ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 2.

УДК 621.3.084

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Б.М. МАМИКОНЯН, Х.Б. МАМИКОНЯН, Е.Х. НАЗАРЯН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОК

Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных в настоящее время стабилизаторов постоянного тока, указаны их достоинства и недостатки, оценены метрологические характеристики с целью их применения для питания измерительных цепей с резистивными первичными преобразователями. Синтезирована измерительная цепь приращения сопротивления металлических терморезисторов, которая отличается простотой и высокими метрологическими показателями.

Ключевые слова: стабилизатор тока, метрологические показатели, измерительная цепь, резистивный преобразователь, обратная связь.

Преобразователи напряжения в ток (ПНТ) применяются в электроизмерительной технике для питания цепей с параметрическими первичными измерительными преобразователями (ПП) неэлектрических величин в электрические. Отличительная черта подобных устройств – удаленность ПП от ПНТ. Для исключения влияния изменения сопротивлений проводов соединительной линии на результаты измерения используется четырехпроводное включение ПП [1-3]. Через ПП (R_x) протекает ток I_0 (рис.1а), задаваемый стабилизированным источником тока. Сопротивления r_1 и r_4 токовых соединительных проводов, а также изменение R_x не влияют на ток I_0. Для измерения выходного напряжения $U_x = I_0R_x$ обычно используются высокоомные измерители, вследствие чего сопротивления r_2 и r_3 потенциальных соединительных проводов также не влияют на результаты измерения.

Источник тока I_0 может быть реализован известным способом с помощью источника стабильного напряжения U_0 и высокостабильного резистора соответствующего номинала R. При этом качество источника тока тем выше, чем больше R по сравнению с R_x, значение которого задано. Однако увеличение R приводит к необходимости соответствующего увеличения U_0 (для обеспечения требуемого значения I_0), что не всегда возможно и целесообразно, поскольку в качестве U_0 желательно использовать унифицированные микросхемы стабилизированных источников питания. Поэтому более рационально применение автоматических стабилизаторов тока (СТ), обеспечивающих независимость тока I_0 от сопротивления нагрузки при низковольтном источнике напряжения.

В простейшей схеме СТ (рис.1б) с помощью резистора R в цепь база-эмиттер транзистора VT введена отрицательная обратная связь (ООС) по току. При расчетном значении тока I_0 на резисторе R возникает падение напряжения I_0R, и напряжение $U_{БЭ} = U_0 - I_0R$ поддерживает необходимое открытое состояние транзистора. Если по какой-либо причине (изменение R_x, r_1, r_4) изменяется ток I_0, то изменяется также $U_{БЭ}$, что

приводит к такому состоянию транзистора, чтобы соответствующим изменением сопротивления участка коллектор-эмиттер восстановилось расчетное значение тока I_0. Очевидно, что более эффективная ООС по току может быть реализована добавлением в схему операционного усилителя [4] (рис.1в).

В рассмотренных схемах ток, потребляемый от источника U_0, равен току нагрузки. Чтобы меньше нагружать источник U_0, можно подавать входное напряжение на Н-вход ОУ (рис. 1г). Кроме того, в этом СТ установлен дополнительный резистор R_4, который отводит часть тока нагрузки на землю. В результате ток в нагрузке

$$I_0 = \frac{U_0}{R_1}\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)\left(1+\frac{R_2}{R_4}\right)$$

можно регулировать в широких пределах соответствующим выбором сопротивлений стабильных резисторов. В частности, при $R_1 = R_2 = R_4$ ток $I_0 = 4U_0 / R_1$.

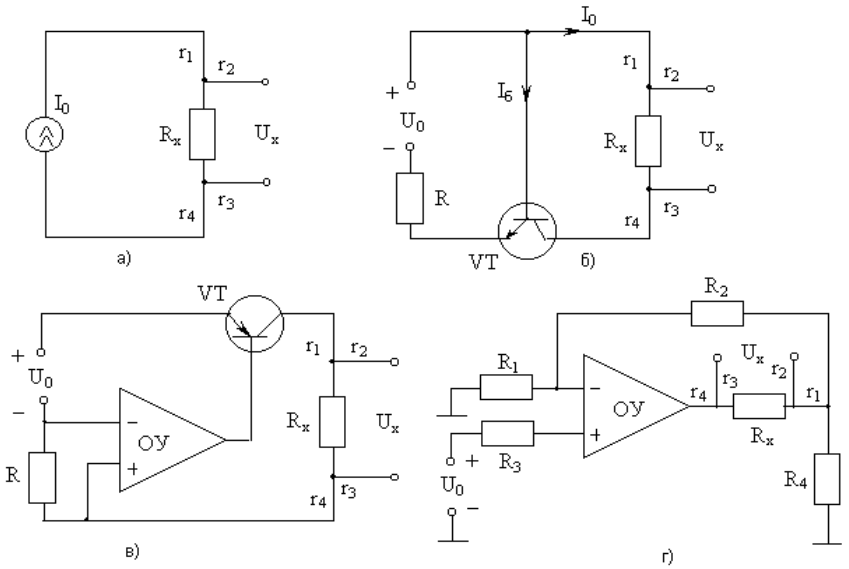

Рис. 1. Принципиальные схемы: а - источника тока; б,в,г- стабилизаторов тока

Недостатком СТ (рис.1г) является невозможность заземления нагрузки, что в отдельных случаях ограничивает его применение [5]. В этом смысле более совершенны схемы СТ [6, 7], позволяющие иметь заземленную нагрузку (рис.2а). В схеме выражение тока I_0 можно получить с помощью системы уравнений

$$\begin{cases} U_0 = I_3 R_3 + I_0(r_1 + R_x + r_4), \\ U_0 = I_3 R_3 + I_2 R_1, \\ I_2(R_2 + R_1) = I_4 R_4 + I_0(r_1 + R_x + r_4), \end{cases}$$

где I_2, I_3, I_4 - токи, протекающие через соответствующие резисторы.

Решение системы уравнений приводит к результату

$$I_0 = \frac{U_0 R_1 R_4}{(R_1 R_4 - R_2 R_3)(r_1 + R_x + r_4) + R_1 R_3 R_4}. \qquad (1)$$

Для того чтобы I_0 не зависел от сопротивлений ПП и проводов линии, необходимо выполнение равенства

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \qquad (2)$$

Тогда из (1) последует $I_0 = U_0 / R_3$. При практической реализации схемы целесообразно выбрать $R_3 = R_1$, $R_4 = R_2$. Отметим, что если в этой схеме подавать U_0 через резистор R_1 на И-вход ОУ, а левый зажим резистора R_3 заземлить, то при выполнении равенства (2) изменится только знак тока в нагрузке. Чтобы сопротивление провода r_4 не влияло на значение потенциала нижнего зажима ПП, в схему вводится ОУ2 (рис.2б), который поддерживает нулевой потенциал этого зажима вне зависимости от сопротивлений проводов r_3 и r_4, благодаря чему напряжение U_x между проводом r_2 и землей поддерживается равным $U_x = I_0 R_x$ и отпадает необходимость в использовании выходного дифференциального усилителя.

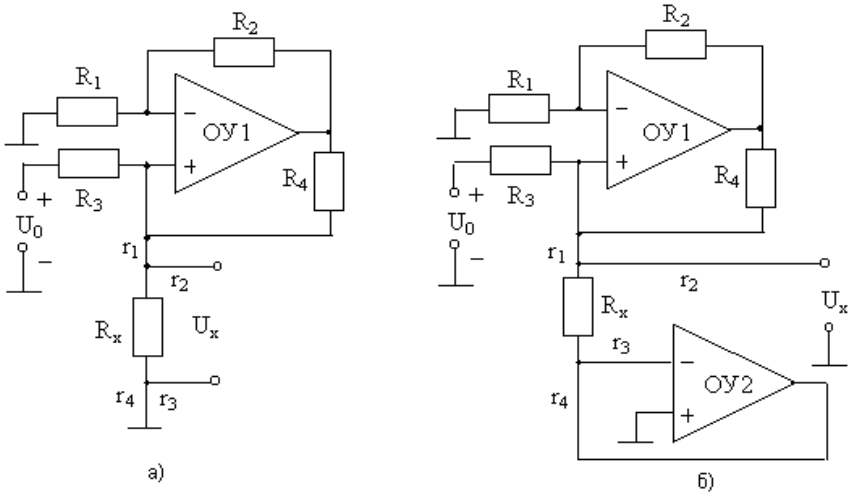

Рис. 2. Принципиальные схемы стабилизаторов тока: а - с заземленной нагрузкой; б - с виртуально заземленной нагрузкой

В результате сравнительного анализа существующих схем ПНТ в работе синтезирована оптимальная схема цепи для измерения малых приращений сопротивления стандартных металлических терморезисторов, содержащая минимально возможное число элементов (рис.3а), где в одном резисторе (R_0) совмещены две функции: источника опорного напряжения для ООС СТ и резистора сравнения для подавления нуля выходного напряжения U_x измерительной цепи. Значение R_0 выбирается равным начальному сопротивлению $R_x = R_0 + \Delta R_x$ ПП. Благодаря применению полевого транзистора через резисторы R_0 и R_x протекает один и тот же ток I_0 , поэтому выходное напряжение цепи

$$U_x = I_0 (R_x - R_0) = I_0 \Delta R_x \qquad (3)$$

изменяется линейно от измеряемого приращения сопротивления ΔR_x и практически не зависит от сопротивлений соединительных проводов. В случае, когда требуется заземленная нагрузка, можно поменять местами резисторы R_x и R_0.

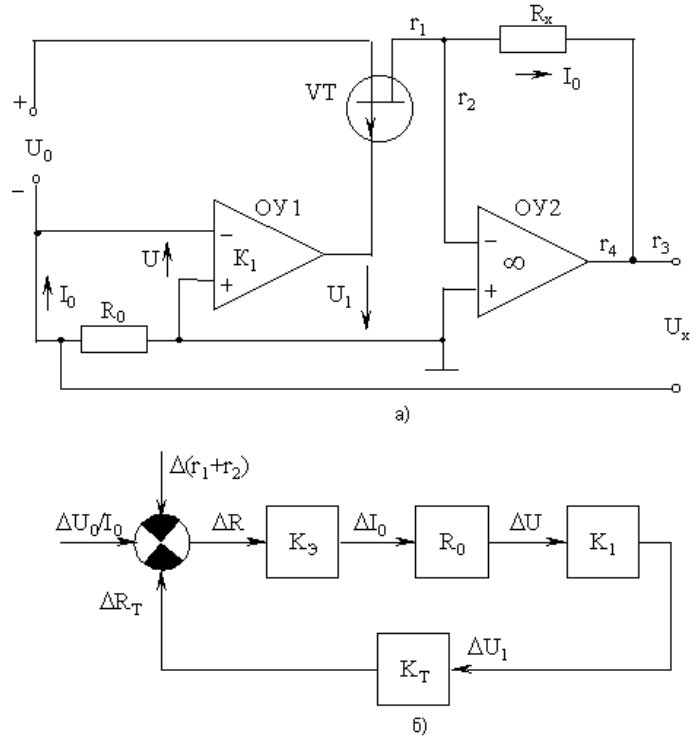

Рис. 3. Принципиальная схема цепи: а - для измерения приращения сопротивления; б - структурная схема стабилизатора тока

Как следует из (3), рассматриваемая цепь обладает максимально возможной чувствительностью при заданном значении измерительного тока I_0, протекающего через ПП. Стабильность нуля цепи определяется только стабильностью резистора R_0 и напряжения смещения нуля усилителя ОУ2 ($U_{см2}$), а стабильность чувствительности – только стабильностью тока I_0, значение которого не зависит от сопротивления ПП. Резистор R_0 изготавливается из высокостабильных материалов (обычно, манганин) и подгоняется с высокой точностью (0,001 *Ом*), поэтому реальная функция преобразования цепи с учетом возможных погрешностей имеет вид

$$U'_x = U_x + \Delta U_x = (I_0 + \Delta I_0)\Delta R_x + U_{см2}, \qquad (4)$$

где $\Delta U_x = U_{см2} + \Delta I_0 \Delta R_x$ – абсолютная погрешность преобразования.

В выражении измерительного тока

$$I_0 = U_0 / R_\Sigma = U_0 / (R_0 + R_T + r_1 + r_2)$$

переменными являются U_0, R_T и $(r_1 + r_2)$, поэтому полное приращение тока равно

$$\Delta I_0 = \frac{\partial I_0}{\partial U_0}\Delta U_0 + \frac{\partial I_0}{\partial R_T}\Delta R_T + \frac{\partial I_0}{\partial (r_1 + r_2)}\Delta(r_1 + r_2) =$$

$$= \frac{\Delta U_0}{R_\Sigma} - I_0 \frac{\Delta R_T + \Delta(r_1 + r_2)}{R_\Sigma}. \qquad (5)$$

Если $\Delta(r_1 + r_2) = 0$ и изменяется только U_0, то для обеспечения условия $I_0 = 0$ СТ должен автоматически поддерживать равенство $I_0 \Delta R_T = \Delta U_0$ соответствующим изменением сопротивления R_T участка исток-сток транзистора VT. Если же $U_0 = \text{const}$ и изменяется только сопротивление $(r_1 + r_2)$ проводов линии связи, изготавливаемых обычно из меди и меняющих свое сопротивление под действием температуры окружающей среды, то СТ должен поддерживать равенство $\Delta R_T = -\Delta(r_1 + r_2)$. Очевидно, что СТ обеспечивает указанные требования с некоторой погрешностью (погрешность статизма). Для количественной оценки степени стабилизации составлена структурная схема СТ относительно приращений параметров и сигналов цепи (рис.3б), где $K_Э = U_0 / R_\Sigma^2$ – коэффициент преобразования электрического звена СТ; $K_T = \Delta R_T / \Delta U_1$ – коэффициент преобразования транзистора. Из структурной схемы следует

$$\Delta I_0 = \frac{[\Delta U_0 - I_0 \Delta(r_1 + r_2)] / R_\Sigma}{1 + K_э K_T K_1 R_0}. \qquad (6)$$

Сравнение выражений (5) и (6) показывает, что обратная связь в цепи СТ в $K = 1 + K_Э K_T K_1 R_0$ раз ослабляет влияние изменения значений U_0 и $(r_1 + r_2)$ на ток I_0.

Реализованный опытный образец преобразователя (рис.3а) предназначен для измерения температуры в узких пределах $t = 35...45\ °C$ с использованием промышленного медного термопреобразователя сопротивления (ТС) градуировки 100 М с чувствительностью $W_{100} = 1{,}4280$ и со значениями сопротивления в крайних точках предела измерения $R_0 = R_{35} = 114{,}97$ *Ом*, $R_{45} = 119{,}25$ *Ом* ($\Delta R_{шк} = 4{,}28$ *Ом*). СТ реализован на прецизионном инструментальном ОУ АД524С фирмы Analog DevIces (США) и полевом транзисторе КП312А. Исходя из требуемой чувствительности цепи, выбран измерительный ток $I_0 = 2{,}34$ *мА*, при котором максимальная мощность рассеивания на ТС составляет $P_{max} = I_0^2 R_{45} = 0{,}653$ *мВт*. При этом самонагревом ТС практически можно пренебречь.

Если пределы измерения температуры, марка ТС и ток I_0 заданы, то в выражении К оказываются фиксированными R_0 и $U = I_0 R_0$. Номинальные значения напряжения U_1, а следовательно, и коэффициента усиления K_1 ОУ1 могут при этом изменяться лишь в небольших пределах, исходя из необходимости обеспечения работы транзистора на линейном участке выходных характеристик. При токе $I_0 = 2{,}34$ *мА* это значение напряжения $U_0 = 2{,}69$ *В*, с учетом чего получаем $K_1 = U_1 / U = 10$. Практически фиксированным оказывается также коэффициент преобразования K_T транзистора, определяемый по его характеристикам: $K_T = 2564$ *Ом/В*. Таким образом, варьируемым параметром в выражении К оказывается лишь коэффициент $K_Э = U_0 / R_\Sigma^2 = I_0 / R_\Sigma$, при

этом по характеристикам транзистора КП312А значение U_0 должно находиться в диапазоне от 4,5 до 15 *В*. В таблице приведены значения параметров СТ при $(r_1 + r_2) = 10$ *Ом* и различных значениях U_0. Видно, что в рассматриваемой цепи степень стабилизации тока I_0 тем выше, чем меньше U_0. Например, при изменении температуры окружающей среды на $\Delta t = \pm 10\ ^\circ C$ относительно градуировочной сопротивление медных соединительных проводов изменяется на $\Delta(r_1+r_2) = \pm 0{,}428$ *Ом*, что вызывает относительную погрешность измерения (при U_0=5 *В*, I_0=2,34 *мА*)

$$\delta_t = \frac{\Delta(r_1 + r_2)}{R_\Sigma} \cdot 100 = \pm 0{,}2\%$$

при отсутствии стабилизации тока и ± 0,043 % - при ее наличии.

Таблица

U_0, *В*	5	6	7	8	10	12	15
R_Σ, *Ом*	2137	2564	2991	3419	4274	5128	6410
$U_{СИ}$, *В*	4,71	5,71	6,71	7,71	9,71	11,71	14,71
$R_Т$, *Ом*	2012	2439	2866	3294	4149	5003	6285
$K_Э \times 10^6$, *А/Ом*	1,095	0,9126	0,7822	0,6844	0,5476	0,4563	0,3650
K	4,23	3,69	3,30	3,02	2,61	2,35	2,08

Что касается стабильности нуля рассматриваемой измерительной цепи, то, как следует из (4), она определяется только значением и стабильностью аддитивной погрешности $U_{см2}$. Поэтому в качестве ОУ2 следует применять прецизионные ОУ, у которых напряжение смещения нуля лежит в пределах 5….100 *мкВ*, и использовать внешнюю цепь установки нуля этого напряжения [7]. Подобным способом в нормальных условиях градуировки можно исключить аддитивную погрешность. В условиях эксплуатации аддитивная погрешность будет возникать главным образом при отклонениях температуры окружающей среды. Температурная зависимость напряжения смешения нуля прецизионных ОУ составляет $\Delta U_{см}$ = =0,05 ... 3,0 *мкВ* / °*С* [7, 8]. В этой связи следует отметить одну особенность рассматриваемой цепи: ОУ2 здесь работает в режиме, близком режиму повторителя напряжения, а большинство высококачественных прецизионных ОУ, к сожалению, не могут работать устойчиво при коэффициенте усиления К < 25…20. В связи с этим в рассматриваемой цепи в качестве ОУ2 использован ОУ марки КР14ОУД7 с $K_U = 50 \cdot 10^3$, $U_{см}$=4 *мВ*, $\Delta U_{см}$= 6 *мкВ* / °*С* [8]. Поэтому аддитивная составляющая дополнительной температурной погрешности при $\Delta t = \pm 10^\circ C$ составит (приведенное значение)

$$\gamma_t = \frac{\Delta U_{см}(\pm 10)}{I_0 \Delta R_{шк}} \cdot 100 = \pm 0{,}6\%\ ,$$

что считается приемлемым для узкопредельного термокомплекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лейтман М.Б.** Нормирующие измерительные преобразователи электрических сигналов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 144 с.
2. **Мамиконян Б.М.** Особенности построения узкопредельных измерителей температуры с использованием термопреобразователей сопротивления // Доклады НАН Армении. - 1999. - ¹ 1. - С.56-63.
3. **Новиков О.П.** Функциональные преобразователи напряжение-ток // Приборы и системы управления. - 1990. - ¹ 7. - С.21-22.
4. **Гутников В.С.** Тенденции развития электронных измерительных преобразователей для датчиков // Приборы и системы управления. -1990. - ¹ 10. - С.32-35.
5. **Парамзин Ю.П., Петров А.Н.** Измерительный преобразователь напряжение- ток с незаземленной нагрузкой // Приборы и системы управления. - 1990. - ¹ 7. - С.19-21.
6. **Гутников В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. - 304 с.
7. **Алексенко А.Г., Коламбет Е.А., Стародуб Г.И.** Применение прецизионных аналоговых микросхем. - М.: Радио и связь, 1985. - 255 с.
8. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. **С.В. Якубовского.**- М.: Радио и связь, 1989. - 496 с.

Гюмрийский образоват. компл. ГИУА. Материал поступил в редакцию 16.01.1999.

Բ.Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Խ.Բ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Ե.Խ.ՆԱԶԱՐՅԱՆ

ԼԱՐՈՒՄ - ՀՈՍԱՆՔ ՉԱՓՈՂԱԿԱՆ ՁԵՎԱՓՈԽԻՉՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կատարված է ներկայումս առավելագույն տարածում գտած հաստատուն հոսանքի կայունարարների համեմատական վերլուծություն, նշված են նրանց առավելություններն ու թերությունները , և գնահատված են չափագիտական բնութագրերը՝ դիմադրական առաջնային ձևափոխիչների չափիչ շղթաների սնման տեսանկյունից: Սինթեզվել է մետաղե ջերմառեզիստորի դիմադրության աճի չափման շղթա, որը տարբերվում է իր պարզությամբ և բարձր չափագիտական ցուցանիշներով:

B.M. MAMIKONYAN, Kh.B. MAMIKONYAN, E.Kh. NAZARYAN

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MEASURING VOLTAGE-TO-CURRENT CONVERTERS

A comparative analysis of the most wide-spread at present direct current regulators is carried out, their advantages and disadvantages are pointed out, the metrological characteristics are evaluated for applying them in power supply of measuring circuits with resistive primary converters. The measuring circuit of resistance increment in metallic temperature - sensitive resistors is synthesized. It is distinguished by simplicity and high metrological indexes.