



Метрологическое обеспечение АСУ ТП

Александр Клёпов

Современные автоматизированные производства основаны на широком применении средств измерения, включая разнообразные датчики с аналоговым и цифровым выходом, исполнительные механизмы и программируемые контроллеры с соответствующими модулями ввода-вывода. В статье рассмотрен ряд вопросов, связанных с метрологическим обеспечением АСУ ТП и созданием прецизионных измерительных приборов, необходимых для калибровки и поверки средств измерения, на примере разработки портативного калибратора электрических сигналов СК-01.

История российского рынка измерительных приборов

Со времён СССР многое изменилось на рынке измерительных приборов: если до 80-х годов прошлого века закупки импортных приборов практиковались как редкие исключения из общего правила, то позднее крупные иностранные изготовители (Agilent-Keysight, Keithley, Fluke, Yokogawa и другие) заняли доминирующее положение на российском рынке. После введения экономических санкций против России и значительного снижения курса рубля по отношению к доллару в XXI веке возможности закупки импортных приборов сократились, а российское производство приборов за это время заметно отстало. Набрало популярность «отвёрточное производство», при котором ряд изготовителей не располагает документацией в объёме, позволяющем осуществлять полноценное сопровождение, модернизацию и технологическую независимость выпуска изделий [1].

В связи с этим возникла задача импортозамещения приборов иностранного происхождения, что на текущий момент вылилось в развёрнутую «Программу импортозамещения измерительной техники на 2018–2020 годы и на период до 2025 года» [2]. О результатах её выполнения мы узнаем позже, но уже сейчас настораживает то, что в открытом доступе не удаётся обнаружить упоминаний о ряде изделий, запланированных в программе на 2020 год.

Метрологические требования к системам автоматизации производства

В рамках данной статьи рассмотрим ограниченный (хотя и широко распространённый) класс приборов, связанных с измерением и генерацией сигналов постоянного тока и напряжения. Традиционным промышленным стандартом таких средств измерения в производственных системах длительное время считались значения класса точности на уровне 0,1. Однако сейчас по мере роста требований к точности и ресурсосбережению производственных процессов возникает необходимость повышения классов точности до уровня $\times 0,01$. Такие значения погрешностей уже реализуются в отдельных модулях современных российских контроллеров линеек FASTWEL I/O, REGUL [3, 4] и в ряде импортных изделий.

В соответствии со статьями 13 и 18 закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ все средства измерения в зависимости от области их применения подлежат обязательной (в том числе периодической) поверке и калибровке. Эталонные приборы, применяемые для поверки и калибровки производственных средств измерения, должны иметь более высокий класс точности (согласно [5] рекомендуется соотношение абсолютных погрешностей эталонного и проверяемого приборов не хуже 1:5, но допускается и 1:3). Соответственно, возник-

ают требования к классу точности на уровне не хуже 0,01 для необходимых эталонных приборов.

Анализ эталонных измерительных приборов

Рассмотрим основные группы доступных эталонных измерительных приборов. Адекватным вариантом для поверки и калибровки средств измерения постоянного тока и напряжения является применение соответствующих калибраторов, генерирующих такие сигналы с необходимой точностью (лидирующее положение в этой области по ассортименту и точности приборов занимает компания Fluke). Кроме того, возможно применение для генерации сигналов приборов более низкого класса точности, но с малым уровнем шумов (например, линейных источников питания), в этом случае в качестве эталонных приборов могут применяться мультиметры необходимого класса. Оптимально с функциональной точки зрения применение универсальных приборов типа SourceMeter (источник-измеритель) с возможностью одновременной генерации и измерения сигналов, такие изделия могут заменить до 5 стандартных приборов [6], хотя их условно можно отнести к группе калибраторов, так как их основное назначение — генерация точных аналоговых сигналов.

Существующие эталонные приборы применительно к выполнению поверки и калибровки производственных средств измерения по их конструктив-

ным особенностям и техническим характеристикам можно разделить на три группы (табл. 1).

Из таблицы можно сделать вывод, что для калибровки и поверки средств измерения с классом точности 0,1 можно применять практически любую из перечисленных групп приборов, хотя удобнее (особенно в реальных условиях эксплуатации) применение портативных приборов первой группы с классом точности на уровне 0,02. Если же требуется поверка/калибровка изделий с классом точности на уровне 0,05 и выше, приборы первых двух групп не подходят по метрологическим соображениям (особенно при генерации/измерении постоянного тока), а стационарные приборы высокой точности неудобны при транспортировке, достаточно дороги и предъявляют трудновыполнимые в производственных условиях требования к температуре окружающей среды. К приборам второй группы можно отнести мультиметр Agilent 34401A и SourceMeter Keithley серии 24xx, а к третьей группе — мультиметр Keysight 3458A и калибратор Fluke 5730A. Таким образом, задача повышения точности измерений в производственных системах тормозится отсутствием соответствующих эталонных приборов.

В связи с изложенным возникает задача создания современного портативного калибратора, генерирующего сигналы постоянного тока и напряжения, с классом точности на уровне 0,005–0,01, малочувствительного к влиянию температуры окружающей среды. На стадии ТЗ этот прибор получил условное наименование «Калибратор СК-01».

Основные конструктивные характеристики СК-01 представлены в табл. 2, характеристики питания — в табл. 3.

ПОРТАТИВНЫЕ КАЛИБРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В табл. 4 даны сравнительные характеристики трёх портативных калибраторов, включая СК-01. Следует заметить, что в продаже также имеются недорогие несертифицированные калибраторы производства КНР, однако нет гарантий, что их характеристики соответствуют заявленным метрологическим требованиям.

МЕНЮ ПРИБОРА

Максимальная простота использования прибора достигается посредством интуитивно понятного меню навигации (рис. 1).

Таблица 1

Группы эталонных приборов

Параметры приборов	Портативные	Стационарные типовые	Стационарные высокой точности
Масса	Не более 1 кг	Не более 5 кг	Более 8 кг
Время подготовки к работе	Не более 0,25 ч	1–2 ч	2–4 ч
Класс точности по напряжению DC	Ниже 0,01	Около 0,01	Выше 0,005
Класс точности по току DC	Ниже 0,01	Около 0,02	Выше 0,005
Диапазон рабочих температур	0...+50°C	0...+50°C	0...+50°C
Температурная погрешность	0,001...0,002%/°C	0,0005...0,002%/°C	0,0001...0,002%/°C

Таблица 2

Основные конструктивные характеристики СК-01

Габаритные размеры	Не более 204×103×35 мм
Масса	Не более 0,4 кг
Разрешающая способность матричного дисплея	Не менее 128×64 точки
Последовательные порты	USB 2.0, Ethernet (опция)

Таблица 3

Характеристики питания СК-01

Тип встроенных элементов питания	Li-Pol аккумулятор универсальный
Номинальное напряжение элементов питания	3,7 В
Количество элементов питания	1
Ёмкость элементов питания	Не менее 2500 мА·ч
Напряжение питания (разъём USB)	5 В
Ток потребления по цепи 5 В (в режиме зарядки аккумулятора)	Не более 500 мА

Таблица 4

Сравнительные характеристики СК-01 и популярных портативных калибраторов

Характеристика	СК-01	FLUKE 709	Метран 510 группа А
Режим программного управления	Имеется, язык SCPI	Отсутствует	Нестандартный протокол
Погрешность измерения постоянного тока*	0,005% (0...25 мА) 0,005% (4...20 мА) 0,005% (0...5 мА)	0,02% (0...24 мА)	0,0125% ± (0...22 мА) 0,0125% ± (0...5 мА)
Погрешность генерации постоянного тока*	0,005% (0...25 мА)	0,02% (0...24 мА)	0,0125% (0...25 мА) 0,0125% (0...5 мА)
Погрешность измерения постоянного напряжения*	0,005% (0...25 В) 0,005% (0...10 В) 0,01% (0...1 В)	0,017% (0...30 В)	0,0125% ± (0...100 мВ) 0,0125% ± (0,1...1 В) 0,0125% ± (1...11 В)
Погрешность генерации постоянного напряжения*	0,005% (0...25 В)	–	0,0125% (0...5 В)
Диапазон рабочих температур	0...+50°C	–10...+50°C	0...+50°C
Нормальные условия по температуре	+23 ± 5°C	+23 ± 5°C	+10...+40°C
Дополнительная температурная погрешность	±5 млн ⁻¹ /°C	±20 млн ⁻¹ /°C	±10 млн ⁻¹ /°C
Термостатирование	Имеется	Отсутствует	Имеется

*Значения погрешностей приведены к диапазонам сигналов



Рис. 1. Калибратор СК-01 в режиме меню

Главное меню прибора состоит из следующих пунктов:

- включение/выключение цепей;
- функции прибора;
- опции;
- информация.

Выбрав пункт «включение/выключение цепей», можно выполнить такие настройки прибора, как пауза – время в минутах, по истечении которого (после последнего действия с клавиатурой или обращения по каналам связи) прибор автоматически отключится с целью экономии энергии; термостат – включение термостата позволяет обеспечивать стабильную заданную температуру внутри прибора, практически исключая таким образом влияние температурной погрешности; пункт главного меню «функции прибора» позволяет выбрать режим работы генерации/измерение, а также, если требуется, произвести коррекцию нулей каналов генерации и измерения сигналов.

Режим генерации предназначен для воспроизведения требуемых видов электрических сигналов. При этом одновременно с генерацией тока или напряжения возможно измерение этих величин. Например, генерируется напряжение питания датчика и измеряется его выходной токовый сигнал (внеш-



Рис. 2. Калибратор СК-01 в режиме генерация/измерение

ний вид экрана при работе в этом режиме представлен на рис. 2). Кроме того, предусмотрены режимы генерации сигналов специальной формы (пила, треугольник, меандр...) заданной амплитуды и периодичности.

В режиме измерения прибор может применяться для настройки, калибровки и поверки различного рода датчиков и генерирующих приборов.

Перед началом работы в режиме измерения необходимо выбрать диапазон, в котором будут производиться измерения и тип сигнала (ток/напряжение), затем выполнить настройки фильтрации сигнала или выбрать режим измерения без фильтров.

С течением времени (в долгосрочных масштабах) может потребоваться корректировка показаний нуля при измерениях и генерации тока или напряжения. Если после проверки показания прибора при нулевом сигнале приближаются к пределам допустимой погрешности, следует выполнить коррекцию нуля. Для этого нужно выбрать соответствующий пункт меню.

Раздел главного меню «опции» предназначен для настройки параметров в долговременной памяти прибора, таких как дата и время, яркость подсветки дисплея, громкость звукового

подтверждения нажатия на клавиши (звук).

При выборе пункта главного меню «информация» пользователь может увидеть интересующие его данные о приборе, включая его версию и серийный номер.

«ПОПРОБУЙ СДЕЛАТЬ ХОРОШО, ПЛОХО САМО ПОЛУЧИТСЯ»

Для получения оптимальной точности конкретного измерительного прибора необходимо принять адекватные меры по снижению влияния разнообразных случайных факторов на результаты измерений. В процессе разработки калибратора СК-01 обращалось особое внимание на следующие виды и причины погрешностей.

1. Случайные погрешности измерений.

Эти погрешности возникают как в результате внутренних шумов в аналоговых цепях, так и из-за внешних помех. Снижение уровня шумов и влияния помех было достигнуто за счёт применения современной малопотребляющей элементной базы (включая 24-разрядный $\Sigma\Delta$ -АЦП с программируемым цифровым фильтром сетевых помех), корректной разводки аналоговых схем на 4-слойной печатной плате, использования Li-Pol аккумулятора, возможности дополнительной программной фильтрации результатов измерения. В результате при частоте измерений 4 Гц величина случайной погрешности измерений составляет (в зависимости от диапазона измерений) от 1 до 15 млн⁻¹, или ppm (1 ppm – part per million – одна миллионная часть измеряемого диапазона, соответствует погрешности 0,0001%).

2. Систематические погрешности измерений.

Сюда относятся все стабильные погрешности, вызванные разбросом параметров отдельных элементов аналоговой схемы (такие как отклонение нуля и масштаба, нелинейности преобразований сигналов). Снижение влияния этих погрешностей достигается в процессе калибровки прибора при измерении и генерации сигналов тока и напряжения с применением нелинейной аппроксимации зависимостей физических величин от измеренных значений кодов АЦП и кодов ЦАП – в зависимости от требуемых значений генерируемых физических величин. Корректная аппроксимация этих зависимостей мо-

жет быть выполнена с помощью метода полиномиальной регрессии. Это позволило обеспечить величину систематической погрешности (при проведении поверки сразу же после калибровки прибора, но по другому набору точек) для измерений сигналов тока и напряжения – на уровне $2\text{--}5 \text{ млн}^{-1}$, а для генерации – в пределах 10 млн^{-1} .

3. Температурные погрешности измерений. Эти составляющие погрешностей играют значительную роль при измерениях, в том числе для приборов высокой точности, так как параметры практически всех элементов аналоговых схем существенно зависят от температуры, при которой они работают. Величина этого влияния называется дополнительной температурной погрешностью, которая измеряется в единицах $\text{млн}^{-1}/^\circ\text{C}$ и для разных элементов может иметь величины от 0,01 (для прецизионных элементов) до нескольких сотен для обычных резисторов – понятно, что в аналоговых цепях использование таких резисторов не рекомендуется, обычно применяются элементы с ТКС (температурный коэффициент электрического сопротивления) на уровне $1\text{--}5 \text{ млн}^{-1}/^\circ\text{C}$.

В связи с этим для точных приборов (например, Keysight 3458A) погрешности нормируются по-разному в зависимости от возможных отклонений температуры окружающей среды (и, как следствие, температуры элементов аналоговых схем прогретого прибора) от тех условий, при которых производилась их калибровка/автокалибровка. Типичными значениями допустимых отклонений являются $\pm 1^\circ\text{C}$ и $\pm 5^\circ\text{C}$. Понятно, что поддержание заданной температуры с достаточной точностью даже в кондиционируемых лабораторных помещениях достигается с немалыми усилиями, а в производственных помещениях с мощным тепловыделяющим оборудованием этого достигнуть ещё сложнее. Эффективное решение в этой ситуации состоит в реализации термостаивания метрологически значимой части схемы путём её подогрева до заданной температуры, которая должна быть немного выше возможной температуры в приборе при любом режиме работы в пределах нормальной температуры окружающей среды (обычно $23 \pm 5^\circ\text{C}$). В нашем случае удалось реализовать поддержание

температуры внутри прибора с точностью $0,1^\circ\text{C}$, что сделало работу прибора в известных пределах независимой от температуры окружающей среды. За счёт применения пластмассового корпуса с низкой теплопроводностью потребность в энергии для регулирования температуры не превышает 1 Вт, и ёмкости небольшого аккумулятора хватает для автономной работы в таком режиме в течение рабочей смены. При подключении прибора к порту USB он может непрерывно работать в таком режиме.

4. Долговременный дрейф параметров.

Источником этой погрешности является старение элементов прибора с медленным изменением значений метрологически важных параметров – величины опорного напряжения, сопротивлений и т.д. Борьба с этими погрешностями возможна за счёт использования высокостабильных (обычно весьма дорогих) элементов схемы, ускоренного старения элементов (различные методы электротермотренировки) и наличия возможностей автокалибровки и коррекции нуля (автоматически или вручную). Радикальной мерой устранения этой погрешности является проведение калибровки прибора с уточнением текущих значений калибровочных коэффициентов, отражающих совокупность истинных значений метрологически значимых параметров аналоговой схемы. Возможности калибровки закладываются в firmware (прошивку) таких приборов. Эта процедура может проводиться одновременно с периодической поверкой приборов, в зависимости от результатов поверки.

5. Температурный гистерезис. Эта погрешность присуща таким критически важным элементам измерительных приборов, как источники опорного напряжения (ИОН), она может возникать в результате значительных нагреваний и охлаждений (выходящих на десятки градусов за пределы диапазона рабочих температур приборов) с возвратом температуры к нормальным условиям. Величина гистерезиса не поддаётся прямому расчёту и, в зависимости от значений температур и количества циклов изменения температуры, даже для достаточно точных ИОН может достигать десятков ppm. Известно, что при увеличении количества циклов величина гистерезиса уменьшается,

происходит приработка. Кроме того, по нашим наблюдениям, гистерезис значительно уменьшается после длительной (от одних до трёх суток) выдержки прибора в нормальных условиях в выключенном состоянии. Таким образом, при соблюдении правил эксплуатации приборов эта погрешность не является критической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого анализа потребностей в измерительных приборах для калибровки и поверки производственных средств измерения была проведена разработка калибратора СК-01. Результаты испытаний опытных образцов подтверждают правильность принятых технических решений и возможность создания портативного прибора с классом точности 0,005, мало чувствительного к изменениям температуры окружающей среды. В настоящее время планируется проведение его метрологической сертификации и постановка на производство. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайченко С.Н. Реальное «импортзамещение» в приборостроении или завуалированный импорт? [Электронный ресурс] // Режим доступа : <http://www.kipia.info/publication/realnoe-importozameschenie-v-priborostroenii-ili-zavualirovannyiy-import/>.
2. Программа импортзамещения измерительной техники на 2018–2020 годы и на период до 2025 года [Электронный ресурс] // Режим доступа : <https://import-net.vniims.ru/upload/import.pdf>.
3. Программируемый логический контроллер FASTWEL I/O [Электронный ресурс] // Режим доступа : <https://www.fastwel.ru/products/fastwel-io/>.
4. Программируемые логические контроллеры REGUL RX00 [Электронный ресурс] // Режим доступа : <https://www.prosoft.ru/cms/f/473480.pdf>.
5. Источники-измерители SourceMeter® [Электронный ресурс] // Режим доступа : <https://ferria.su/smu-sourcemeter/>.
6. МИ 2539-99. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерительные каналы контроллеров, измерительно-вычислительных, управляющих, программно-технических комплексов. Методика поверки. – М. : ВНИИМС, 1999.

**Автор – сотрудник НИИ супер ЭВМ
Телефон: (495) 330-0133
E-mail: office@super-computer.ru**