

В. М. БЕЛОВ, В. А. БУРОВЦЕВ,
И. Ф. КЛИСТОРИН, А. Е. ПОДЗИН, Г. М. СОБСТЕЛЬ

(Новосибирск)

ЦИФРОВОЙ ВОЛЬТМЕТР ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА

Универсальный цифровой вольтметр (УЦВ), реализованный с использованием принципа «формирования опорного напряжения», выполнен на дискретных элементах и имеет весьма высокие метрологические характеристики [1]. Однако длительная эксплуатация прибора в лабораторных условиях выявила существенный недостаток, который заключается в его низкой надежности.

В большой степени это объясняется тем, что для уравнивания измерительной цепи на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) необходимо получать большие напряжения (до 100 В) различной полярности. Поэтому в качестве коммутирующих элементов в ЦАП были использованы магнитоуправляемые контакты (по два контакта на один разряд).

Последующие исследования были направлены на усовершенствование функциональной схемы прибора так, чтобы получить возможность применения в ЦАП электронных коммутирующих элементов. Кроме того, при разработке вольтметра предусматривалось широкое использование элементов микроэлектроники, что в конечном итоге также способствовало повышению его надежности.

В измерительной технике широкое распространение получили так называемые цифро-аналоговые преобразователи с суммированием токов на матрице резисторов $R-2R$. ЦАП с суммированием токов содержит N (N — число разрядов) линейных схем — источников тока и характеризуется практически полным отсутствием погрешности преобразования от диодных переключателей тока, более высоким быстродействием, а также простотой согласования с управляющими схемами на микроэлектронных элементах.

Однако в нашем случае использование ЦАП с суммированием токов имеет ряд особенностей, связанных главным образом с тем, что на выходе ЦАП получается напряжение одной полярности, а его максимальная величина не превышает одного-пяти вольт.

Проведенные исследования показали, что при уравнивании измерительной цепи на вход устройства формирования опорного напряжения (ФОН) можно подавать однополярные импульсы прямоугольной формы. При этом следует лишь позаботиться, чтобы длительность импульсов была много меньше постоянных времени переходных цепей уси-

лителя, а их скважность — достаточно большой. В этом случае к началу каждого следующего такта уравнивания (следующего импульса) усилитель переменного напряжения устройства ФОН будет приходить в исходное состояние. Если в устройстве сравнения (УС) предусмотреть автоматическую калибровку нуля в промежутки времени между тактовыми импульсами, то погрешность измерения за счет изменения постоянной составляющей на выходе усилителя устройства ФОН будет практически исключена.

Наличие на выходе ЦАП однополярного напряжения затрудняет также автоматическое измерение разнополярных напряжений постоянного тока. Обычно для получения компенсационного напряжения различной полярности необходимы либо два независимых источника образцового напряжения, выходное напряжение которых через коммутатор подается на вход цифро-аналогового преобразователя, либо дополнительный источник смещения, включаемый на выходе цифро-аналогового преобразователя [2].

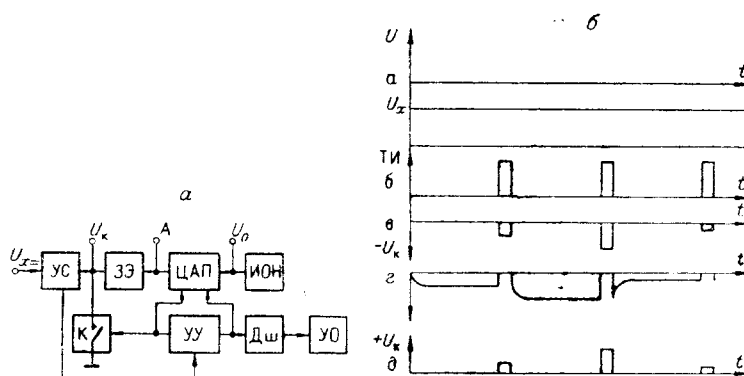


Рис. 1.

Следует отметить, что применяя даже высокостабильные источники напряжения, трудно обеспечить одинаковые показания при измерении равных напряжений различной полярности. Кроме того, схемы таких вольтметров сложны.

На рис. 1, а приведена блок-схема УЦВ в режиме измерения напряжения постоянного тока, в котором указанные недостатки устраняются тем, что разнополярное компенсационное напряжение получается от однополярного ЦАП. Принцип работы УЦВ рассмотрим отдельно при измерении положительных и отрицательных напряжений. Эпюры напряжений в различных точках схемы приведены на рис. 1, б.

Примем, что источник образцового напряжения (ИОН) выдает напряжение U_0 отрицательной полярности (эпюра а), а устройство сравнения позволяет сравнивать напряжения одинаковой полярности. Работа прибора синхронизируется тактовыми импульсами (ТИ) (эпюра б), вырабатываемыми в устройстве управления (УУ). Результат измерения через дешифратор (ДШ) выводится на устройство отсчета (УО). Работа ключа К синхронизирована ТИ так, что он периодически размыкается только на время, в течение которого осуществляется сравнение измеряемого и компенсационного напряжений.

При измерении напряжений отрицательной полярности на выходе цифро-аналогового преобразователя получаются импульсы напряжения (точка А на рис. 1, а), показанные на эпюре в. Амплитуда этих импульсов определяется числом N , заданным на управляющем входе

ЦАП, а длительность их равна длительности ТИ. В интервалы времени между ТИ ключ К замкнут, а на выходе ЦАП сигнал отсутствует.

Поэтому в течение времени между ТИ напряжение на аналоговом запоминающем элементе (ЗЭ) также равно нулю, а во время тактового импульса компенсационное напряжение отрицательной полярности полностью передается на вход устройства сравнения (при условии, что постоянная времени разряда запоминающего конденсатора много больше длительности импульса компенсационного напряжения).

При измерении напряжений положительной полярности на выходе ЦАП получаются отрицательные импульсы, представленные на эюре 2. В течение времени между ТИ конденсатор заряжается через выходное сопротивление цифро-аналогового преобразователя и замкнутый ключ до напряжения, соответствующего числу N , поданному на управляющий вход ЦАП. В течение длительности ТИ напряжение на выходе цифро-аналогового преобразователя устанавливается равным нулю. Легко заметить, что если конденсатор сохраняет заряд в течение длительности ТИ, то на входе УС получают импульсы компенсационного напряжения положительной полярности (эюра δ рис. 1, б).

Рассмотренная схема УЦВ позволяет весьма просто осуществить автоматический выбор полярности измеряемого напряжения и повысить точность измерения разнополярных напряжений.

В [3] подробно рассмотрен вопрос о построении высокостабильных источников тока, специально предназначенных для работы в прецизионных скоростных цифро-аналоговых преобразователях. Подробная схема источника тока применена в старшей декаде ЦАП.

Принципиальная схема источников тока первой (старшей) декады приведена на рис. 2, а и состоит из усилителя постоянного тока, регулирующих транзисторов T_3 , T_4 и схемы управления на транзисторе T_5 . Усилитель постоянного тока выполнен на микросхеме типа П2222Г и дифференциальном усилителе на транзисторах T_1 , T_2 типа ГТ309. Ток задающими элементами являются резисторы R_7 типа С5-5 и R_6 , причем R_6 служит для подстройки точного значения весового коэффициента.

Выходом стабилизатора тока является диод D_1 , подключенный к эмиттеру транзистора T_4 . Управление диодными ключами D_1 , D_2 осуществляется устройством управления через транзистор T_5 (ГТ310). В базе этого транзистора предусмотрена логическая схема И на резисторах R_9 , R_{11} , на один вход которой (R_9) поступает сигнал с соответствующего триггера распределителя, а другой вход (R_{11}), соединенный с аналогичными входами всех стабилизаторов тока, служит для синхронизации выходного напряжения ЦАП с тактовыми импульсами. Опорное напряжение U_0 получается на кремниевом стабилитроне типа Д818Е и является общим для всех стабилизаторов тока. Ток стабилизации источников тока первой декады составляет 6 мА, а сопротивления резисторов матрицы $R - 2R$ соответственно выбраны равными 100 и 200 Ом.

Схема характеризуется выходным сопротивлением не менее 100 МОм, временной нестабильностью тока не хуже 0,002%, температурной нестабильностью не более 0,004%/°С. По такой же схеме выполнен дополнительный источник тока, который используется для получения вспомогательного напряжения, необходимого при уравнивании компенсационной цепи в режиме измерения переменных напряжений.

Стабилизаторы тока второй декады работают при токе 4,8 мА; их схема (см. рис. 2, б) отличается лишь отсутствием дополнительного каскада усиления на транзисторах. При этом стабильность тока составляет 0,05%. В двух младших декадах используются стабилизаторы тока (см. рис. 2, в) без усилителя в цепи обратной связи. Нестабильность то-

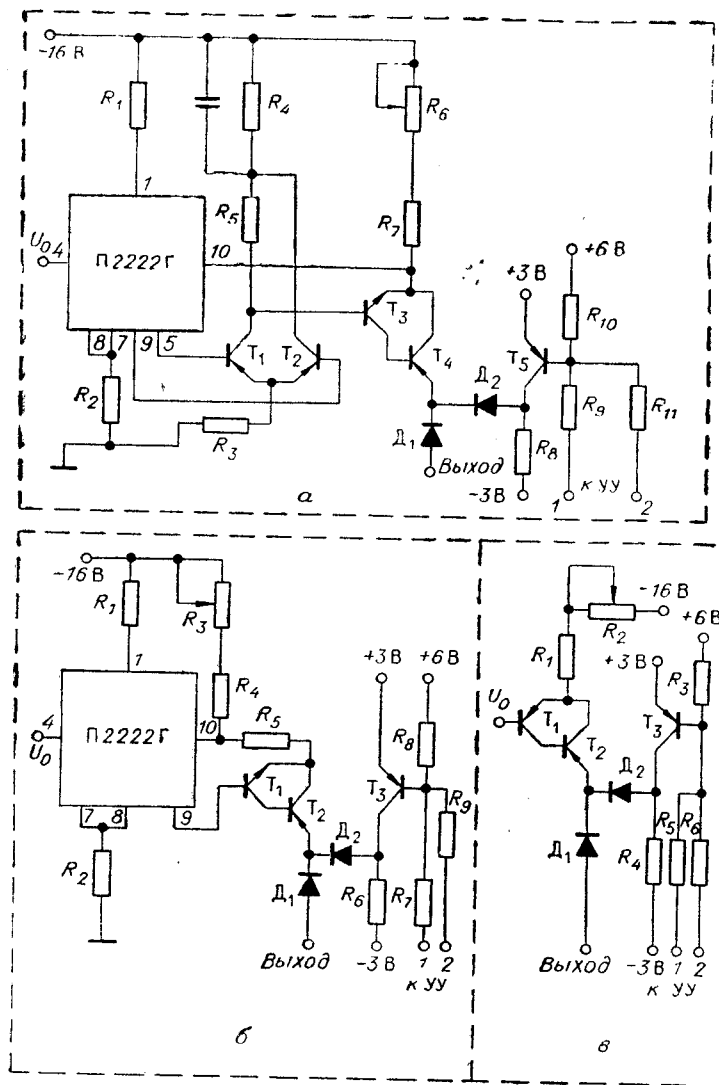


Рис. 2.

ка такой схемы не превышает 0,3%. Токи стабилизации, задаваемые резисторами R_1 , R_2 , соответственно в 3-й и 4-й декадах равна 4 и 3,2 мА.

Устройство сравнения, принципиальная схема которого приведена на рис. 3, а, состоит из усилителя постоянного тока (УПТ) с калибровкой (микросхема M_3 типа П2222Г и транзисторы T_8 — T_{12}) и предварительных дифференциальных усилителей ($ДУ_1$, M_1 и $ДУ_2$, M_2). Сравнение вспомогательных напряжений при уравнивании компенсационной цепи в режиме измерения переменных напряжений осуществляется на сумматоре (резисторы R_8 , R_9). Разностное напряжение через предварительный усилитель ($ДУ_2$, M_2 типа П2222Г) и открытый ключ на транзисторе T_6 подается на вход усилителя с калибровкой.

В течение времени калибровки (ключ T_{11} открыт на время между ТИ) на обоих входах сумматора вспомогательное напряжение равно нулю. При разомкнутом ключе T_{11} общее усиление УПТ совместно с пред-

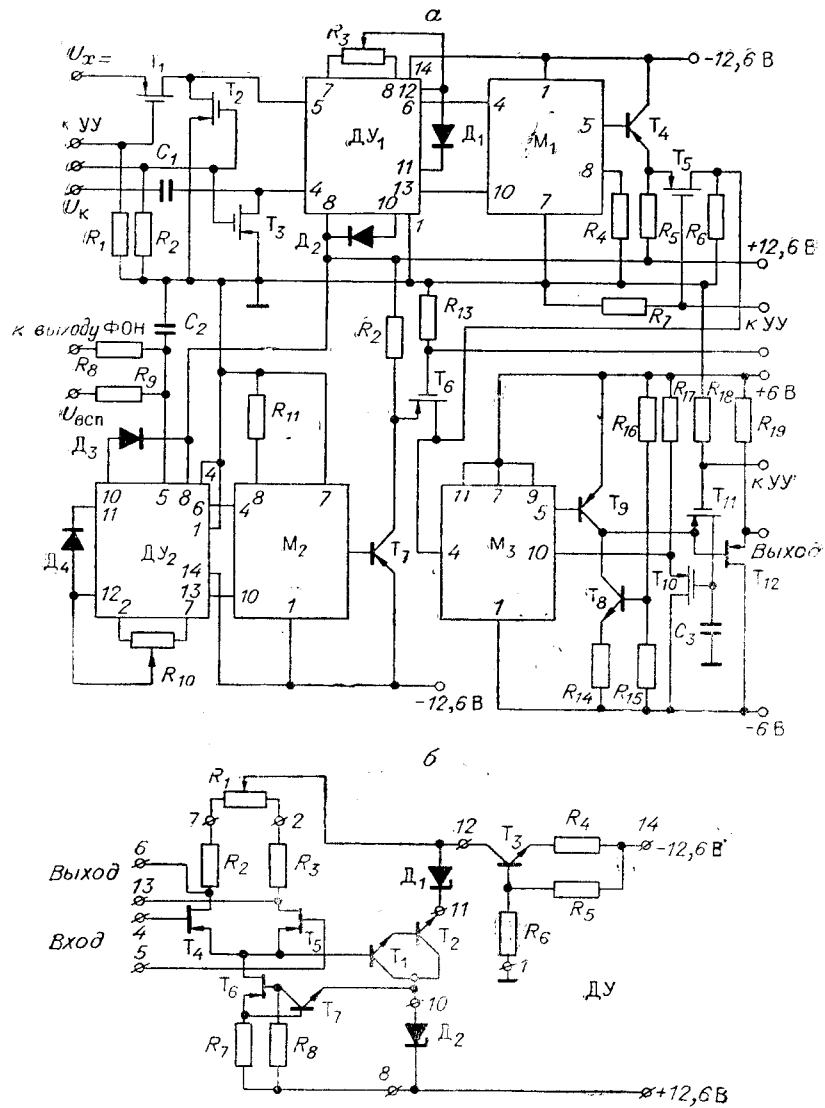


Рис. 3.

варительным усилением составляет величину $(3 \div 6) \cdot 10^4$, что вполне достаточно для обеспечения заданной чувствительности (единице дискретности 100 мкВ соответствует выходное напряжение 1,5—3 В). Выходной сигнал снимается с истокового повторителя на транзисторе T_{12} .

В режиме измерения напряжений постоянного тока ко входу УПТ с калибровкой ключом T_5 подключается предварительный усилитель ДУ₁, М₁. Сравнение измеряемого и компенсационного напряжений осуществляется на дифференциальном усилителе ДУ₁. Измеряемое напряжение подается на один вход ДУ₁ через модулятор на транзисторах T_1 , T_2 , а на другой вход дифференциального усилителя через конденсатор C_1 (запоминающий элемент) и транзистор T_3 (ключ) поступает выходное напряжение ЦАП.

Для получения малой погрешности сравнения к выходному дифференциальному усилителю предъявляются требования высокого выходно-

го сопротивления и большого подавления синфазных сигналов. Степень подавления синфазных сигналов характеризуется коэффициентом режекции (отношение приведенного к входу сигнала на выходе к величине входного синфазного сигнала), который для обеспечения погрешности сравнения в 0,01% должен составлять 80—90 дБ. Указанным значением коэффициента режекции удовлетворяет микросхема П2222, однако она имеет недостаточное входное сопротивление.

Отмеченным требованиям полностью удовлетворяет дифференциальный усилитель на полевых транзисторах (рис. 3, б) [4].

Подавление синфазных сигналов здесь осуществляется за счет стабилизации напряжения питания стоковых цепей входных транзисторов. Напряжение стабилизации, как видно из схемы, определяется падением напряжения на переходах база — эмиттер транзисторов T_1 , T_2 и напряжением на стабилитроне D_1 . Благодаря этому режим входных транзисторов остается неизменным при изменении синфазного сигнала и коэффициент режекции получается весьма высоким без подбора транзисторов. Применение рассмотренного ДУ в УС позволило получить погрешность сравнения измеряемого и компенсационного напряжений не хуже 0,01% при входном сопротивлении 10^8 — 10^9 Ом.

Применение рассмотренных узлов и устройства ФОН позволило реализовать УЦВ на микросхемах со следующими характеристиками.

I. По переменному току: 1) диапазон измеряемых напряжений 100 мкВ — 300 В (эффективное значение) на шести пределах (0,1—10 мВ, 1—100 мВ, 10 мВ — 1 В, 0,1—10 В, 1—100 В, 3—300 В); разрешающая способность соответственно 1 мкВ, 10 мкВ, 100 мкВ, 1 мВ, 10 мВ, 30 мВ; 2) погрешность: в полосе частот 1,0—100 кГц $\pm (0,05\% U_x + 0,02\% U_{пр})$ на всех пределах, кроме нижнего; в полосе частот 45 Гц — 200 кГц $\pm (0,1\% U_x + 0,02\% U_{пр})$; в полосе частот 25—45 Гц $\pm (0,3\% U_x + 0,02\% U_{пр})$; в полосе частот 10 Гц — 1 МГц 1,5%; 3) пикфактор измеряемых напряжений до 4; 4) амплитуда измеряемого напряжения не более 500 В; 5) $R_{вх} \geq 1$ МОм; 6) время измерения 1 с.

II. По постоянному току: 1) диапазон измеряемых напряжений 100 мкВ — 1000 В на четырех пределах (100 мкВ — 1 В, 1 мВ — 10 В, 10 мВ — 100 В, 100 мВ — 100 В); 2) погрешность $\pm (0,05\% U_x \pm 0,01\% U_{пр})$; 3) время измерения 0,02 с; 4) на пределе 1 В $R_{вх} = 100$ МОм, на других пределах — 100 кОм/В; 5) выбор полярности автоматический.

Габариты прибора 360×80×360 мм, что меньше аналогичных приборов отечественного и зарубежного производства.

Все логические узлы вольтметра выполнены на интегральных гибридных микросхемах системы диодно-транзисторной логики. В качестве коммутирующих элементов широко используются полевые транзисторы и диодные токовые ключи.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Белов, И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин. Принцип построения универсального автоматического цифрового вольтметра.— Автотметрия, 1969, № 2.
2. А. И. Кондалев. Преобразователи формы информации. Киев, «Наукова думка», 1965.
3. В. Н. Вьюхин. Высокостабильный источник тока на микросхемах.— Автотметрия, 1969, № 5.
4. В. М. Белов, А. Е. Подзин, В. С. Данилов. Дифференциальные усилители постоянного тока на полевых транзисторах с большим коэффициентом подавления синфазного сигнала.— В сб. «Радиокомпоненты малой мощности», лекции 3—4. Новосибирск, «Наука», 1970.

Поступила в редакцию
5 января 1971 г.