

# Разработка и исследование модулей с целью совершенствования ГЭТ4-91

А. И. Быков<sup>1</sup>, А. С. Катков<sup>2</sup>, Ю. А. Громова, Д. В. Шавалдин

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им Д.И. Менделеева

<sup>1</sup>a.i.bykov@vniim.ru, <sup>2</sup>a.s.katkov@vniim.ru

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа аппаратуры Государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока ГЭТ4-91 с целью модернизации эталонной установки, посредством создания отдельных узлов (модулей) аппаратуры, на основе ранее разработанной аппаратуры. Проведен анализ компонентной базы и методов её оценки. Представлены результаты предварительных исследований.

**Ключевые слова:** ГЭТ4-91; измерение временных интервалов; генератор линейно изменяющегося напряжения; дифференциальная нелинейность; интегральная нелинейность; малошумящий источник питания

## I. ВВЕДЕНИЕ

Государственные первичные эталоны – это комплексы аппаратуры, предназначенные для хранения, воспроизведения и передачи единицы физических величин.

На первичные эталоны возложена задача воспроизведения, хранения и передачу единицы средствам измерений (СИ). Повышение точности измерений СИ требует проведения исследований эталона с целью совершенствования, включая его метрологические характеристики, а также функциональные возможности.

Ввиду высоких требований, предъявляемых к созданию и совершенствованию эталонной аппаратуры, необходимо разрабатывать методы анализа характеристик аппаратуры и прецизионных компонентов.

Следует отметить, что современная цифровая аппаратура в данный момент практически вытеснила аналоговую, за исключением узкоспециализированных задач, научной и исследовательской деятельности. Цифровые приборы позволяют повысить удобство проведения исследований и измерений, а также расширить аналитические и статистические возможности измерительных процессов. Поэтому совершенствование эталонной аппаратуры подразумевает переход на современные цифровые методы реализации требуемых задач.

В данной статье были проведены предварительные исследования способов создания отдельных узлов эталонной установки с применением современной микроэлектронной компонентной базы. Изучены правила и особенности построения печатных плат.

Разработаны схемы для изучения и проверки теоретических идей и навыков.

В данной статье представлены результаты одного из этапов совершенствования эталонной установки Государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока в диапазоне малых токов ( $1 \cdot 10^{-16} \text{ A} \div 1 \cdot 10^{-9} \text{ A}$ ).

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При изучении принципиального устройства эталонной установки были выделены и изучены основные узлы, отвечающие за реализацию метода воспроизведения сверхмалых токов. Для простоты понимания влияющих факторов на воспроизведение сверхмалых токов рассмотрим следующую формулу:

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta t} \cdot C$$

В результате анализа технических характеристик эталона были выделены требования к созданию и исследованию следующих модулей:

- модуль меры линейно изменяющегося напряжения, с возможностью регулировки крутизны нарастания и спада в реальном времени с выходным уровнем напряжения  $\pm 10 \text{ В}$ ;
- модуль измерения временных интервалов в диапазоне 1–1000 сек;
- модуль измерения напряжения в диапазоне напряжения  $\pm 12 \text{ В}$ .

Помимо основных технических требований к данному этапу поставлена параллельно идущая задача по разработке специализированного гальванически изолированного источника питания, основанного на электрохимических элементах.

По результатам проведённого анализа технических требований выше указанных модулей были установлены следующие требования:

- время автономной работы должно быть не менее 10 ч;
- выходное напряжение не стабилизированное от 30 до 42 В;
- выходная мощность до 20 Вт;
- отсутствие высокочастотных составляющих на выходе источника питания;

- должна быть предусмотрена система контроля состояния батарей, все требуемые защиты, система определения подключенного сетевого питания, индикация состояния батарей;
- массогабаритные параметры и эргономика должны обеспечивать простоту транспортировки и обслуживания устройства.

### III. МЕРА ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Виду внедрения цифровых методов принято решение о реализации данного модуля, основываясь на цифро-аналоговом преобразователе (далее ЦАП), основными параметрами которого является разрешающая способность, DNL (дифференциальная нелинейность) и INL (интегральная нелинейность), а также монотонность как результирующая функция DNL и INL.

Для проведения исследований в качестве первого примера был выбран цифро-аналоговый преобразователь AD5689 фирмы Analog Devices. Данная микросхема представляет собой двухканальный 16-ти битный ЦАП, с возможность подключения внешнего опорного источника напряжения.

Для изучения выходных характеристик, выходной сигнал линейно изменяющегося напряжения с AD5689 был предварительно усилен и подан на мультиметр Agilent 3485A в режиме измерения постоянного напряжения [1, 2].

Результаты предварительной оценки нелинейности ЦАП в совокупности с операционным усилителем и компонентами приведены на рис. 1.

### IV. ИЗМЕРИТЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Для реализации модуля измерения временных интервалов было принято решение взять за основу микроконтроллер AVR ATtiny841, данный 8 битный микроконтроллер имеет встроенный таймер [3], проще говоря часы способные отсчитывает равные интервалы времени, точность счета которых напрямую зависит от точности источника опорного тактирующего сигнала.

Так как кварцевые резонаторы частоты [4], применяемые для тактирования микроконтроллера при решении базовых задач, не обладают необходимой точностью и стабильностью, для решения этой задачи микроконтроллер был переконфигурирован для работы от внешнего термокомпенсированного генератора с частотой 16 МГц.

Для определения точности измерения времени, была реализована схема, представленная на рис. 2.

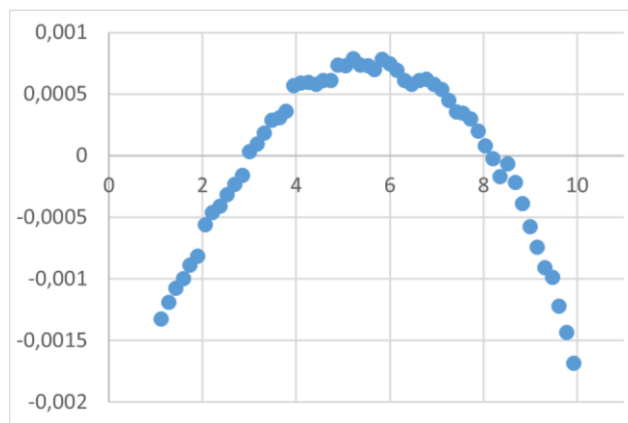


Рис. 1. Результат измерений нелинейности AD5689

В качестве эталонного оборудования был взят частотомер АКИП-5102, синхронизируемый с рубидиевым стандартом частоты, частотомер настроен на работу в режиме счета временных интервалов. Микроконтроллер выдает импульс для запуска частотомера, при этом сам переходит в режим счета времени, по завершении отсчета времени микроконтроллер выдает импульс для остановки, частотомера, после отправляет данные об измеренном интервале времени на компьютер.



Рис. 2. Структурная схема соединения аппаратуры для исследования точности измерения времени

Результаты измерения временных интервалов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

№	Измеренное значение времен, сек	Действительное значение времени, сек	$\Delta$ , сек	$\delta$ , %
1	100,000000	100,000008	-0,000008	8E-06
2	100,000004	100,000008	-0,000004	4E-06
3	100,000004	100,000005	-0,000001	1E-06
4	100,000004	100,000008	-0,000004	4E-06
5	100,000000	100,000008	-0,000008	8E-06
6	100,000004	100,000008	-0,000004	4E-06
7	100,000004	100,000008	-0,000004	4E-06
8	100,000000	100,000008	-0,000008	8E-06
9	100,000004	100,000008	-0,000004	4E-06
10	100,000004	100,000010	-0,000006	6E-06

## V. ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

Измеритель напряжения – вольтметр. Для измерения постоянного электрического напряжения было принято решение взять для этой задачи 32 битный сигма-дельта аналоговый цифровой преобразователь (далее АЦП) ADS1263 фирмы Texas Instruments.

АЦП сконфигурирован в дифференциальном режиме работы, при условии использования внутреннего источника опорного напряжения, диапазон измеряемых напряжений не превышает  $\pm 2,5$  В.

Для предварительной проверки и оценки возможностей микросхемы, была реализована структурная схема, приведённая на рис. 3.

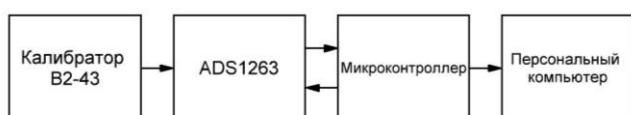


Рис. 3. Структурная схема соединения аппаратуры для исследования точности измерения напряжения

Результаты предварительной оценки точности измерения напряжения представлены на рис. 4.

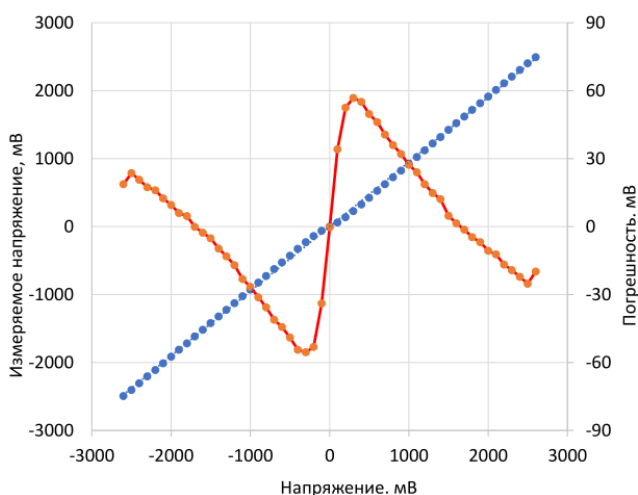


Рис. 4. Результат измерений напряжения в диапазоне  $\pm 2,5$ В при помощи ADS1263

## VI. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

Эталонная аппаратура крайне чувствительна к качеству питающей сети, при условии не высокой мощности потребления лучше всего прибегнуть к автономным источникам питания. В зависимости от типа устройства можно использовать, как простые аккумуляторные сборки с нестабилизированным выходом, так и более сложные устройства, в составе которых уже присутствует стабилизатор тока и напряжения, система контроля заряда, индикации и прочее.

Для реализации поставленной задачи были применены наработки из ранее реализованного устройства [5], для эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01.

В процессе работы на ГЭТ 13-01 с данным источником питания, были получены результаты о работе устройства, удобстве применения и особенностях эксплуатации, получено понимание о новых потребностях, а также переосмыслен общий концепт устройства.

Проделанная работа позволила сформировать техническое задание к новому источнику питания, а именно необходимо реализовать следующие требования:

- модернизировать систему контроля оставшегося заряда источника питания основываясь на потребляемой мощности и емкости аккумуляторной батареи;
- добавить систему защиты от превышения потребления по току;
- добавить внешний интерфейс коммуникации;
- увеличить скорость заряда аккумуляторной батареи;
- увеличенная емкость аккумуляторной батареи;
- выходное напряжение нестабилизированное в диапазоне 32–42 В.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была изучена принципиальная и структурная схема эталонной установки ГЭТ 4-91 в области малых токов, определены основные факторы влияющие на точность измерения. Выделены и изучены отдельные узлы, реализующие функцию воспроизведения сверх малых токов.

Проведены предварительные исследования основных возможностей современной микросхемной компонентной базы, изучены методы её исследования.

Разработаны технические требования к источнику питания разрабатываемых модулей эталонной установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Микушин А.В., Сединин В.И. Цифровая схемотехника / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Новосибирск: СибГУТИ, 2016. 328 с.
- [2] Резисторы: Справочник / Под редакцией И.И. Четверткова, В.М. Терехова. 2 изд. Москва: Радио и связь, 1991.
- [3] Каримова Н.О. Лабораторный стенд для отладки периферийных схем и микроконтроллеров серии PIC / Н.О. Каримова. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2018. № 13 (199). С. 53-55.
- [4] Компоненты и технологии // Технология повышения временной стабильности кварцевых резонаторов высокочастотного диапазона. №6. 2010. 166 с.
- [5] Быков А.И., Шавалдин Д.В., Петровская А.Н., Ловцюс В.Э. Разработка и исследование двухполярного источника питания // 77-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов [Электронный ресурс] / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2022. С. 221-224.