

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КАЛИБРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Г.И. Волович, И.Е. Чухломин

PRINCIPLES OF THE CALIBRATOR FOR ALTERNATING AC VOLTAGE HIGH ACCURACY OF FEEDBACK

G.I. Volovich, I.E. Chukhlomin

Сделан обзор промышленных калибраторов переменного напряжения, рассмотрен их принцип действия. Предложены два новых варианта построения калибратора переменного напряжения повышенной точности с обратной связью.

Ключевые слова: измерительное оборудование, поверочное оборудование.

This article provides an overview of industrial AC voltage calibrators, the principle of action is considered. It is also proposed two new variants of the alternating AC voltage calibrator with high accuracy of feedback.

Keywords: measuring instruments, calibration instruments.

Введение

Учитывая возрастающие потребности предприятий в приборах для проверки метрологических характеристик радиоэлектронной аппаратуры, средств связи и измерительных приборов, актуальным является создание недорогих калибраторов переменного напряжения, обеспечивающих поверку вольтметров класса точности 0,1 и ниже.

На сегодняшний момент на российском рынке используют как отечественные калибраторы переменного напряжения и тока («ПАРМА», г. Санкт-Петербург, трехфазный калибратор переменного напряжения и тока «Ресурс-К2», г. Пенза, а также «Энергомонитор 3.1К», г. Санкт-Петербург), так и зарубежного производства (Fluke 6100A, Fluke 6101A, Transmille 2000 и 3000 серии). Стоимость таких приборов превышает 300 тыс. рублей, а импортных – 1 млн рублей, в связи с этим на многих предприятиях испытывается дефицит в высокоточном поверочном оборудовании.

В большинстве калибраторов переменного напряжения и тока импортного и отечественного производства используют для повышения точности прецизионные компоненты, такие как:

- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с высокой разрядностью порядка $N = 18-20$ разрядов, минимальной интегральной и дифференциальной нелинейностью, малым уровнем шумов;
- прецизионный источник опорного напряжения (ИОН);
- усилитель мощности с малым коэффициентом нелинейных искажений, малым уровнем шумов;
- трансформатор с максимальным КПД, большой магнитной проницаемостью и минимальными удельными потерями в магнитопроводе.

При этом обратная связь по напряжению для повышения точности не используется.

В данной работе рассматривается возможность создания калибратора переменного напряжения с использованием системы управления калибратором с обратной связью по напряжению для повышения его точности.

При построении такой системы возможны как минимум два способа формирования сигнала ошибки:

- как разности действующих значений заданного напряжения и напряжения обратной связи (регулирование по действующему значению напряжения);

Волович Георгий Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры систем управления; Южно-Уральский государственный университет; g_volovich@mail.ru

Чухломин Иван Евгеньевич – аспирант кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет; rus-fan@mail.ru

Volovich George Iosihfovich – Doctor of Science (Engineering), Professor of Control Systems Department, South Ural State University; g_volovich@mail.ru

Chukhlomin Ivan Evgenievich – post-graduate student of Control Systems Department, South Ural State University; rus-fan@mail.ru

- как разности мгновенных значений этих напряжений (цифровая комбинированная система регулирования).

Первый из этих способов реализуется относительно просто, но не гарантирует высокой точности формирования выходного переменного напряжения калибратора (низкого значения коэффициента гармоник).

Второй способ должен обеспечить лучшую форму выходной синусоиды, но предъявляет значительно более высокие требования к динамике системы управления.

Регулирование по действующему значению напряжения

Данный метод позволяет создать высокоточный калибратор переменного напряжения, с малой погрешностью действующего значения напряжения. Структурная схема калибратора с регулированием по действующему значению напряжения показана на рис. 1.

Система прямого цифрового синтеза (СПЦС, или DDS – Direct Digital Synthesis) – это метод, позволяющий получить аналоговый сигнал (синусоидальный сигнал) за счет генерации временной последовательности цифровых отсчетов и их дальнейшего преобразования в аналоговую форму посредством ЦАП [1].

В систему прямого цифрового синтеза входит ЦАП, с точностью 1 ppm (10^{-6}), или 0,0001 %, что позволяет генерировать высокоточный синусоидальный сигнал.

Цифровой аттенуатор представляет собой умножающий ЦАП, у которого выходное напряжение пропорционально входному коду и опорному напряжению.

Аналоговый фильтр нижних частот (ФНЧ Anti-imaging) сглаживает выходной сигнал ЦАП, по-

давая высшие гармоники. Усилитель мощности (УМ) представляет собой мощный операционный усилитель с малым коэффициентом нелинейных искажений и отрицательной обратной связью. Трансформатор напряжения масштабирует амплитуду выходного сигнала усилителя мощности до нужного значения, необходимого для поверки средств измерений. ООС (отрицательная обратная связь) уменьшает нелинейные характеристики трансформатора. Делитель напряжения представляет собой набор прецизионных сопротивлений, которые выполняют функцию согласования высоковольтной части калибратора с АЦП. Фильтр низких частот, находящийся перед АЦП (ФНЧ Anti-aliasing), необходим для предотвращения наложения частот в первой полосе зоны Найквиста [1].

Задача вычисления действующего значения напряжения сводится к определению среднеквадратического значения входного сигнала $u(t)$, а затем вычисления модуля [2].

Вычисленное действующее значение напряжения подается на сумматор, где из задающего $U_Z(t)$ и действующего значения напряжения $U(t)$ вычисляется ошибка рассогласования $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t) = U_Z(t) - U(t). \quad (1)$$

Установившаяся ошибка рассогласования определяется следующим выражением:

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot U_Z(s)}{1 + W(s)} \Rightarrow 0, \quad (2)$$

где $W(s)$ – передаточная функция разомкнутого контура системы.

Для уменьшения статической ошибки используется ПИ-регулятор.

Усиленный сигнал ошибки поступает на вход цифрового аттенуатора, где производится математическая операция перемножения с сигналом

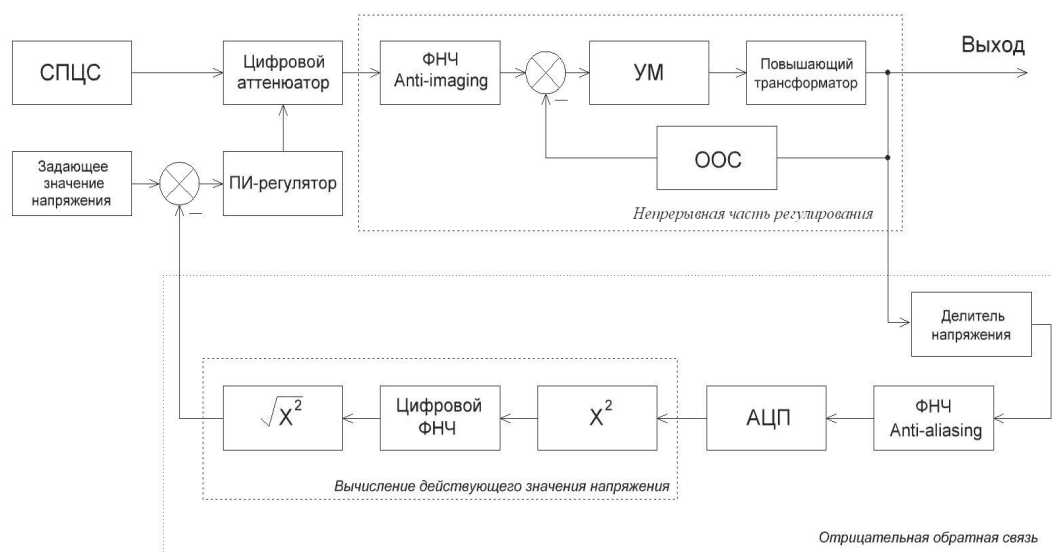


Рис. 1. Структурная схема калибратора с регулированием по действующему значению напряжения

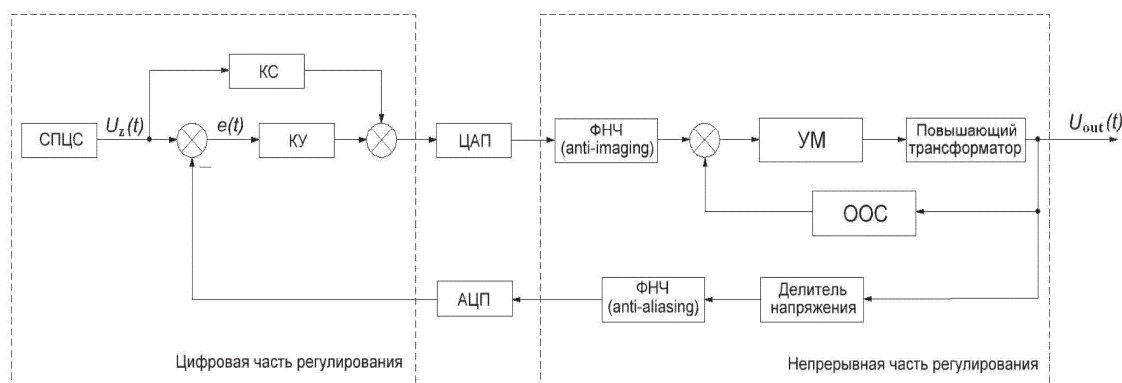


Рис. 2. Структурная схема калибратора с цифровой комбинированной системой регулирования

СПЦС. Далее выходной сигнал подвергается сглаживанию фильтром нижних частот ФНЧ, а затем усилению с помощью УМ.

Цифровая комбинированная система регулирования

Данный метод позволяет создать калибратор переменного напряжения с высокой точностью формирования выходного переменного напряжения, а также обеспечивает лучшую форму выходной синусоиды. Структурная схема калибратора с цифровой комбинированной системой регулирования показана на рис. 2.

Задающее значение напряжения $U_z(t)$ представляет собой последовательность чисел генерируемых СПЦС. Корректирующее устройство (КУ) необходимо для того, чтобы обеспечить необходимые показатели качества замкнутой системы регулирования. Компенсирующая связь по задающему значению напряжения (КС) позволяет значительно улучшить показатели качества замкнутой системы регулирования, в данном случае минимизировать ошибку регулирования – $e(t)$.

Z-изображение ошибки в замкнутой системе регулирования $e(z)$ равно:

$$e(z) = \frac{[1 - W(z)W_{KC}(z)] \cdot U_z(z)}{1 + W(z) \cdot W_{KU}(z)}, \quad (3)$$

где $W(z)$ – передаточная функция непрерывной части регулирования; $U_z(z)$ – задающее значение напряжения; $W_{KC}(z)$ – передаточная функция компенсирующей связи; $W_{KU}(z)$ – передаточная функция корректирующего устройства.

Из выражения (1) следует условие абсолютной инвариантности при $e(z) = 0$:

$$W_{KC}(z) = \frac{1}{W(z)}. \quad (4)$$

Использование комбинированного управления позволяет снизить требования к основному

каналу и получить лучшие качественные показатели системы управления, достигаемые за счет частичной инвариантности [3].

Стоит также отметить, что с помощью цифровой обратной связи можно осуществлять параметрическую идентификацию динамических характеристик непрерывной части регулирования, т. е. подбирать оптимальные коэффициенты в компенсирующей связи по задающему значению напряжения.

При использовании прецизионных компонентов в цифровой комбинированной системе регулирования, а также высокоточного ИОН, работающего на эффекте Джозефсона, можно добиться, что данная разработка будет использоваться как первичный государственный эталон.

Заключение

В данной работе рассматривались два возможных варианта построения калибратора переменного напряжения повышенной точности с обратной связью. В зависимости от требований, предъявляемых к поверочному оборудованию, можно остановиться на одном из двух вариантов.

Литература

1. Мерфи, Е. Прямой цифровой синтез (DDS) в тестовом, измерительном и коммуникационном оборудовании / Е. Мерфи, К. Слэттери // Компоненты и технологии. – 2006. – № 4. – С. 45–51.
2. Волович, Г.И. Аналого-цифровое измерение переменного напряжения и теорема Котельникова / Г.И. Волович // Компоненты и технологии. – 2010. – № 6. – С. 28–33.
3. Федоров, С.М. Комбинированное управление в следящих системах с цифровыми вычислительными машинами / С.М. Федоров // Теория инвариантности в системах автоматического управления. – М.: Наука, 1964. – С. 348–355.

Поступила в редакцию 22 июня 2012 г.