



УДК 621.311

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

**А.А. Давыдов**, инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

**А.С. Давыдов**, кандидат технических наук, директор НПП "Дельта-ВХ", г. Харьков

**Ю.Ф. Павленко**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

**А.Н. Попенака**, главный конструктор НПП "Дельта-ВХ", г. Харьков



А.А. Давыдов



А.С. Давыдов



Ю.Ф. Павленко



А.Н. Попенака

*Рассматриваются результаты разработки и внедрения цифровых технологий для измерения электроэнергетических параметров, а также подходы к метрологическому обеспечению соответствующих средств измерений.*

*The paper describes the development and implementation results of digital technologies for electric-power parameter measurements as well as the methods of the metrological assurance of such measuring instruments.*

Прогресс цифровых информационных технологий и их проникновение во все сферы производственной деятельности и быта современного человека обусловили в последние десятилетия высокую динамику развития измерений в электроэнергетике.

Более ста лет после открытия Фарадеом электромагнитного эффекта структура измерительного канала (ИК) в энергетических системах оставалась практически неизменной (рис. 1)[1].

При этом опережающими темпами повышалась точность и совершенствовались низковольтные средства измерений (СИ) в сравнении с первичными датчиками – высоковольтными электромагнитными измерительными трансформаторами.

Особенно наглядны изменения в счетчиках электрической энергии (ЭЭ). Современные счетчики ЭЭ, сохранив старое название, стали многофункциональными микропроцессорными измерительными приборами, измеряющими практически все электроэнергетические величины, в том числе и показатели качества электроэнергии (ПКЭ). Это стало возможным только в последние десятилетия благодаря развитию методов цифровой обработки сигналов, повышению точности и быстродействия интегральных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), появлению современных быстродействующих интерфейсов и процессоров, способных обрабатывать большие массивы данных в реальном времени.

И если сегодня метод измерения и обработки мгновенных значений сигналов (напряжения и тока), запатентованный еще в 60-е гг. прошлого столетия (в англоязычных странах этот метод кратко называется Sampling method, в прямом переводе – метод "выборки"), используется только в наиболее прогрессивных моделях счетчиков, то в ближайшие годы они неизбежно вытеснят модели, основанные на методах импульсной или дельта-сигма-модуляции, так же как последние практически вытеснили электродинамические (индукционные) счетчики.

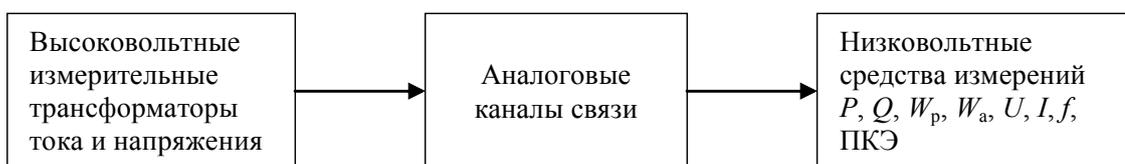


Рис. 1. Структура ИК

В последние 5–10 лет ряд зарубежных фирм [2, 3] начал серийный выпуск принципиально новых средств высоковольтных измерений и оснащение ими реальных систем учета на линиях электропередачи до 500 кВ. Причем, такие средства высоковольтных измерений успешно эксплуатируются уже не только в США, Канаде, странах Евросоюза, но и в России.

Речь идет о так называемых электронных трансформаторах или преобразователях тока (ЭлПТ), основанных на другом эффекте Фарадея – повороте плоскости поляризации линейно поляризованного света в постоянном магнитном поле, открытом им еще в 1845 г. Электронные преобразователи напряжения (ЭлПН) основаны также на использовании оптического эффекта, открытого в 1884 г. и названного в честь автора электрооптическим (пьезооптическим) эффектом Погкельса.

Эти оптические эффекты нашли свое практическое применение только в начале XXI века, но, тем не менее, “их достоинства и преимущества перед электромагнитными трансформаторами и преобразователями слишком очевидны и неоспоримы” [4], чтобы можно было усомниться в их широком внедрении в ближайшем будущем в электроэнергетику и промышленность.

Упрощенные структурные схемы ЭлПТ и ЭлПН приведены на рис. 2.

Принцип действия как датчика тока, так и датчика напряжения заключается в изменении со-

стояния поляризации светового потока: в первом случае – при воздействии на него магнитного поля (оптический эффект Фарадея), во втором – при воздействии электрического поля, создаваемого напряжением между электродами. Таким образом, в первом случае изменение угла поляризации светового потока пропорционально мгновенному значению напряженности магнитного поля  $h_j$ , а следовательно, мгновенному значению измеряемого тока  $i_j$ , во втором – мгновенному значению напряженности электрического поля  $e_j$  или измеряемого напряжения  $u_j$ .

Устройство и принцип действия ЭлПН и ЭлПТ определяют и их преимущества перед электромагнитными трансформаторами [1]:

- более широкий диапазон измерений;
- отсутствие явлений насыщения, гистерезиса, остаточного изменения параметров после короткого замыкания;
- отсутствие явлений резонанса;
- широкий частотный диапазон, позволяющий анализировать высшие гармоники напряжения и тока непосредственно в высоковольтных цепях;
- отсутствие влияния нагрузки вторичных цепей и дополнительных погрешностей, вызываемых этим влиянием;
- возможность использования одного высоковольтного датчика для решения задач как измерения, так и защиты управления;

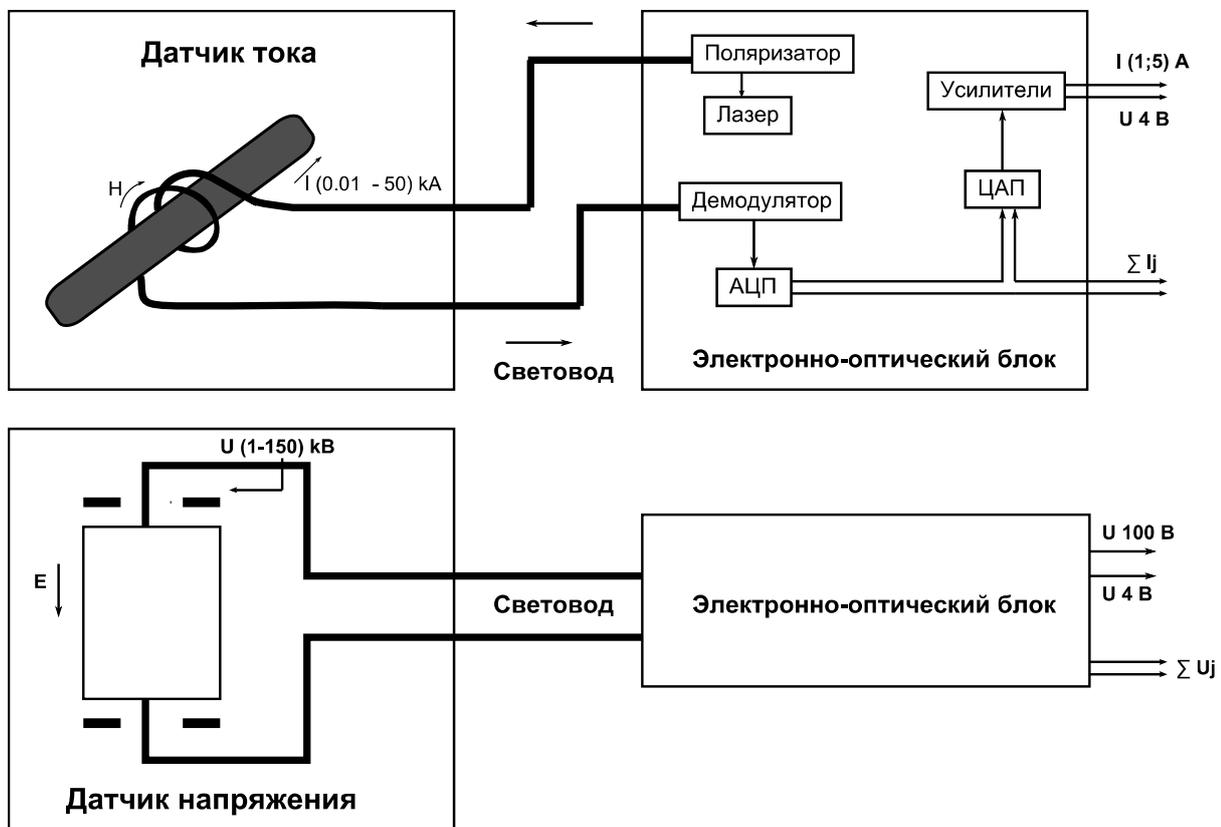


Рис. 2. Упрощенные структурные схемы ЭлПТ и ЭлПН

- высокая устойчивость оптоволоконных информационных каналов к внешним электромагнитным помехам;
- существенное снижение требований к изоляции и, как следствие, существенно меньшие габаритные размеры, масса, более высокая пожароустойчивость в связи с отсутствием масляной изоляции;
- возможность объединения в один конструктив ЭлПН и ЭлПТ.

Существенно, что ЭлПТ и ЭлПН изначально спроектированы для цифрового представления результатов измерений исходных электрических величин – мгновенных значений токов и напряжений непосредственно в точке учета. Исключаются промежуточные аналоговые преобразования и можно уже не прибегать к использованию множества дополнительных низковольтных приборов: измерительных преобразователей тока, напряжения, частоты, активной и реактивной мощности, счетчиков активной и реактивной энергии, измерителей показателей качества и т.д. Все их функции более успешно выполнит персональный компьютер с соответствующим набором программного обеспечения. Сохранившиеся же в международных стандартах [5, 6] требования к наличию у ЭлПТ и ЭлПН аналоговых выходов можно рассматривать лишь как дань традиции, обусловленную желанием сохранить преемственность в системах измерения в электроэнергетике.

При использовании ЭлПТ и ЭлПН структура ИК будет иметь вид, представленный на рис. 3.

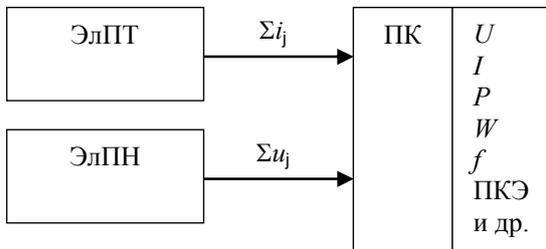


Рис. 3. Структура ИК при использовании ЭлПТ и ЭлПН

Следовательно, в узле учета будут непосредственно измеряться только две электрические величины – мгновенные значения тока  $i_j$  и напряжения  $u_j$ . Все остальные электроэнергетические величины, необходимые для управления производством, распределения и коммерческого учета электрической энергии в настоящее время уже могут быть вычислены в персональном компьютере (ПК) из массивов мгновенных значений тока и напряжения. Это стало возможным, потому что и быстродействие первичных оптических датчиков (оба оптических эффекта позволяют осуществлять модуляцию световых потоков с частотами  $10^{12} \dots 10^{14}$  Гц), и возможности современных компьютеров позволяют вычислять их в реальном времени с ничтожно малыми погрешностями.

На современном электроэнергетическом рынке представлены и электромагнитные ЭлПТ с цифровым представлением измерительной информации. Например, известной фирмой “Power Measurement” разработан и выпускается сравнительно небольшой по габаритным размерам и массе активный электромагнитный трансформатор тока с разъемным сердечником (электронные токовые клещи), вторичный ток которого преобразуется в напряжение, а затем в цифровой код, передаваемый на частоте 2,5 ГГц по системе радиосвязи в помещении на расстоянии до 500 м, где и обрабатываются результаты измерений.

Все это говорит об устойчивой тенденции перехода в электроэнергетике на цифровые информационные измерительные технологии.

Система метрологического обеспечения (МО) измерений в электроэнергетике в нашей стране и за рубежом в настоящее время содержит 3 практически независимые ветви:

- МО измерительных трансформаторов напряжения;
- МО измерительных трансформаторов тока;
- МО низковольтных СИ электроэнергетических величин.

Имеющиеся в Украине эталоны и системы передачи размеров электроэнергетических единиц на сегодняшний день обеспечивают передачу размеров единиц как высоковольтным, так и низковольтным СИ. Но так как существующая аналоговая структура ИК на сегодняшний день явно избыточна, переход к современным информационным измерительным технологиям неизбежен и в Украине. Переходу на цифровые измерительные технологии в электроэнергетике должны соответствовать изменения и в структуре эталонной базы страны.

В ведущих метрологических институтах мира: NIST (США), NPC (Канада), PTB (Германия), ВНИИМ (Россия) – проводятся работы по созданию новой системы “цифровых” эталонов и уже проведены первые сличения элементов такой системы [7].

По мнению Е.З. Шапиро [1], новая структура эталонной базы должна включать: цифровой синтезатор (генератор) токов и напряжений; эталонные трансформаторы напряжения и тока; эталоны вольт, ампера, секунды; быстродействующие АЦП; исходные СИ коэффициентов масштабного преобразования, вычислительный блок в сочетании с системой синхронизации и специализированным программным обеспечением. Сделан вывод, что при структуре эталона в виде измерительно-вычислительного комплекса, осуществляющего прямые измерения только мгновенных значений тока и напряжения, можно получить аналитические выражения для всех или большинства электроэнергетических величин, в том числе и мощности, энергии, ПКЭ, позволяющие оценить их погрешности как функции погрешностей прямых измерений напряжения и тока.

НПП “Дельта-ВХ” совместно с ННЦ “Институт метрологии” (Харьков) начало работы по созданию эталона на основе цифровых измерительных технологий еще в 2001 г. Первоначально к разрабатываемому измерительно-вычислительному комплексу (ИВК) “Метролог” не предъявлялось требование поверки высоковольтных средств измерений в силу специфики этих измерений: диапазоны синтезатора тестовых сигналов и цифровых измерительных преобразователей тока и напряжения ограничены по току 100 А, по напряжению 1000 В. Однако при использовании уже имеющейся эталонной базы для высоковольтных измерений ИВК “Метролог” может быть применен и для поверки высоковольтных ЭлПН и ЭлПТ с цифровым выходом, то есть на сегодняшний день в Украине уже имеется всё необходимое оборудование для аттестации ИК в электроэнергетике, выполненных на основе цифровых измерительных преобразователей в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 3.

В состав ИВК “Метролог” входят следующие аппаратные и программные средства: синтезатор (источник) трехфазной системы токов и напряжений; комплект цифровых измерительных преобразователей токов (ИПТ), напряжений (ИПН) и частоты (ИПЧ); ПЭВМ с программным обеспечением “Метролог” и принтером. Упрощенная структурная схема трехфазного ИВК “Метролог” представлена на рис. 4, который отражает необходимый минимальный набор блоков и узлов, а также связи между ними.

Процесс измерения, преобразования, обработки и отражения результатов вычисления электроэнергетических величин характеризуется моделью, представленной на рис. 5.

Из представленных на рис. 4 и 5 структурной схемы ИВК “Метролог” и его модели следует, что в данном эталонном комплексе прямые измерения производятся только для трех электрических величин: напряжения, тока и частоты. Следовательно, для его метрологической аттестации и поверки

принципиально необходимы только следующие эталоны: постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока и времени (частоты). Значения погрешностей измерения других электроэнергетических величин, как уже отмечалось выше, могут быть определены расчетным путем на основе математических операций над массивами данных, содержащих коды мгновенных значений токов и напряжений. Конечно, результат вычисления любой другой величины, измеряемой косвенным образом, как и результат прямых измерений, будет содержать и методическую погрешность, зависящую от выбранного алгоритма математических действий, но для современных компьютеров она ничтожно мала в сравнении с инструментальными погрешностями первичных датчиков – измерительных преобразователей токов и напряжений.

Диапазоны генерируемых и измеряемых величин в ИВК “Метролог” были определены, исходя из поставленной задачи – возможности поверки большинства средств измерения электроэнергетических величин, применяемых во вторичных цепях трехфазных электрических сетей, в том числе эталонных счетчиков и измерителей показателей качества ЭЭ:

Диапазон генерируемых и измеряемых напряжений, В	0...1000
Диапазон токов	1 мА...120 А
Частотный диапазон, кГц	0...10
Выходная мощность каждого канала источника напряжения, ВА	20 или 80
Выходная мощность каждого канала источника тока, ВА	20...80
Основная относительная погрешность измерения напряжения, %	0,01...0,05
Основная относительная погрешность измерения тока, %	0,01...0,05
Основная относительная погрешность измерения частоты переменного тока, %	0,005.

Модульный принцип построения ИВК “Метролог” дает возможность комплектовать его необ-

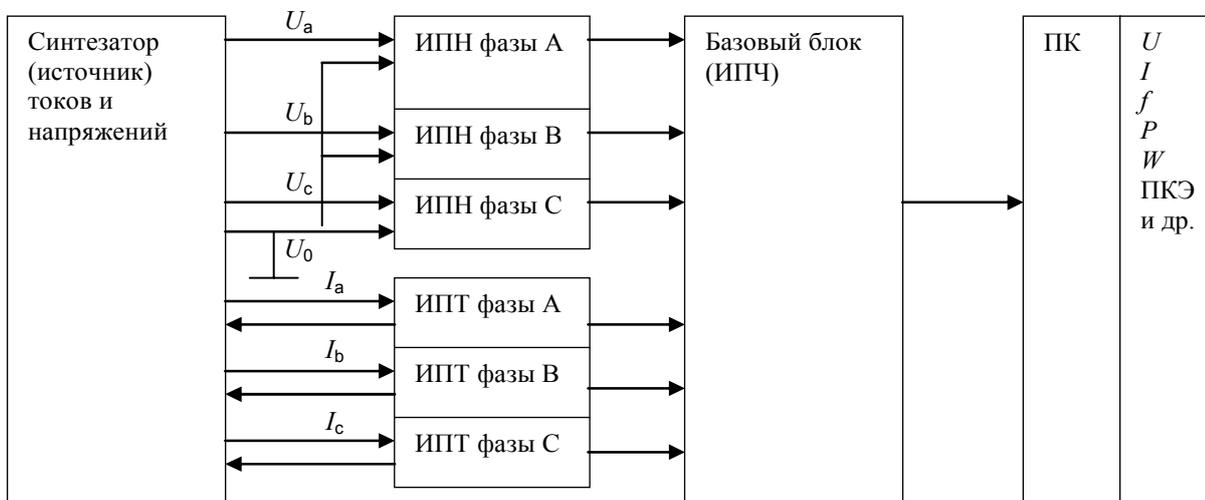


Рис. 4. Структурная схема ИВК “Метролог”

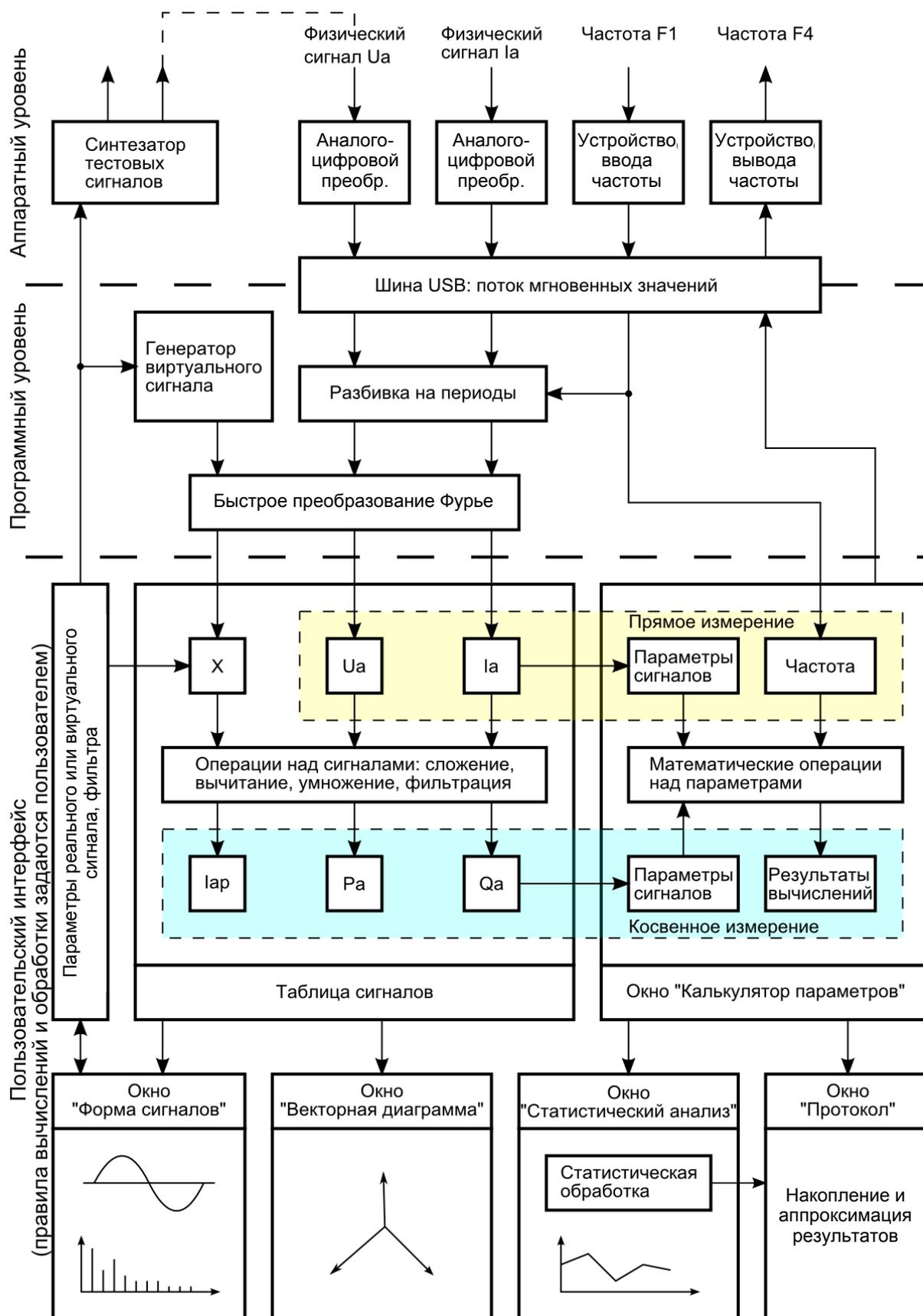


Рис. 5. Модель ИВК "Метролог"

ходимым набором средств, позволяющим решать различные измерительные задачи, в том числе и в области высоковольтных измерений.

Для упрощения процедуры первичной метрологической аттестации ИВК "Метролог", по нашему мнению, необходимо доукомплектовать набором

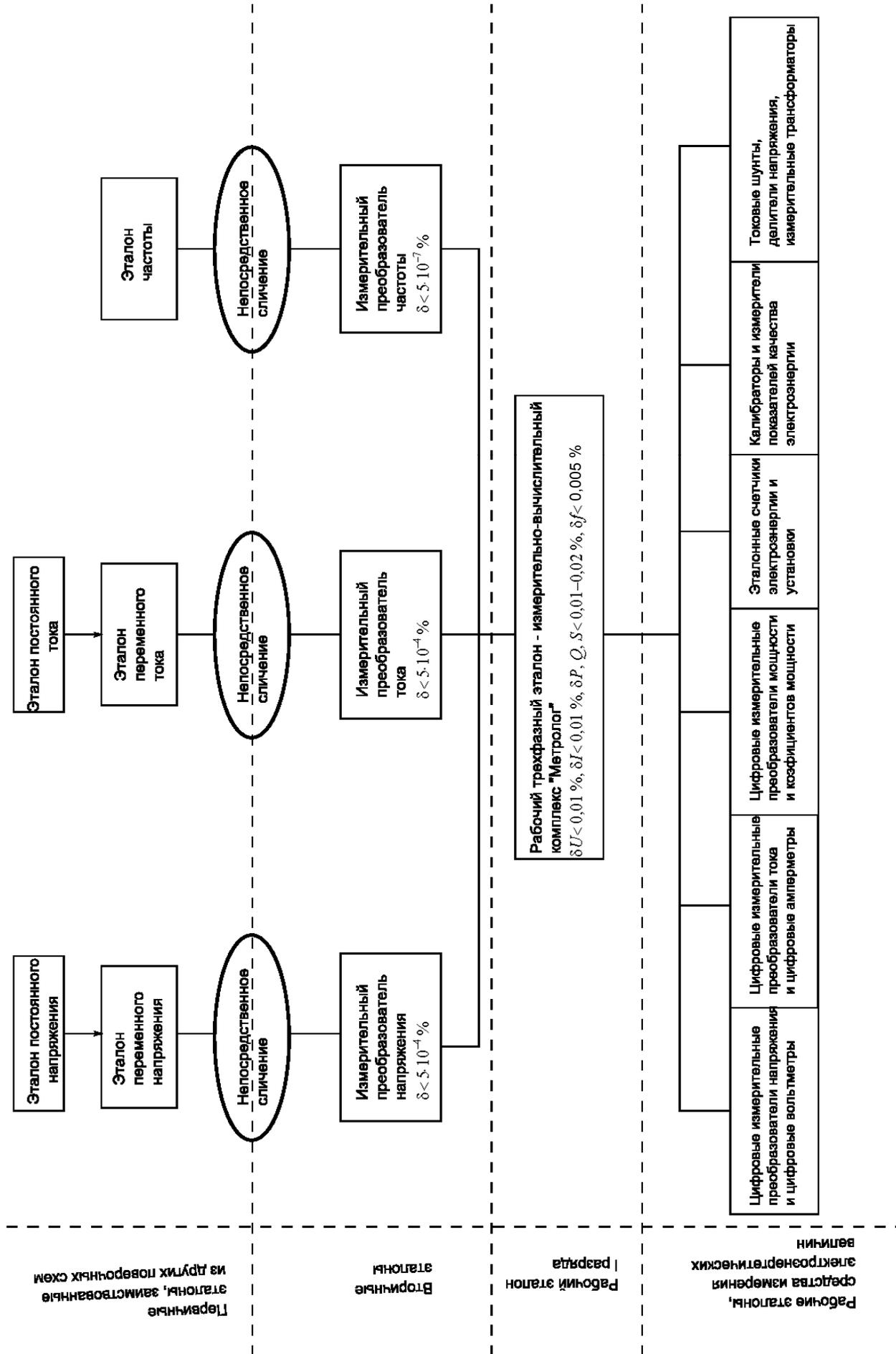


Рис. 6. Принцип построения системы метрологического обеспечения (поверочной схемы) для средств измерения электроэнергетических величин

безіндуктивних шунтов, делителів напруги і измерительними преобразователями, забезпечують точність измерень 0,002...0,005 %.

В цьому випадку система метрологічного забезпечення засобів вимірювання електроенергетичських величин матиме вигляд, представлений на рис. 6, тобто вона представити собою децентралізовану систему забезпечення єдинства вимірювань.

#### Список літератури

1. Шапиро Е.З. Перспективні измерительні технології в області вимірювань і аналізу якості електричної енергії і особливості їх метрологічного забезпечення / Е.З. Шапиро // Законодавча і прикладна метрологія. – 2006. – № 5. – С. 8–16.
2. Власов М. Високовольтні оптичні перетворювачі для систем вимірювання і аналізу якості електричної енергії / М. Власов, А. Сердцев // Енергорезерви. – 2006. – № 10. – С. 14–21.
3. Измерительные комбинированные преобразователи тока и напряжения NXVCT-121/145/245/362/420/550/800: справочник покупателя. – 1-е изд. – 2007. – С. 2–9.
4. Гуртовцев А.А. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Физические принципы работы, устройство и технические характеристики / А.А. Гуртовцев // Электрические сети и системы. – 2009. – № 8. – С. 56–71.
5. IEC 60044-7. Трансформаторы измерительные. Часть 7. Электронные преобразователи напряжения. – IEC, 2002.
6. IEC 60044-8. Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные преобразователи тока. – IEC, 2002.
7. NPC – NIST Inter – comparison of calibration system for current, transducers with a voltage output at power frequencies / E. So, P. Arseneau [et al.] // IEEE Transaction on instrumentation and measurement. – 2003. – Vol. 52, No 2. – P. 6–18.

УДК 621.317.421

## АНАЛІЗ ШВИДКОДІЇ ІНДУКЦІЙНИХ МАГНІТОМЕТРІВ

**В.О. Проненко,** науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НАК України (ЛЦ ІКД)

**В.Є. Корепанов,** доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки України, заступник директора ЛЦ ІКД, м. Львів



В.О. Проненко



В.Є. Корепанов

*Вперше виконано аналіз швидкодії індукційних магнітометрів та подано рекомендації щодо забезпечення її належного рівня.*

*The induction magnetometer response speed is analyzed for the first time; recommendations how to assure its required level are given.*

Останнім часом у геофізиці щораз більшого поширення набувають імпульсні методи зондування земної кори: в заданому місці розвідування встановлюють потужний генератор імпульсів і мережу вимірювальних приладів – електричних та магнітних давачів. Як правило, магнітні давачі – це індукційні магнітометри (ІМ), що набули широкого

застосування як більш широкодіапазонні й чутливі в діапазоні частот, вищих за доли герца. Потім за допомогою випромінювача, в основному у вигляді довгого кабеля, задають потрібну послідовність імпульсів та, застосовуючи систему давачів, вимірюють відгук досліджуваного середовища на ці імпульси. Зрозуміло, що потужні імпульси генератора струму перевантажують магнітні давачі, яким потрібен деякий час для виходу з насиченого стану. При цьому, чим швидше ІМ зможе почати вимірювання відгуку досліджуваного середовища на імпульси струму, тим менша глибина зондування може бути реалізована. Отже, швидкість відновлення ІМ після перевантаження й виходу на нормальний режим вимірювання відіграє в цих методах дуже важливу роль. Якщо в наземних умовах неможливо вимірювання можна деяким чином компенсувати багаторазовим увімкненням джерела струму, то при використанні рухомого джерела магнітного поля – при морському електророзвідуванні або аероелектророзвідуванні – забезпечення високої швидкодії ІМ особливо важливе через обмежену можливість і високу вартість повторень.

Із цього випливає, що збільшення швидкодії ІМ є важливою умовою їхньої конкурентоспроможності на ринку геофізичних приладів при решті