

УДК 629.7.05; УДК 519.876.5
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

М. А. Ватутин¹, И. Н. Кошель², В. В. Бурмистров³, Н. А. Петров⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В большинстве современных цифровых вольтметров используется интегрирующий аналого-цифровой преобразователь время-импульсного типа. Процесс преобразования можно условно разделить на два этапа – интегрирования и счета. Во время счета в соответствии с принципом действия преобразователя происходит сравнение проинтегрированной входной величины с опорной величиной, хранимой в преобразователе. Целью является разработка методики построения двухполярного источника опорного напряжения без снижения точностных параметров. *Материалы и методы.* Представлен подход к построению двухполярного источника опорного напряжения интегрирующего аналого-цифрового преобразователя, в котором интегрирование происходит в течение всего времени преобразования входного сигнала. Новизна подхода заключается в разработке схемотехнических решений для использования одиночного прецизионного стабилитрона для формирования двухполярного опорного напряжения. *Результаты.* Представлены: принципиальная электрическая схема двухполярного источника опорного напряжения и его математическая модель погрешности; рекомендации по выбору применяемых радиоэлементов; методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения. *Выводы.* Использование рассмотренной методики позволяет повысить стабильность пороговых уровней сравнения триггера Шмитта и тем самым осуществить более точное интегрирование входного сигнала. Результаты могут использоваться для построения интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для широкого применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, интегрирующий АЦП, генератор линейно изменяющегося напряжения, преобразователь напряжение-временной интервал, триггер Шмитта

Для цитирования: Ватутин М. А., Кошель И. Н., Бурмистров В. В., Петров Н. А. Обоснование схемотехнических предложений по повышению точностных параметров интегрирующего акселерометра // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 71–80. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

JUSTIFICATION OF CIRCUIT DESIGN SUGGESTIONS FOR IMPROVING ACCURACY PARAMETERS OF THE INTEGRATING ACCELEROMETER

M.A. Vatutin¹, I.N. Koshel², V.V. Burmistrov³, N.A. Petrov⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Most modern digital voltmeters use an integrating time-to-pulse analogue-to-digital converter (ADC). The conversion process can be divided into two stages – integration and counting. During the counting, in accordance with the principle of the converter, the integrated input value is compared with the reference value stored in the converter. The goal is to develop a methodology for building a bipolar reference voltage source without reducing the accuracy parameters. *Materials and methods.* An approach to the construction of a bipolar reference voltage source of an integration analogue-digital converter is presented, in which integration occurs during the entire time of the input signal conversion. The novelty of the approach lies in the development of circuitry solutions for the use of a single precision Zener diode to form a bipolar reference voltage. *Results.* Presented: principal electrical scheme of a bipolar reference voltage source and its mathematical model of error; recommendations for the choice of a radio elements used; method of the schematic construction of a bipolar reference voltage source. *Conclusions.* The use of the considered technique allows to increase the stability of the threshold levels of comparison of the Schmitt trigger and, thus, to more accurately integrate

the input signal. The results can be used to build integrating ADC for wide application in industrial devices and other fields of science and technology.

Keywords: analog-to-digital converter, integrating ADC, linearly varying voltage generator, voltage-time interval converter, Schmitt trigger

For citation: Vatutin M.A., Koshel I.N., Burmistrov V.V., Petrov N.A. Justification of circuit design suggestions for improving accuracy parameters of the integrating accelerometer. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):71–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-9

Введение

Преобразование аналоговых сигналов в цифровой вид нашло широкое применение в технике для сопряжения датчиков различных физических величин, представляющих свой выходной сигнал в аналоговом виде, и цифровых управляющих систем, реализующих цифровые способы передачи, обработки и регистрации информации [1]. Как правило, измеряемая аналоговая физическая величина преобразуется в цифровой код опосредованно, путем предварительного преобразования ее в напряжение и в дальнейшем в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [2]. По этой причине наибольшее распространение получили АЦП «напряжение – код».

Для преобразования относительно медленно меняющихся сигналов широко применяются интегрирующие АЦП, позволяющие повысить разрядность и, соответственно, точность АЦП, а также снизить влияние различных внешних помех еще на этапе преобразования сигнала [3]. Преобразование аналоговой величины в цифровой код можно разделить на два этапа – этап преобразования аналоговой величины в дискретный вид и этап преобразования дискретной величины в цифровой код.

Важным элементом схемотехники АЦП, в значительной мере определяющим точностные параметры преобразования в дискретный вид, является схемотехника источника опорного напряжения (ИОН), относительно значения напряжения которого и осуществляется преобразование [2, 4, 5].

Материалы и методы

В работе [6] рассмотрена методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины в дискретную, используемую для построения интегрирующего аналого-цифрового преобразователя. В этой работе интегрирующую часть преобразователя предлагается построить на базе генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), выполненного на двух операционных усилителях [2, 4].

Операционный усилитель (ОУ) широко применяется и в импульсных электронных устройствах. При этом в полной мере используются такие положительные свойства ОУ, как малые дрейфы высокий и собственный коэффициент усиления, которые позволяют получить высокую стабильность работы импульсного устройства.

На рис. 1 показана принципиальная схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) на двух ОУ с входом управления [6].

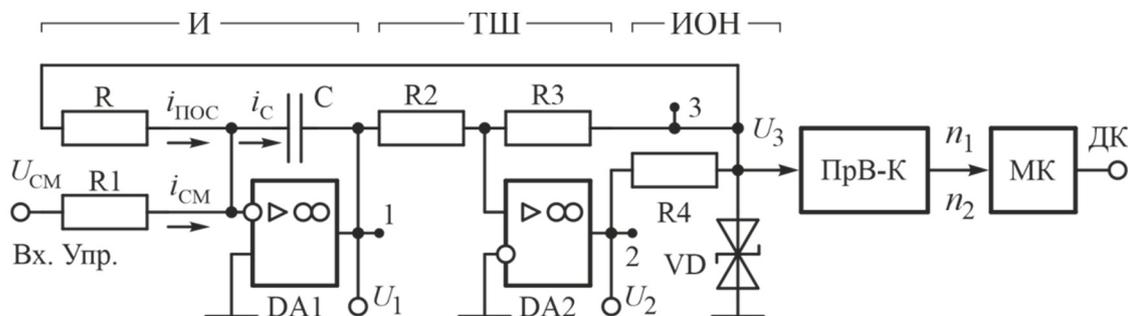


Рис. 1. ГЛИН на ОУ с дополнительным входом управления U_{CM} :

И – интегратор; ТШ – триггер Шмитта; ИОН – двухполярный источник опорного напряжения;

ПрВ-К – преобразователь «временной интервал – код»; МК – микроконтроллер;

$i_{ПЭС}$ – ток положительной обратной связи генератора; $i_{СМ}$ – ток смещения, обеспечивающий управление скважностью генератора; U_3 – опорное напряжение ИОН

Автоколебательный ГЛИН состоит из следующих основных частей: интегратора И на ОУ DA1; неинвертирующего триггера Шмитта ТШ на ОУ DA2; источника опорного напряжения ИОН, выполненного по схеме двухполярного параметрического стабилизатора напряжения на двухполярном стабилитроне VD. Назначение элементов и принцип преобразования входного сигнала подробно рассмотрены в работе [6].

Входное напряжение будет определяться как

$$U_{CM} = R1 \cdot i_{CM} = R1 \cdot i_{Пос} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{T} = R1 \cdot i_{Пос} \cdot \frac{\Delta t}{T}, \tag{1}$$

где T – период колебаний ГЛИН; t_1, t_2 , – время действия положительной и отрицательной полярности выходного напряжения ГЛИН.

Напряжение смещения U_{CM} по своей сути является входным напряжением $U_{ВХ}$: $U_{CM} = U_{ВХ}$.

Оценка стабильности преобразования входного напряжения

Анализ выражения (1) показывает, что стабильность преобразования напряжения $U_{ВХ}$ в относительный временной интервал ($\Delta t/T$) определяется стабильностью резистора R1 и тока положительной обратной связи $i_{Пос}$. Стабильность резистора R1 определяется из справочника. Значение тока $i_{Пос}$ определяется выражением

$$i_{Пос} = U_3 / R, \tag{2}$$

а его стабильность – стабильностью резистора R и стабильностью напряжения U_3 . Для схемы ГЛИН, изображенной на рис. 1, примем $U_{оп} = U_{ст} = U_3$ ($U_{ст}$ – напряжение стабилизации стабилитрона).

Влияние отклонения параметров от номинального значения определяется как сумма частных производных от каждого параметра [7–9]

$$\Delta(y) = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta(x_1) + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta(x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} \Delta(x_n), \tag{3}$$

и это влияние тем меньше, чем меньше слагаемых в сумме и чем меньшее влияние вносит каждое из них.

Значение отклонения тока $i_{Пос}$ будет определяться следующим выражением:

$$\Delta i_{Пос} = \frac{\partial F}{\partial U_3} \Delta U_3 + \frac{\partial F}{\partial R} \Delta R = \frac{1}{R^2} (R \cdot \Delta U_3 - U_3 \cdot \Delta R). \tag{4}$$

Оценим точностные параметры радиоэлементов [10,11].

Резисторы. Современные резисторы делятся на две группы – проволочные (П) и непроволочные (н/П). Меньшим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) обладают проволочные резисторы, но они, как правило, имеют большие габариты. Параметры малогабаритных типов резисторов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры резисторов стабильных в узком диапазоне температур

Резистор	Материал	ТКС, $\times 10^{-6}$ 1/°C	L / D, мм	Масса, г
C2-29В	н/П	$\pm 5,0$ (+20...+70 °C)	6,5 · 2,3 (0,062 Вт) 8,0 · 3,5 (0,125 Вт)	0,25 0,3
C5-60	П	$\pm 1,0$ (+5...+40 °C)	8,0 · 2,3 (0,125 Вт)	0,2
P1-16	н/П	(+20...+125 °C) ± 25 (0,1...200 кОм) ± 10 (10...100 кОм)	3,2 · 1,6 · 0,5 (0,125 Вт)	0,05
P1-8П*	н/П	$\pm 5,0$ (+20...+120 °C)	1,0 · 1,25 · 0,5 (0,125 Вт)	0,01

Как видно из таблицы, наименьшее значение ТКС у проволочного резистора С5-60. Приблизительно при тех же габаритах резистор С2-29В обладает в 5 раз худшими параметрами. Резистор для поверхностного монтажа Р1-8П* имеет приемлемые параметры и малые габариты, но выпускается по спецзаказу.

Более высокими точностными параметрами обладают металлофольговые резисторы (МФ). Так, у резисторов фирмы Vishay (США) на узком температурном диапазоне (0...+60 °С) ТКС резисторов достигает значения $\pm 0,05 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, а на широком диапазоне (-55...+125 °С) – $\pm 0,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Параметры некоторых металлофольговых резисторов показаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры металлофольговых резисторов

Резистор	Материал	ТКС, $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	L / D , мм	Произв.
ММР	МФ	$\pm 5,0 (-65...+175 ^\circ\text{C})$	$3,5 \cdot 3,2 \cdot 2,0 (0,1 \text{ Вт})$	Отеч.
ММУ*	МФ	$\pm 1,0 (-65...+175 ^\circ\text{C})$	$3,2 \cdot 2,5 \cdot 1,5 (0,05 \text{ Вт})$	Отеч.
SMR1DZ*	МФ	$\pm 1,0 (-55...+125 ^\circ\text{C})$	$7,3 \cdot 4,3 \cdot 2,8 (0,6 \text{ Вт})$	Vishay

Примечание: *Резисторные сборки делителя напряжения.

Стабилитроны. Типовые параметры некоторых двуханодных стабилитронов показаны в табл. 3. В двуханодных стабилитронах в силу их конструкции осуществляется термокомпенсация напряжения стабилизации и это позволяет отнести их к стабилитронам повышенной стабильности. В целом для получения стабильного значения величины опорного напряжения критичным является значение температурного коэффициента напряжения (ТКН) стабилитрона. Разность напряжений $\Delta U_{\text{СТ}}$ считается величиной постоянной и ее можно учесть в поправочном коэффициенте.

Таблица 3

Параметры двуханодных стабилитронов

	$U_{\text{СТ}}$, В	$I_{\text{СТ}}$, мА	$P_{\text{МАХ}}$, мВт	$\Delta U_{\text{СТ}} \cdot 10^{-6}$, $1/^\circ\text{C}$	$\Delta U^*_{\text{СТ}}$, мВ	$I_{\text{СТ МИН}}$, мА	$I_{\text{СТ МАХ}}$, мА
2С168В	6,8	10,0	150	± 500	340	3	20
2С170А	7,0	10,0	150	± 100	270	3	20
2С175А	7,5	5,0	150	± 400	370	3	18
КС535Б	15,0	1,0	500	± 30	–	–	40

Примечание: $\Delta U_{\text{СТ}}$ – дрейф напряжения стабилизации; $\Delta U^*_{\text{СТ}}$ – разность напряжения стабилизации для положительной и отрицательной полярности.

Стабилитрон КС535Б имеет небольшое значение нестабильности напряжения стабилизации ($\Delta U_{\text{СТ}} = \pm 30 \cdot 10^{-6}$, В/°С), но у него высокое напряжение стабилизации.

Анализ данных, представленных в табл. 1–3, показывает, что точностные параметры прецизионных резисторов в среднем на 1...2 порядка лучше точностных параметров двуханодных стабилитронов.

Выберем металлофольговый резистор ММР с номинальным значением сопротивления 100 кОм и стабилитрон 2С170:

$$\Delta i_{\text{ПОС}} = \frac{1}{R^2} (R \cdot \Delta U_3 - U_3 \cdot \Delta R) = \frac{1}{10^{10}} (10^5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 5 \cdot 10^{-6}) \approx 10^{-9} [\text{А}]. \quad (5)$$

Очевидно, что нестабильность тока $\Delta i_{\text{ПОС}}$ фактически определяется нестабильностью стабилитрона и номиналом резистора R . Для резистора $R = 10$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 10^{-8}$ [А]; для резистора $R = 1,0$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 10^{-7}$ [А].

Схемотехника ГЛИН с источником опорного напряжения на одиночных стабилитронах

Одиночные прецизионные стабилитроны по сравнению с двуханодными обладают более высокими точностными параметрами (табл. 4).

Таблица 4

Параметры прецизионных стабилизаторов

	$U_{СТ}$, В	$I_{СТ}$, мА	$P_{МАХ}$, мВт	$\Delta U_{СТ} \cdot 10^{-6}$, 1/°С	$\delta U_{СТ}$, %	$\Delta U_{СТ}$, %	$T_{МИН}$, $T_{МАХ}$, °С
2С108В	6,4	7,5	70	$\pm 5,0$	$\pm 0,8$	$\pm 5,0$	-5...+60
2С166В	6,6	7,5	70	$\pm 5,0$	1,4 мВ	$\pm 5,0$	-5...+50
2С190Т	9,0	10,0	150	$\pm 5,0$	$\pm 0,02$	$\pm 5,0$	-60...+120
2С191Ф	9,1	10,0	200	$\pm 5,0$	2,0 мВ	$\pm 5,0$	-60...+120

Примечания: $\Delta U_{СТ}$ – разброс напряжения стабилизации; $\delta U_{СТ}$ – временная нестабильность напряжения стабилизации.

Стабильность одиночных стабилизаторов на полтора-два порядка выше стабильности удобных, с точки зрения простоты схемотехники, двуханодных стабилизаторов. Но стабилизаторы по своей сути являются параметрическими радиоэлементами и имеют технологические ограничения по повышению их стабильности. Исключение составляет режим термостатирования, но этот режим требует для своей работы большого потребления мощности от источника питания.

Для создания высокостабильных ИОН широко используются специализированные ИМС, некоторые из которых, отечественные и зарубежные, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры источников опорного напряжения параллельного типа

Параметры	$U_{СТ}$, В	$I_{ПОТ}$, мА	$I_{ВЫХ}$, мА	$\Delta U_{СТ} \cdot 10^{-6}$, 1/°С	$\delta U_{СТ}$, %	Страна	$T_{МИН}$, $T_{МАХ}$, °С
2С120Б	1,225	0,5	125	$\pm 5,0$	0,03	(Россия)	-60...+125
1369ЕС01В4	2,5; 3,0	1,5	10,0	10,0	–	(Россия)	-60...+125
5400ТР045А-031	2,048; 2,5; 4,096	3,0	20,0	50,0	–	СОЮЗ дизайн-центр	-60...+125
5317ЕС015	2,5	0,07	–	50,0	–	Интеграл (Беларусь)	-60...+125
УР1101ЕН01	1,25	–	0,05–5	10–100	0,32–4	ДП «Квazar-ИС»	
Н142ЕН19 142ЕР2У	2,5 1,24	1–80	–	50 100	0,12 0,03	НПП ОАО «ЭлТом»	-60...+125
1309ЕС	1,25–4,096	4,0	10,0	20	–	«Миландр»	-60...+125
1394ЕС025	1,225	0,05–10	–	50	–	НЗПП «Восток»	-60...+125
МАХ6138	1,22–5	0,5–10	–	4,0	0,1–0,5	МАХИМ, США	-65...+150
АDR5040	2,048–5	0,005–15	–	10,0	$\pm 0,2$	Analog Device	-60...+120

Несомненным преимуществом интегральных ИОН является их невысокое напряжение стабилизации – 1,225...5,0 В, что недостижимо для стабилизаторов. Для построения ГЛИН с источником опорного напряжения на одиночных стабилизаторах больше подходят ИОН с параллельным включением регулирующего элемента (РЭ). Такие ИОН часто на схемах обозначают как одиночный стабилизатор.

Схема двухполярного источника опорного напряжения на двух одиночных стабилизаторах показана на рис. 2.

Пунктиром на схеме выделена часть схемы ГЛИН, касающейся триггера Шмитта на ОУ DA2. На одиночных стабилизаторах VD и балластных резисторах R_B выполнены параметрические стабилизаторы, формирующие два опорных напряжения: $+U_{ОП}$ и $-U_{ОП}$. Электронный переключающий ключ S с помощью устройства управления УУ осуществляет подключение

напряжения ИОН к инвертирующему входу ОУ: на временном интервале нарастания напряжения на выходе интегратора – к источнику $+U_{\text{ОП}}$ (рис. 2), а на временном интервале ниспадения напряжения на выходе интегратора – к источнику $-U_{\text{ОП}}$. Устройство управления в качестве информационных сигналов использует потенциал U_2 .

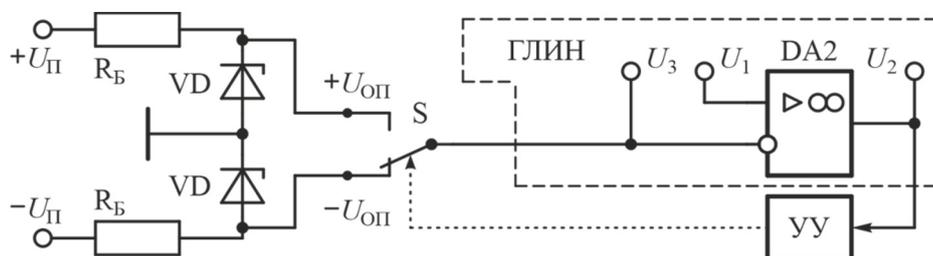


Рис. 2. Схемотехника ГЛИН с ИОН на двух одиночных стабилизаторах

Применение двух одиночных стабилизаторов в ИОН увеличивает его нестабильность по сравнению с одним стабилизатором, так как их дрейфы не коррелированы. В этом случае необходимо брать среднеквадратическое отклонение (СКО) напряжения стабилизации двух стабилизаторов

$$\Delta_{U_{\text{ст}}}^* = \sqrt{(\Delta_{U_{\text{ст}}}1)^2 + (\Delta_{U_{\text{ст}}}2)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta_{U_{\text{ст}}}1$ и $\Delta_{U_{\text{ст}}}2$ – дрейф первого и второго стабилизаторов VD. Для двух стабилизаторов 2С120Б СКО будет $\Delta_{U_{\text{ст}}}^* = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07$ [мкВ/°С]. Кроме того, в редком случае одиночные стабилизаторы способны обеспечить равенство напряжений положительной и отрицательной полярности. Как правило, $|+U_{\text{ОП}}| \neq |-U_{\text{ОП}}|$.

Для определения значения тока $i_{\text{ПОС}}$ в выражении (2) необходимо учесть дрейф напряжения смещения ОУ DA1

$$i_{\text{ПОС}} = (U_3 + U_{\text{СМ ОУ}}) / R. \quad (7)$$

В соответствии с выражением (4) и (7)

$$\Delta i_{\text{ПОС}} = \frac{1}{R^2} (R(\Delta U_3 + \Delta U_{\text{СМ}}) - (U_3 + U_{\text{СМ}}) \Delta R). \quad (8)$$

Параметры некоторых прецизионных ОУ представлены в табл. 6 [12, 13].

Таблица 6

Основные параметры прецизионных ОУ

ОУ	$U_{\text{СМ}}$, мкВ	$\Delta U_{\text{СМ}} / \Delta T$, мкВ/°С	K_U , $\times 10^3$	$I_{\text{ВХ}}$, нА	$\Delta I_{\text{ВХ}} / \Delta T$, нА/°С	f , МГц	$V_{\text{У Вых}}$, В/мкс	$I_{\text{ПОТР}}$, мА
140УД17	75	3,0	200	2,5	0,025	4,0	0,1	4,5
140УД26	30	0,6	1000	40,0	1,0	20,0	11,0	5,0
140УД31	25	0,6	300	2,0	0,025	0,25	–	4,0
544УД12	10	0,6	2000	1,0	0,15	0,4	0,1	1,0
140УД24	5	0,05	$1 \cdot 10^3$	0,01	0,2	0,8	2,0	4,0
МАХ4239	0,1	0,01	$3 \cdot 10^4$	0,001	–	6,5	1,6	0,6

Подставляя значения параметров, рассмотренных выше радиоэлементов и ОУ 140УД26 (544УД12), в выражение (8), получим

$$\Delta i_{\text{ПОС}} = \frac{1}{10^{10}} (10^5 \cdot (7,07 + 0,6) \cdot 10^{-6} - (1,25 + 3,0 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-6}) \approx 7,67 \cdot 10^{-11} \text{ [A]}. \quad (9)$$

Для резистора $R = 10$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 7,67 \cdot 10^{-10}$ [A]; для резистора $R = 1,0$ кОм – $\Delta i_{\text{ПОС}} \approx 7,67 \cdot 10^{-9}$ [A].

**Схемотехника ГЛИН с источником опорного напряжения
на одном одиночном стабилитроне**

Для исключения несимметричности напряжения U_3 ($U_{оп}$) для положительной и отрицательной полярности и повышения стабильности тока $i_{пос}$ была разработана схема двухполярного ИОН на одном стабилитроне, показанная на рис. 3.

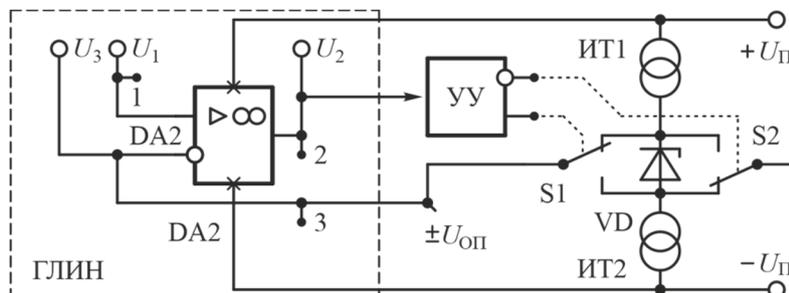


Рис. 3. Схемотехника ГЛИН с ИОН на одном одиночном стабилитроне

Пунктиром на схеме выделена часть схемы ГЛИН, касающейся триггера Шмитта на ОУ DA2. На источниках тока ИТ1 и ИТ2 выполнена цепь смещения стабилитрона, обеспечивающая рабочий режим его работы. Устройство управления управляет двумя переключающими электронными ключами S1 и S2, работающими в противофазе. В указанном на схеме положении ключей анод стабилитрона подключен к общему проводу и имеет нулевой потенциал, а катод подключен к источнику тока ИТ1 и на нем формируется напряжение $+U_{оп}$. Противоположное состояние ключей обеспечивает подключение катода стабилитрона к общему проводу и теперь на нем обеспечивает нулевой потенциал, а на аноде стабилитрона в это время формируется напряжение $-U_{оп}$.

В этом случае в соответствии с выражениями (7–9) для резистора $R = 10$ кОм дрейф тока $\Delta i_{пос} \approx 5,6 \cdot 10^{-11}$ [А].

Для получения $\Delta i_{пос}$ меньшего значения необходимо применять стабилитроны или источники опорного напряжения (ИОН) в виде интегральных схем с термостатированием. Так, термостабилизированный ИОН фирмы Linear Technology LTZ1000A имеет дрейф всего 0,05 мкВ/°С, но имеет достаточно высокое энергопотребление [14]. В этом случае для ИОН LTZ1000A и для $R = 100$ кОм возможно получить дрейф тока $\Delta i_{пос} \approx 6,5 \cdot 10^{-12}$ [А].

Для достижения высоких параметров стабильности тока $i_{пос}$, рассмотренных выше, необходимо также учесть и дрейф ($\Delta I_{вх} / \Delta T$) входного тока ОУ (табл. 6). Операционные усилители необходимо выбирать с минимальными значениями дрейфов $U_{см}$ и $i_{вх}$.

Один из вариантов построения источников тока ИТ1 и ИТ2 показан на рис. 4.

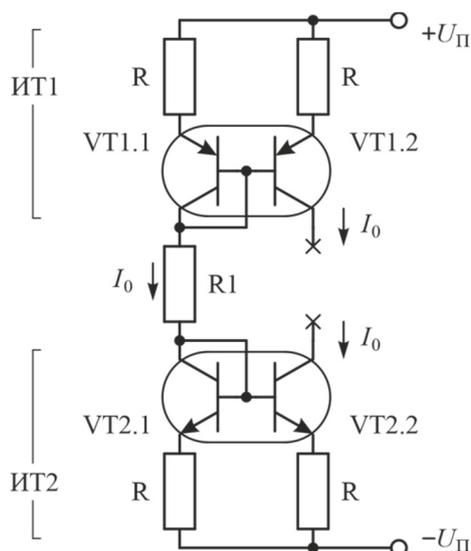


Рис. 4. Схемотехника источников тока ИТ1 и ИТ2 на токовом зеркале

Источники тока построены как токовое зеркало: ИТ1 – на дифференциальной паре биполярных транзисторов VT1.1, VT1.2; ИТ2 – на дифференциальной паре биполярных транзисторов VT2.1, VT2.2. Элементом, задающим значение тока I_0 , является резистор R_1 . Значение тока I_0 определяется следующим выражением:

$$I_0 = \left[(|+U_{\Pi}| + |-U_{\Pi}|) - (U_{БЭ\text{ VT1.1}} + U_{БЭ\text{ VT2.1}} + 2U_R) \right] / R_1. \quad (10)$$

Стабилитрон VD (см. рис. 3) необходимо подключать к коллекторам транзисторов VT1.2 и VT2.2.

Рассмотренная методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения позволяет повысить точность выставки пороговых напряжений триггера Шмитта и тем самым повысить стабильность работы различных электронных устройств, в которых ТШ применяется как основной элемент, и его точностные параметры определяют точностные параметры всего измерительного устройства. Так, в работах [10, 15, 16] рассматривается применение ТШ для создания автоколебательного режима работы акселерометра. Автоколебательный режим работы акселерометра позволяет повысить чувствительность акселерометра, а более высокие точностные параметры ТШ – снизить погрешность производимых измерений кажущегося ускорения.

Методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения

Методика схемотехнического построения двухполярного источника опорного напряжения включает в себя следующие действия:

- 1) использование в качестве объекта модернизации преобразователь напряжение – временной код;
- 2) использование в качестве непрерывного интегратора генератора линейно изменяющегося сигнала на двух ОУ;
- 3) перевод ГЛИН в управляемый режим работы для получения временных интервалов t_1 и t_2 , значения которых зависят от значения входного управляющего сигнала;
- 4) разработка математической модели стабильности преобразования входного напряжения в зависимости от стабильности ИОН;
- 5) разработка схемотехнических решений для использования одиночного прецизионного стабилитрона для формирования двухполярного опорного напряжения;
- 6) выдача рекомендаций по выбору операционных усилителей по параметрам, обеспечивающим минимальное паразитное их влияние на работу схемы;
- 7) выдача схемотехнических рекомендаций по реализации двухполярного источника тока.

Заключение

Использование рассмотренной методики позволяет повысить точность интегрирования входного сигнала и тем самым снизить погрешность преобразования входного аналогового сигнала во временной интервал. Указанная методика может быть использована для конструирования широкого круга измерительных приборов, в которых необходимо осуществить преобразование аналоговой величины в цифровой код.

Список литературы

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2 кн. М. : Мир, 1992.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М. : Додэка-XXI, 2005. 528 с.
3. Микросхемы АЦП и ЦАП. М. : Додэка-XXI, 2005. 432 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. М. : Додэка-XXI, 2008. 942 с.
5. Харрисон Л. Т. Источники опорного напряжения и тока : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2015. 576 с.
6. Ватулин М. А., Ефимов В. П., Борматов Е. В., Зубков А. В. Методика схемотехнического построения преобразователя аналоговой величины во временной интервал // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 16–22. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2

7. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.
8. Слепова С. В. Основы теории точности измерительных приборов : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.
9. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Машиностроение, 1978. 831 с.
10. Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А. [и др.]. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43–46.
11. Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5
12. Операционные усилители и компараторы : справочник. Т. 12. М. : Додэка-XXI, 2001.
13. Картер Р., Манчини Р. Операционные усилители для всех : пер. с англ. М. : ДМК Пресс, 2016. 528 с.
14. LTZ1000A. Ультрапрецизионные источники опорного напряжения. URL: http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=66781 (дата обращения: 24.10.2023).
15. Ватутин М. А., Ключников А. И., Козлов Д. М. Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 22–32.
16. Ватутин М. А., Ключников А. И. Методика повышения стабильности работы нелинейного звена с запаздыванием для автоколебательного акселерометра // Труды МАИ. 2022. № 127. doi: 10.34759/trd-2022-127-22

References

1. Ash Zh. *Datchiki izmeritel'nykh sistem: v 2 kn. = Sensors of measuring systems : in 2 books*. Moscow: Mir, 1992. (In Russ.)
2. Volovich G.I. *Skhemitekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv = Circuitry of analog and analog-digital electronic devices*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:528. (In Russ.)
3. *Mikroskhemy ATsP i TsAP = ADC and DAC chips*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:432. (In Russ.)
4. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemitekhnika: per. s nem. = Semiconductor circuit engineering : trans. from German*. Moscow: Dodeka-XXI, 2008:942. (In Russ.)
5. Kharrison L.T. *Istochniki opornogo napryazheniya i toka: per. s angl. = Sources of reference voltage and current : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2015:576. (In Russ.)
6. Vatutin M.A., Efimov V.P., Bormatov E.V., Zubkov A.V. Method of circuit design of an analog magnitude converter in a time interval. *Izmerenie. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(3):16–22. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-2
7. Dushina E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)
8. Slepova S.V. *Osnovy teorii tochnosti izmeritel'nykh priborov: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of accuracy of measuring instruments : textbook*. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2008:192. (In Russ.)
9. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov = Handbook of mathematics for scientists and engineers*. Moscow: Mashinostroenie, 1978:831. (In Russ.)
10. Luchko S.V., Baluev S.Yu., Vatutin M.A. et al. Precision parameters of a nonlinear link for an auto-oscillatory accelerometer. *Izvestiya vuzov. Priboroostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2013;56(12):43–46. (In Russ.)
11. Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with a semiconductor sensing element. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-1-5
12. *Operatsionnye usiliteli i komparatory: spravochnik. T. 12 = Operational amplifiers and comparators : handbook. Vol. 12*. Moscow: Dodeka-XXI, 2001. (In Russ.)
13. Karter R., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh: per. s angl. = Operational amplifiers for all : trans. from English*. Moscow: DMK Press, 2016:528. (In Russ.)
14. LTZ1000A. *Ul'trapretsizionnye istochniki opornogo napryazheniya = LTZ1000A. Ultra-precision reference voltage sources*. (In Russ.). Available at: http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=66781 (accessed 24.10.2023).
15. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Kozlov D.M. Methodology for reducing the error of the self-oscillatory accelerometer. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2022;(4):22–32. (In Russ.)
16. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. A technique for increasing the stability of a nonlinear link with a delay for an auto-oscillatory accelerometer. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2022;(127). (In Russ.). doi: 10.34759/trd-2022-127-22

*Информация об авторах / Information about the authors***Михаил Алексеевич Ватутин**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автономных систем управления,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vatutinm@inbox.ru

Mikhail A. Vatutin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of autonomous control systems,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Игорь Николаевич Кошель

кандидат технических наук, начальник факультета,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Igor N. Koshel

Candidate of technical sciences, head of the faculty,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Владимир Владимирович Бурмистров

кандидат технических наук,
старший преподаватель 21 кафедры,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vladimir V. Burmistrov

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the 21 sub-department,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Никита Александрович Петров

курсант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Nikita A. Petrov

Cadet,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 03.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 01.07.2024

Принята к публикации / Accepted 30.07.2024