

УДК 621.316.722.1:621.3.027.58

## АКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ

© 2024 г. А. И. Сергеев<sup>а</sup>

*<sup>а</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина  
Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
e-mail: aistkot@bk.ru*

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 05.02.2024 г.

Принята к публикации 18.02.2024 г.

Описаны работа и результаты испытаний действующего макета высоковольтного источника питания с активным подавлением пульсаций выходного напряжения. Частота задающего генератора источника 90 кГц, величина емкостей диодно-емкостной схемы умножения 10 нФ. Испытания устройства проведены при выходном напряжении 1 кВ и токе нагрузки 1 мА. Указаны настройки, с помощью которых достигнута амплитуда пульсаций выходного напряжения от пика до пика не превышает 150 мкВ при выходном сопротивлении источника по постоянному току не более 20 кОм.

DOI: 10.31857/S0032816224060077 EDN: ELGZYS

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Амплитуда пульсаций выходного напряжения является важной характеристикой высоковольтных источников питания блоков детектирования ионизирующего излучения (ИИ). Обычно такие источники напряжения имеют в своем составе генератор сигналов, высокочастотный трансформатор и диодно-емкостную схему умножения напряжения. Амплитуда пульсаций выходного напряжения обратно пропорциональна частоте генератора и величине емкостей схемы умножения. В работе [1] описан высоковольтный источник питания блоков детектирования ИИ. Для обеспечения малой амплитуды пульсаций частота генератора выбрана в интервале от 80 до 150 кГц, а величина емкостей схемы умножения — 100 нФ. На выходе схемы умножения использован сглаживающий  $R-C-R-C$ -фильтр. Амплитуда пульсаций выходного напряжения источника от пика до пика не превышает 1 мВ при выходной мощности от 0.5 до 1.5 Вт и часто-

те генератора 100 кГц. Выходное сопротивление источника по постоянному току составляет 23 кОм.

Обеспечить малую амплитуду пульсаций можно путем их подавления сигналами противоположной полярности. В работе [2] описан источник питания с незаземленной вторичной обмоткой повышающего трансформатора. Точка соединения вторичной обмотки и “вывода низкого потенциала схемы умножения” подключена к выходу источника “компенсирующего напряжения”. Это напряжение формируется в результате сравнения сигналов с выхода схемы умножения источника высокого напряжения и выхода внутреннего источника эталонного напряжения. На выходе схемы умножения использован сглаживающий  $R-C-R-C$ -фильтр. Емкости конденсаторов схемы умножения (на четыре) относительно невелики — две емкости 15 нФ и две 3.3 нФ. Амплитуда пульсации выходного напряжения при частоте генератора

110 кГц и максимальном токе нагрузки 1 мА не превышает 3.3 мВ. Выходное сопротивление источника по постоянному току 220 кОм.

Ниже описаны работа и результаты испытаний действующего макета высоковольтного источника напряжения с заземленной вторичной обмоткой трансформатора и активным подавлением пульсаций выходного напряжения.

Основное внимание уделено вопросу уменьшения амплитуды пульсаций выходного напряжения источника, поэтому не рассматриваются возможная схемотехника установки и стабилизация величины выходного напряжения источника.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Схема источника питания с заземленной вторичной обмоткой трансформатора показана на рис. 1. На схеме буквой "G" обозначен генератор синусоидальных колебаний ГЗ-118.

Частота выходных сигналов генератора составляет 90 кГц. Регулировка выходного напряжения ручная;  $T$  — малогабаритный ферритовый трансформатор с Ш-образным сердечником. Все конденсаторы — высоковольтные керамические Hitano KF3F103Z-L016BD15.5

с допуском  $Z$  ( $-20...+80\%$ ). Емкости имеют следующие значения:  $C_6 = 20$  нФ, остальные — по 10 нФ. Используются диоды UF4007 ( $D_1-D_4$ ). Сопротивления имеют следующие значения:  $R_1 = 150$  Ом;  $R_3, R_7 = 1$  кОм;  $R_4 = 560$  Ом;  $R_5 = 68$  кОм;  $R_2^*$  и  $R_6^*$  — переменные сопротивления. Эти сопротивления имеют тип С2-29 или МЛТ 0.125 с допуском 5%. Используются операционные усилители (ОУ) ADA4817, корпус soic 8 [3].

Из доступных высокочастотных ОУ эти усилители имеют минимальное время задержки сигнала, что в данном случае имеет решающее значение для обеспечения устойчивости устройства. Питание ОУ двухполярное (+5 В и −5 В).

Уменьшение амплитуды пульсаций выходного напряжения достигается их подавлением сигналами противоположной полярности.

Работа схемы на рис. 1 аналогична работе основной инвертирующей схемы включения ОУ, где возмущение на инвертирующем входе ОУ, вызванное внешним сигналом, подавляется сигналом обратной связи с выхода ОУ. Чем больше собственный коэффициент усиления ОУ и коэффициент усиления основной инвертирующей схемы включения, тем сильнее подавляется возмущение на инвертирующем входе ОУ.

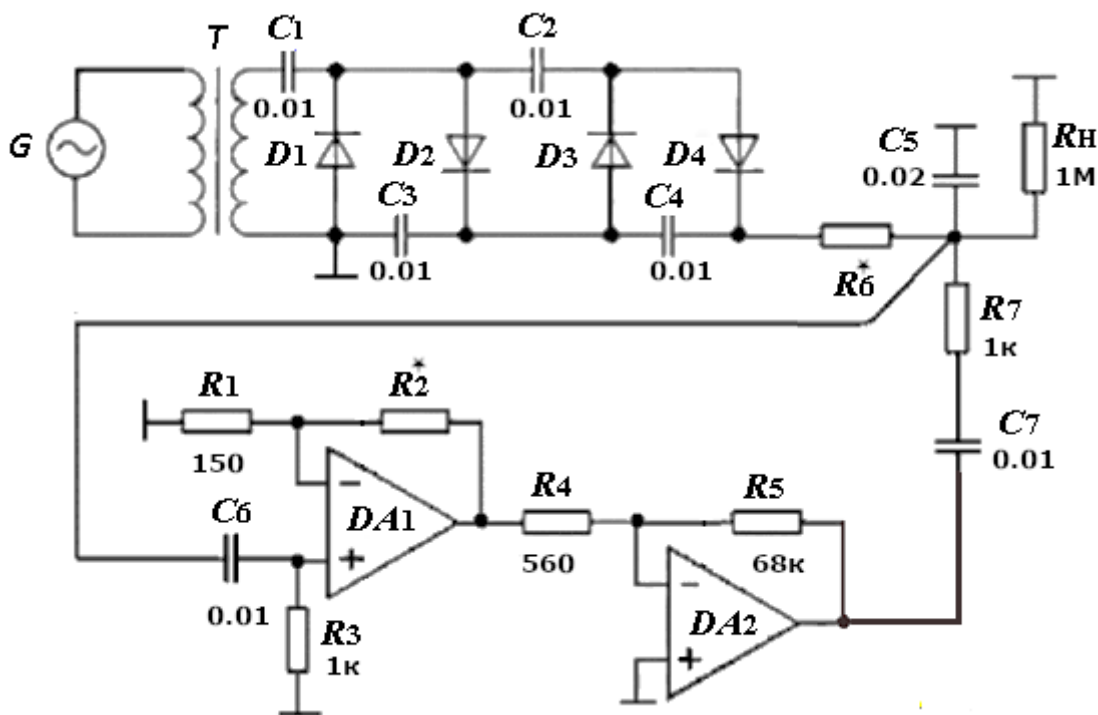


Рис. 1. Схема источника напряжения с заземленной вторичной обмоткой трансформатора и активным подавлением пульсаций.

Напряжение с выхода схемы умножения через сопротивление  $R_6$  поступает на выход устройства. Переменная составляющая выходного сигнала (пульсации) выделяется дифференцирующей цепью  $C_6 R_3$ , усиливается со сменой полярности и поступает на выход устройства через цепь  $C_7 R_7$ . Усиление двухкаскадное. Первый каскад усиления на основе ОУ  $DA_1$  в неинвертирующем включении с высоким входным сопротивлением, второй каскад на основе ОУ  $DA_2$  в инвертирующем включении.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Все измерения проводились двухлучевым аналоговым электронным осциллографом (ЭО). Погрешность таких измерений обычно принимается равной 10%. Амплитуда пульсаций напряжения измерялась от пика до пика. Горизонтальная чувствительность ЭО для приведенных ниже осциллограмм равна 5 мкс/дел.

Для оценки эффективности описанной схемотехники предварительно без применения активного подавления пульсаций измерялась их амплитуда на выходе схемы умножения и на выходе интегрирующей цепи  $R_6 C_5$ , нагруженных на сопротивление 1 МОм при напряжении 1 кВ.

При измерении амплитуды пульсаций на выходе схемы умножения разрывалась связь между ее выходом и сопротивлением  $R_6$ .

Для измерения использовался широкополосный делитель напряжения с коэффициентом деления ( $K_{\text{дел}}$ ) 100 : 1 (1 МОм, 200 пФ : 10 кОм, 20 нФ), который и являлся нагрузкой. Сопротивление входа делителя относительно земли  $R_{\text{дел}} = 1.01$  МОм. Постоянная составляющая напряжения на выходе делителя, равная 10.1 В, устанавливалось при открытом входе ЭО (гальваническая связь). На рис. 2 верхняя осциллограмма — это первый канал ЭО (сигнал на выходе генератора), чувствительность ЭО по вертикали равна 10 В/дел, двойная амплитуда синусоидального сигнала 19 В; нижняя осциллограмма — это второй канал ЭО, закрытый вход ЭО (емкостная связь) — пульсации выходного напряжения схемы умножения. Пульсации имеют импульсную форму. Амплитуда пульсаций с учетом  $K_{\text{дел}}$  и вертикальной чувствительности ЭО 20 мВ/дел равна 4.3 В.

При измерении амплитуды пульсаций на выходе интегрирующей цепи  $R_6 C_5$  эта цепь подключалась к выходу схемы умножения. Нагрузкой служил указанный выше делитель напряжения. Выходное напряжение делителя равно 10.1 В. Элементы схемы  $C_7$ ,  $R_7$  и  $R_8$  отключены от выхода интегрирующей цепи  $R_6 C_5$ . Сопротивление  $R_6 = 1.8$  кОм, емкость  $C_5 = 20$  нФ. Амплитуда пульсаций с учетом  $K_{\text{дел}}$  и вертикальной чувствительности ЭО В/дел равна 400 мВ, что в 10.75 раза меньше, чем в предыдущем эксперименте.

Испытания источника напряжения по схеме рис. 1 с активным подавлением пульсаций проведены также при нагрузке  $R_{\text{н}} = 1$  МОм и выходном напряжении  $U_{\text{вых}} = 1$  кВ.

Амплитуда пульсаций выходного напряжения зависит как от общего усиления обоих каскадов, так и от соотношения между сопротивлениями  $R_6$  и  $R_7$ . Коэффициент усиления второго каскада  $K_{\text{ус2}} = 121.4$ , он выбирался экспериментально. Изменение общего коэффициента усиления обоих каскадов осуществлялось изменением величины сопротивления обратной связи  $R_2$  первого каскада, т.е. изменением  $K_{\text{ус1}}$ , а изменение соотношения между сопротивлениями  $R$  и  $R_7$  — изменением  $R_6$ . Амплитуда пульсаций, уменьшается при увеличении как  $K_{\text{ус1}}$ , так и сопротивления  $R_6$ .

Измерение зависимости амплитуды пульсаций от величины  $K_{\text{ус1}}$  проводилась при сопротивлении  $R_6 = 1.8$  кОм. Установлено, что при  $R_2 = 560$  Ом и  $K_{\text{ус1}} = 4.8$  амплитуда пульсаций равна 3.1 мВ, при  $R_2 = 1.35$  кОм и  $K_{\text{ус1}} = 10.0$  амплитуда пуль-

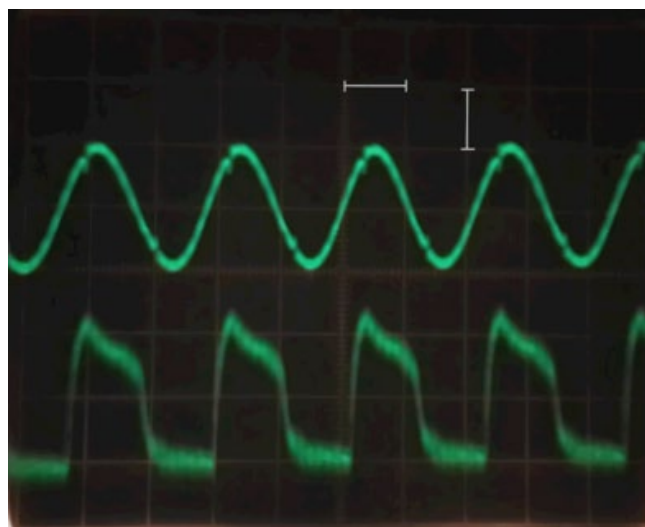


Рис. 2. Осциллограммы сигналов на выходе генератора и выходе схемы умножения.

саций равна 1.8 мВ, при  $R_2 = 2.1$  кОм и  $K_{ycl} = 15.0$  амплитуда пульсаций равна 1.3 мВ.

На рис. 3 верхняя осциллограмма (первый канал ЭО) — это сигнал на выходе ОУ  $DA_2$ , чувствительность ЭО по вертикали равна 1 В/дел, амплитуда сигнала равна 2.4 В; нижняя осциллограмма (второй канал ЭО) — это сигнал на входе ОУ  $DA_1$  (пульсации выходного напряжения устройства), чувствительность ЭО по вертикали равна 1 мВ/дел,  $K_{ycl} = 15.0$ , пульсации напряжения имеют импульсную форму с амплитудой 1.3 мВ.

Импульсная форма пульсаций выходного напряжения объясняется следующим. Максимальный размах переменного напряжения в устройстве наблюдается между выходом схемы умножения и выходом ОУ  $DA_2$ . Поэтому значительная часть переменной составляющей выходного тока схемы умножения протекает через сопротивление  $R_7$ , создавая на нем падение напряжения импульсной формы.

Дальнейшее значительное увеличение  $K_{ycl}$  приводит к потере устойчивости устройства. Наблюдается генерация в мегагерцевой области. Следует отметить, что устройство, несмотря на свою простоту и малые размеры, весьма критично к монтажу. Требуется либо планарный монтаж, либо приближенный к нему (испытания проводились именно в таком случае). С учетом высокой частоты единичного усиления и малой задержки ОУ ADA4817 возможной причиной генерации могут являться погрешности монтажа и, как следствие, паразитные связи.

Измерение зависимости амплитуды пульсаций от величины сопротивления  $R_6$  проводилось при  $K_{ycl} = 15$ . Для измерения амплитуды пульсаций величиной менее 1.0 мВ второй канал ЭО подключался к выходу первого каскада усиления. Амплитуда пульсаций определялась с учетом коэффициента усиления первого каскада  $K_{ycl}$  и чувствительности (В/дел) второго канала ЭО по вертикали  $K_{ycl} = 15$ . Установлено, что при  $R_6 = 1.8$  кОм амплитуда пульсаций равна 1.3 мВ,

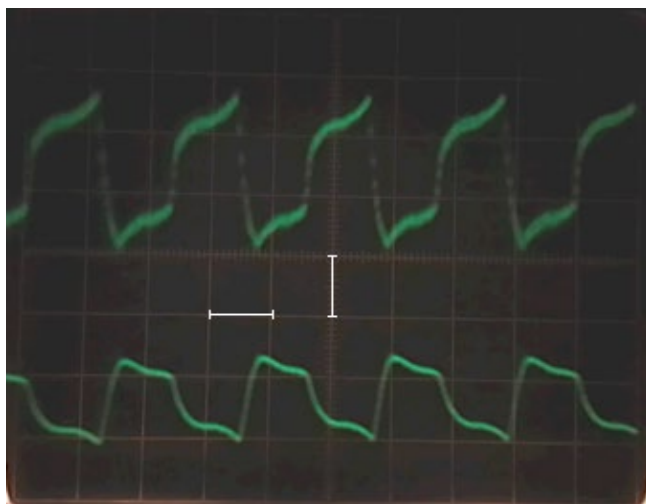


Рис. 3. Осциллограммы сигналов на выходе ОУ  $DA_2$  и на входе ОУ  $DA_1$ .

при  $R_6 = 5.6$  кОм амплитуда пульсаций равна 450 мкВ, при  $R_6 = 17$  кОм амплитуда пульсаций равна 130 мкВ.

#### 4. ВЫВОДЫ

Описанное схемотехническое решение активного подавления пульсаций позволяет эффективно уменьшить амплитуду этих пульсаций без использования конденсаторов большой емкости в диодно-емкостных схемах умножения с выходными сглаживающими  $R-C-R-C$ -фильтрами, имеющими большую постоянную времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюх А.Г., Кононенко Г.А., Саламатин А.В., Середы Ю.М. Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022. [http://www1.jinr.ru/Preprints/2022/033\(P13-2022-33\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2022/033(P13-2022-33).pdf)
2. Колобов В.В., Баранник М.Б. // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 15. <https://doi.org/10.31857/S0032816221050219>
3. Операционный усилитель ADA4817. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/254592/AD/ADA4817-1.html>