

Технология уменьшения изменения во времени напряжения стабилизации стабилитронов

В. С. ОРЛОВ

Рассмотрена технология уменьшения временного дрейфа напряжения стабилизации стабилитронов, которая сокращает время их «приработки» и уменьшает амплитуду собственного низкочастотного шума.

The paper presents the method of the time drift decrease of stabilitrans stabilizing voltage which reduces their «running-in» period and the amplitude of the low-frequency noise.

Для передачи размера единицы напряжения постоянного тока от эталона вольта, построенного на эффекте Джозефсона, к хранителю размера единицы — группе нормальных элементов (НЭ) — используют твердотельные меры. Такие меры строят на диодах Зенера (стабилитронах). В высокоточных средствах измерений (СИ) таких, как калибраторы, вольтметры 1-го и 2-го разрядов и других СИ опорное напряжение также получают от стабилитронов.

Высокая стабильность твердотельных мер и опорных источников напряжения обеспечивается как особой технологией изготовления самих стабилитронов, так и их специальной «тренировкой». Специалисты фирмы «DATRON» [1] сводят к минимуму составляющую погрешности стабилитронов, обусловленную временным дрейфом («подсадкой» напряжения стабилизации, дрейфом, деградацией стабилитронов), с помощью системы, в которой одновременно «тренируют» (прирабатывают) четыре тысячи стабилитронов в рабочем режиме. Вначале для каждого диода подбирают такой ток, при котором температурный коэффициент стабилизации напряжения равен нулю, затем диоды в рабочем режиме выдерживаются в течение 4—5 лет (рис. 1). В последние три месяца периодически измеряют напряжение стабилизации каждого стабилитрона, эти данные заносят в долговременную память ЭВМ. Затем по измеренным значениям строят кривые деградации (тренда) и по ним подсчитывают значения $\Delta U \cdot \Delta t$, где Δt — время выдержки стабилитронов в последние три месяца «тренировки». Если изменение напряжения стабилизации ΔU за указанное время тренировки Δt превышает или равно $3 \cdot 10^{-5} U_{ст}$, то такие стабилитроны считаются непригодными для применения в аппаратуре с точными и стабильными во времени метроло-

гическими характеристиками, например в калибраторах 4000 AUTOCAL STANDARD.

К существенным недостаткам этого способа следует отнести длительное время «тренировки». Для сокращения этого времени предлагается ускоренная технология «подсадки» напряжения стабилизации стабилитронов (рис. 2). Диоды в рабочем режиме подвергаются «мягким» термоударам с перепадом внешней температуры порядка $70 \dots 100^\circ\text{C}$. Стабилитроны нагреваются за время $t_1 - t_0$, выдерживаются при этой температуре в течение времени $t_2 - t_1$. Затем следует «мягкий» термоудар охлаждением в течение интервала времени $t_3 - t_2$ (2—5 мин) до комнатной температуры T_0 или несколько более высокой. Диоды далее нагреваются за интервал времени $t_4 - t_3$ до постоянной в течение всего времени «тренировки» температуры T_2 , при которой измеряется напряжение стабилизации стабилитронов. Это время на диаграмме соответствует интервалу $t_5 - t_4$. Измеренные значения напряжения стабилизации каждого стабилитрона заносятся в долговременную память.

Лабораторная установка, на которой проводилось опробование технологии ускоренной «подсадки» напряжения стабилизации диодов Зенера состоит из блока питания, устройства коммутации, измерительного устройства и двух термостатов.

В начале каждого цикла в термостат 1 помещают стабилитроны, через которые протекает постоянный ток. Токозадающие стабильные резисторы помещены в термостат 2, в котором поддерживается на протяжении всего времени приработки диодов постоянная температура $35 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Стабилитроны в термостате 1 нагреваются до $100 \pm 2^\circ\text{C}$, выдерживаются при этой температуре 3—4 ч и затем проводится «мягкий» термоудар. Охлаждение стабилитронов происходит со скоростью $v = (0,25 \dots 0,6) \text{ K/s}$. Затем стабилитроны помещаются в термостат 2, где они выдерживаются при температуре $35 \pm 0,1^\circ\text{C}$ в течение 2—3 ч, после этого измеряют

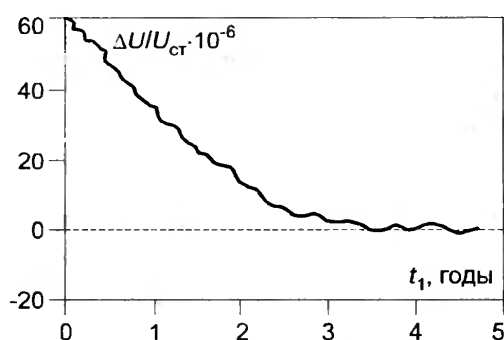


Рис. 1. Эмпирическая кривая тренда напряжения стабилизации стабилитрона, полученная фирмой «DATRON»

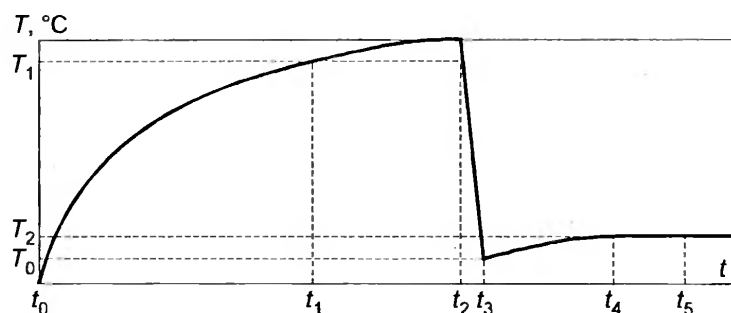


Рис. 2. Диаграмма одного цикла ускоренной временной стабилизации стабилитронов

напряжение стабилизации каждого стабилитрона относительно батареи нормальных элементов (НЭ). Такой цикл длится 8—10 ч.

Результат измерения дифференциальной разности напряжения стабилизации содержит составляющие методической и инструментальной погрешностей, обусловленные погрешностями измерительного прибора класса точности 0,05, в частности цифрового вольтметра Ц31; опорного источника НЭ класса точности 0,001; сопротивлений ключей коммутатора и токозадающих резисторов $R_1, \dots, R_n$, а также нестабильностью источника питания.

Для выявления изменения напряжения стабилизации $U(t)$ достаточно вместо $U_{ст}$ и $\sum U_{нэ i}$ ($U_{ст}$, $U_{нэ i}$ — абсолютное значение напряжения стабилизации диода и ЭДС i -го НЭ) знать отклонение ΔU_i от результата первого измерения ΔU_{j1} .

$$\Delta U_{j1} = \left(\sum_{i=1}^m U_{нэ i} - U_{ст j} \right),$$

где j — порядковый номер стабилитрона; m — количество НЭ.

В соответствии с описанной выше схемой измерения и с учетом всех составляющих погрешностей измерения для i -го диода получим

$$\Delta U_j = \left(\sum_{i=1}^m U_{нэ i} \pm \Delta U_{нэ} \right) - [U_{ст j} - U(t)] \pm \sum_{k=1}^k \Delta U_k, \quad (1)$$

где $\Delta U_{нэ}$ — абсолютная погрешность батареи НЭ; $U(t)$ — напряжение деградации j -го стабилитрона; ΔU_k — перечисленные выше инструментальные погрешности измерения.

Известно, что граница абсолютной погрешности может быть определена в соответствии с [2]:

$$\Delta U_{нэ} = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta U_{нэ i}^2},$$

где принимают $K = 1,1$ при доверительной вероятности $p = 0,95$.

Девияция ЭДС батареи из девяти НЭ, в течение трех месяцев не выходит за пределы ± 10 мкВ, а в течение года за пределы ± 33 мкВ.

Составляющая погрешности, обусловленная изменением сопротивлений замкнутых ключей, несущественна, так как сила входного тока вольтметра Ц31 при измерении напряжения в диапазоне 1 В не превышает 1—2 нА, а изменение сопротивления замкнутого механического ключа $\Delta R \ll 100$ Ом.

Погрешность вольтметра, в основном, состоит из аддитивной составляющей — смещения нулевого уровня и мультипликативной составляющей — изменения наклона характеристики преобразования. Смещением нуля можно пренебречь, так как перед каждым измерением устанавливается нуль. При относительных измерениях дифференциальной разности напряжений в начале шкалы диапазона изменение наклона характеристики преобразования будет значительно меньше, чем в его конце, а соответственно, и мультипликативная составляющая погрешности относительных измерений будет в K_1 раз меньше [3]:

$$K_1 = \Delta A_k / \Delta A_x \approx A_k / A_x,$$

где ΔA_x — изменение наклона характеристики преобразова-

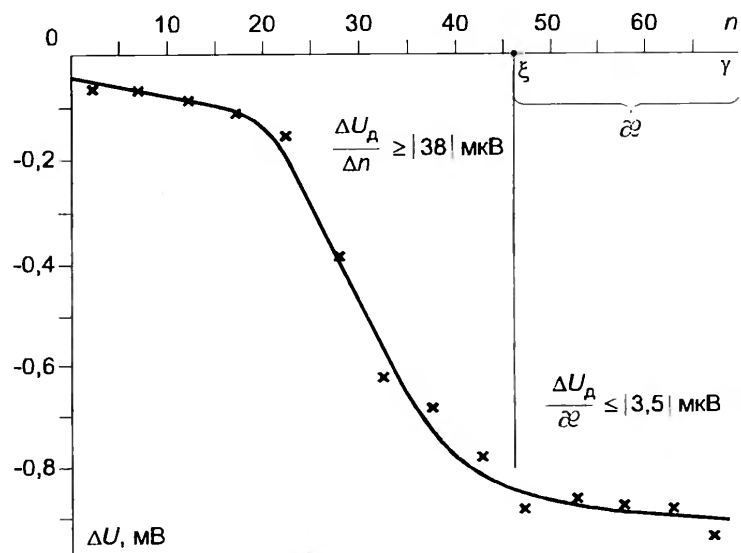


Рис. 3. Типичная эмпирическая кривая тренда напряжения стабилизации стабилитронов (стабилитрон № 18)

ния цифрового вольтметра в конце диапазона измерения; ΔA_x — измерение наклона характеристики преобразования в точке измерения данного диапазона.

Источник питания диодов и токозадающие стабильные резисторы помещены в термостат с постоянной внутренней температурой, которая может изменяться на протяжении всего эксперимента не более, чем на $\pm 0,1$ °C. Тогда составляющая погрешности $\sum \Delta U_k$ равенства (1) будет несущественна в сравнении с «подсадкой» напряжения стабилизации диодов за время активной «тренировки». Уравнение (1) упростится и будет иметь вид

$$\Delta U_j = \sum_{i=1}^m U_{нэ i} - [U_{ст j} - U(t)].$$

Последовательность измеренных значений ΔU_j после γ термоциклов математически фильтруется. Линейная фильтрация последовательности эмпирических данных ΔU_j каждого стабилитрона выполняется в соответствии с системой уравнений, приведенной в [4].

В связи с тем, что деградация стабилитронов происходит очень медленно, последовательность фильтрованных данных целесообразно разбить на k групп по пять—семь значений ΔU_{ji} в группе и для каждой группы найти среднее значение $\overline{\Delta U_{jk}}$. По найденным значениям строят эмпирические кривые тренда каждого стабилитрона (рис. 3), где по оси абсцисс откладывают количество проведенных термоциклов n , а по оси ординат — вычисленные значения напряжения деградации диодов

$$\Delta U_{dj} = \Delta U_{j1} - \overline{\Delta U_{jk}}.$$

Линейная фильтрация несколько сглаживает кривую тренда в области перехода к установившемуся режиму. Вблизи установившегося режима линейная фильтрация сглаживает высокочастотный шум. В установившемся режиме по построенным кривым тренда находят наклон кривой деградации стабилитрона

$$\Delta \overline{U}_j = (\Delta \overline{U}_{д\gamma} - \Delta \overline{U}_{д\kappa}) / \kappa = \Delta U_d / \kappa,$$

где $\Delta \overline{U}_{д\gamma}$, $\Delta \overline{U}_{д\kappa}$ — приращения напряжения j -го диода, отсчитанные по кривой тренда на оси ординат вблизи устано-

вившегося режима деградации; $\kappa = \gamma - \xi$ — количество термоциклов, отсчитанное от цикла, где кривая тренда начала изменяться практически линейно, до конечного цикла γ .

Стабилитроны, у которых $\Delta \bar{U}_j \in [3,0 \dots 3,5]$ мкВ за один цикл, можно использовать в высокостабильных устройствах.

По описанной технологии было проведено ускоренное старение двух партий стабилитронов КС191Ф.

Первая партия состояла из 24 стабилитронов, которые подвергались 56 термоциклам, из них восемь диодов имели минимальный временной дрейф. Вторая партия включала 46 стабилитронов и 11 контрольных. Было выполнено 70 термоциклов ускоренного старения. После обработки результатов измерения и построения кривых тренда для каждого стабилитрона полученные данные сведены в таблицу.

Контрольные стабилитроны выдерживали в рабочем режиме при внешней температуре $35 \pm 0,1$ °С на протяжении всего эксперимента. Напряжение стабилизации у большей части контрольной партии диодов изменялось по закону,

близкому к линейному. Средняя скорость изменения напряжения стабилизации составила 6—10 мкВ за 9—10 ч. У двух стабилитронов, а именно у первого и шестого, за первые 16—20 дней работы напряжение стабилизации возросло соответственно на 0,5 и 0,25 мВ, а затем, после достижения некоторого максимума наблюдалось уменьшение напряжения стабилизации. При этом ни у одного стабилитрона кривая деградации не содержала участка, который можно было бы отнести к установившемуся режиму.

Знак минус перед $\Delta \bar{U}_j$ указывает на то, что напряжение стабилизации стабилитронов со временем уменьшается, что согласуется с данными, приведенными фирмой «DATRON» (см. рис. 1).

Выход годных стабилитронов после активной приработки для производства высокоточной и стабильной аппаратуры составил около 50 %. Поэтому можно утверждать, что увеличение количества термоциклов до 80—100 повысит выход стабилитронов с минимальным изменением во времени напряжения стабилизации.

После активной приработки практически все стабилитроны за исключением отдельных экземпляров можно использовать при производстве электронной аппаратуры.

На рис. 3 показана типичная кривая тренда стабилитрона с данными из таблицы, у которого вблизи установившегося режима тренд составил менее 3,5 мкВ за один цикл и который использовали в двухполюсном стабилизаторе силы тока [5, 6]. Исследование в течение полугода характеристики стабильности силы тока показало, что интегральная погрешность не вышла за пределы $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ %.

Предложенная технология позволяет значительно сократить в сравнении с известной [1] время приработки стабилитронов, построить для каждого стабилитрона кривую тренда, отобрать стабилитроны с минимальным значением напряжения деградации, прогнозировать временной дрейф напряжения стабилизации на более длительный период времени 5000—10000 ч. Кроме того, при исследовании шумовых свойств опорного источника силы тока [5—7] было замечено, что такая «тренировка» как минимум на порядок уменьшает амплитуду низкочастотного собственного шума стабилитрона в полосе 0,001—10 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Материалы** семинара фирмы «DATRON»: 4000 AUTOCAL STANDARD. Programmable multifunction precision calibrate. — «DATRON», Electronics Ltd. — P. 3, fig. 2.
2. **ГОСТ 8.207—76.** ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдения.
3. **Орнатский П. П.** Теоретические основы информационно-измерительной техники. — Киев: Вища школа, 1976. — С. 332.
4. **Румшинский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — С. 104.
5. **А. с. 664161 СССР** / А. А. Брагин, В. С. Орлов // Бюл. изобрет. — 1979. — № 19.
6. **Орлов В. С.** // Проблемы контроля параметров и создание КИА для быстродействующих БИС преобразователей информации: Тез. докл. — Вильнюс, 1984. — С. 37.
7. **А. с. 1398099 СССР** / А. А. Брагин и др. // Бюл. изобрет. — 1988. — № 19.

Порядковый номер стабилитрона	Максимальная деградация $-\Delta U_{\Delta}$, мВ	Крутой участок кривой деградации $\Delta U_{\Delta} / \Delta t$, мкВ	Установившийся режим $-\Delta \bar{U}_j$, мкВ
1	0,80	44	8,0
2	1,37	13	3,0
3	1,17	23	15,0
4	1,08	33	13,0
5	0,85	23	9,0
6	0,46	21	4,0
7	0,26	9	1,7
8	1,25	28	2,8
9	0,41	22	3,7
10	0,49	20	3,6
11	0,62	19	4,5
12	0,90	19	5,0
13	0,48	14	5,0
14	0,42	28	4,0
15	0,91	25	3,0
16	0,93	40	3,0
17	0,80	25	4,0
18	0,88	37	3,5
19	0,51	25	3,5
20	0,78	32	5,0
21	1,51	68	12,0
22	0,67	27	2,0
23	0,57	37	2,5
24	0,40	21	2,5
25	0,87	25	3,0
26	0,57	30	3,0
27	0,65	30	8,0
28	0,97	29	3,5
29	0,92	19	3,0
30	0,49	50	3,5
31	0,58	40	4,0
32	0,92	45	3,5
33	0,93	33	3,5
34	1,10	36	4,5
35	0,91	20	2,5
36	0,97	36	3,0
37	1,13	50	7,5
38	0,52	26	2,5
39	1,03	40	4,5
40	0,62	18	3,0
41	0,69	22	3,0
42	0,80	37	3,0
43	1,15	50	7,0
44	0,74	45	2,0
45	0,57	20	2,0
46	9,32	263	30,0