

Важной мерой повышения ЭМС явился оптимальный выбор соотношения сигнал/шум. Исследования работы АЦП на силовых стендах с напряжением до 25 кВ показали, что для обеспечения оптимального соотношения сигнал/шум динамический диапазон АЦП должен быть не менее ± 5 В.

Программное обеспечение предназначено для функционирования в среде MS-DOS версии 7.0. В качестве процессорного модуля может применяться любой PC-совместимый контроллер с тактовой частотой процессора не менее 400 МГц. В качестве устройства оцифровки сигналов применяется программируемое АЦП типа LA-1.5PCI производства ЗАО «РУДШИЛ».

Для осуществления транспортировки цифровой информации потребителям используются оптические сетевые карты Ethernet со скоростью передачи данных 100 Мбит/с. Интерфейсом к сетевой карте служит пакетный драйвер спецификации PC/TCP. Пакетный драйвер должен быть запущен до загрузки рабочей программы.

В случае необходимости доставки информации одновременно по разным протоколам, в частности по МЭК 61850-9-1 или МЭК 61850-9-2LE, либо с разными частотами дискретизации, в устройстве

предусмотрены слоты для установки дополнительных сетевых карт.

В программное обеспечение входит конфигурационный файл, который содержит все настройки и необходимую для работы программы информацию, задаваемую в текстовом виде.

Программное обеспечение проверено при работе с программным эмулятором по выделенной линии и при работе устройства в локальной сети. В качестве приемников информации использовались все компьютеры, включенные в локальную сеть. На входы АЦП подавались сигналы от звукового генератора в полосе частот от 5 Гц до 4 кГц, проверялся уровень смещения и помех при закороченном входе АЦП. Частота дискретизации задавалась равной 80 и 256 выборкам за период промышленной частоты.

Результаты исследований. В процессе испытаний подтвердились предположения, касающиеся факторов, влияющих на точность и стабильность измерений. Любое изменение в геометрии конструкции, а также изменение давления и температуры влечет за собой изменение емкости верхнего плеча. Для предотвращения этого в конструкции датчика напряжения предусмотрено жесткое крепление электродов, выбор оптимальных материалов и установка датчиков давления и температуры.

Для уменьшения уровня помех и взаимного влияния сигналов смежных фаз внутри газоизолированного корпуса, как и снаружи, используются экранированные изолированные измерительные проводники. Заземление всех экранов должно проводиться в одной точке, в данном случае на клеммнике ячейки. В ходе испытаний не выявлено влияния длины измерительных проводов от клеммника оболочки до устройства цифрового преобразования

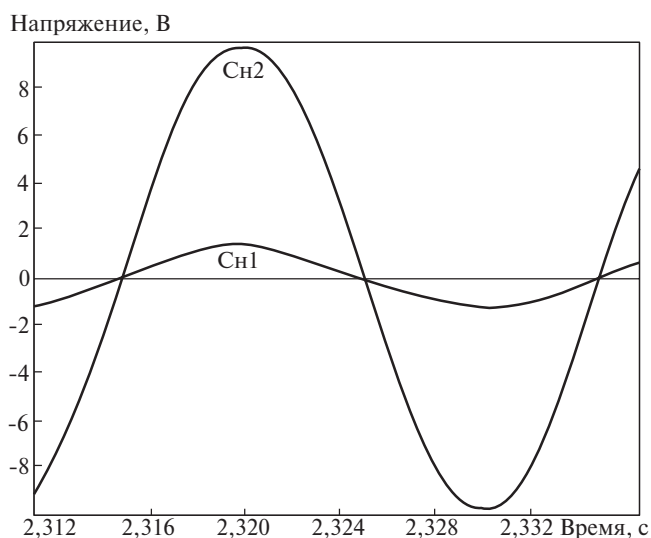


Рис. 4. Цифровые осциллограммы сигналов делителя напряжения (Сн1) и эталонного ТН (Сн2)

как на точность измерения, так и на уровень шумов.

Испытания были проведены при напряжениях до 25 кВ на макете с воздушной изоляцией. Измерения на макетном образце показали высокую стабильность, погрешность определялась по сравнению с эталонным трансформатором напряжения.

Продольная длина электрода является одним из параметров, определяющих емкость верхнего плеча делителя, и в значительной степени влияет на чувствительность системы измерений.

Таблица 2

Показания, В		Относительная погрешность, % (по отношению к эталону)
делителя напряжения	эталона (ТН класса 0,1%)	
0,2376	0,2367	-0,3802
0,2379	0,2364	-0,6345
0,2365	0,2358	-0,2968
429,7976	426,8854	-0,6821
430,0807	426,3111	-0,8842
429,5359	426,4303	-0,7282
1284,1913	1284,1243	-0,5217
1290,6721	1287,9318	-0,2127
1288,7301	1284,8945	-0,2985
3042,5969	3039,6730	-0,0962
3043,4607	3040,7014	-0,0907
3043,7543	3041,7304	-0,0665
5269,8741	5268,7246	-0,0218
5270,6449	5269,3803	-0,0239
5271,3780	5270,2412	-0,0216
10713,0149	10733,8095	0,1937
10711,7248	10717,4199	0,0532
10717,9528	10729,2480	0,1053
15995,5255	16010,0322	0,0906
15994,7828	16011,7753	0,1061
15989,3380	16009,5507	0,1263
22916,7865	22899,7890	-0,0742
22921,9978	22904,2246	-0,0776
22928,7570	22897,9531	-0,1345
25457,6780	25447,5859	-0,0396
25457,4187	25447,6875	-0,0382
25456,7774	25450,0957	-0,0262

На рис. 4 приведены цифровые осциллограммы сигналов с делителя напряжения и эталонного ТН, полученные программой регистрации мгновенных значений при задании на емкостном делителе на-

пряжения 25,5 кВ. Как видно по осциллограмме, в кривых не наблюдается фазового сдвига и искажения кривой сигнала делителя.

Для оценки точности измерения приводится распечатка значений, снимаемых с емкостного делителя, и эти данные сравниваются с данными, одновременно зафиксированными в канале цифрового измерения эталонного датчика, в качестве которого использовался ТН класса 0,1%. Измерения проводились с помощью программы одновременной фиксации действующих значений сигналов от устройства цифрового преобразования датчика напряжения и от устройства измерения напряжения ТН, в качестве которого использовался программируемый мультивольтметр высокого класса точности Keithley 2000. Показания каналов промасштабированы в физических единицах измеряемых сигналов (табл. 2).

Заключение. Цифровой измеритель напряжения на базе емкостного делителя для ячеек КРУЭ на подстанциях с цифровой техникой является перспективным направлением развития средств измерения для защит, контроля и мониторинга цифровых подстанций. Цифровой измеритель напряжения значительно превосходит традиционные трансформаторы напряжения по ряду показателей и позволяет получить требуемую точность как для каналов измерения, так и для устройств защит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелян В.Г. Физическая химия элегазового электротехнического оборудования. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
2. Голубев Б.П., Смирнов С.Н., Бекетов М.П. Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости шести-

фтористой серы при высоких параметрах состояния. — ТВТ, 1983, т. 21, № 3.

[31. 01.12]

Авторы: Иванов Андрей Сергеевич окончил институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ (ТУ)) в 2007 г. Инженер 1 кат. Всероссийского электротехнического института (ФГУП ВЭИ).

Местергази Василий Алексеевич окончил МЭИ в 1971 г. Старший научный сотрудник ФГУП ВЭИ.

Носик Лариса Петровна окончила факультет автоматизации и телемеханики Харьковского политехнического института (ХПИ) в 1958 г. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Остапенко Евгений Ильич окончил электроэнергетический факультет ХПИ в 1961 г. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Научно-технические основы создания внешней изоляции оборудования высокого и сверхвысокого напряжения». Скончался в 2011 г.

Парфенов Дмитрий Евгеньевич окончил факультет специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Инженер-конструктор 1 кат. ФГУП ВЭИ.

Собакарь Тарас Владимирович окончил факультет вычислительной техники и программирования Государственной академии управления в 1995 г. Ведущий инженер ФГУП ВЭИ.

Чемерис Владлен Семенович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1953 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Коммутационная износостойкость элементов дугогасительных устройств автокомпрессионных элегазовых выключателей» в ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).