

Подавление пульсаций выходного напряжения высоковольтного источника питания блоков детектирования ионизирующего излучения

Описана работа и результаты испытаний действующего макета высоковольтного источника питания блоков детектирования ионизирующего излучения с активным подавлением пульсаций выходного напряжения. Экспериментально исследовано совместное влияние сглаживающего RC-фильтра и цепи активного подавления пульсаций на величину их амплитуды. Испытания устройства проведены при выходном напряжении 1 кВ и токе нагрузки 1 мА. Достигнутая минимальная амплитуда пульсаций от пика до пика не превышает 1мВ.

Ключевые слова: источник напряжения, высоковольтный, схема умножения, пульсации напряжения, фильтрация, операционный усилитель, обратная связь, компенсирующий сигнал, активное подавление.

А.И.Сергеев

(Уральский Федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

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 кГц 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 Вт до 1,5 Вт и частоте генератора 100 кГц.

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 описана работа и результаты испытаний действующего макета высоковольтного источника напряжения с незаземленной вторичной обмоткой трансформатора и активным подавлением пульсаций выходного напряжения. Компенсирующий сигнал для подавления пульсаций формируется путем выделения переменной составляющей выходного напряжения с последующим ее усилением и инверсией.

В статье основное внимание уделено вопросу исследования влияния сглаживающего RC-фильтра и коэффициента усиления в цепи отрицательной обратной связи подавления пульсаций на величину их амплитуды, поэтому не рассматривается возможная схемотехника установки и стабилизация величины выходного напряжения источника.

Электрическая схема и принцип действия

Схема источника питания с незаземленной вторичной обмоткой трансформатора показана на рис.1. На схеме: G – генератор синусоидальных колебаний ГЗ-118. Частота выходных сигналов генератора – 90 кГц. Регулировка выходного напряжения ручная. Т – малогабаритный ферритовый трансформатор с Ш-образным сердечником. Все конденсаторы высоковольтные керамические KF3F103Z-L016BD 15,5 Hitano с допуском Z (-20%...+80%). Емкости: C1-C4, C5, C7 = 10 нФ, C6 = 50 нФ. Диоды: D1-D4 UF4007. Сопротивления: R1 = 150 Ом, R3 = 1 кОм; R4 = 560 Ом, R5 = 62 кОм. Сопротивления типа МЛТ 0,125 с допуском 5%. Сопротивления R2* и R6* – переменные. Операционные усилители (ОУ): DA1 и DA2 ADA4817 (корпус – soic 8) [3], DA3 BUF634T [4]. Из доступных высокочастотных ОУ усилители ADA4817 имеют

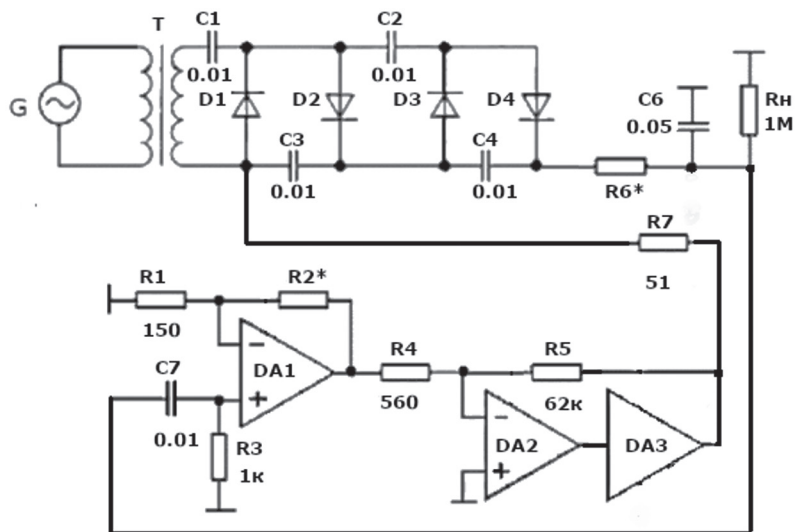


Рис.1. Схема источника напряжения с незаземленной вторичной обмоткой трансформатора и активным подавлением пульсаций.

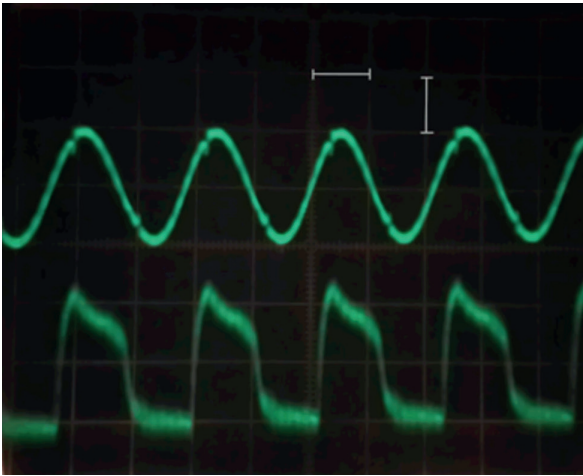


Рис.2. Осциллограммы сигналов на выходе генератора и выходе схемы умножения.

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.

Напряжение с выхода схемы умножения через сопротивление R6 поступает на выход устройства. Переменная составляющая выходного сигнала (пульсации) выделяется дифференцирующей цепью C7R3, усиливается со сменой полярности и с выхода буфера AD3 поступает на вторичную обмотку трансформатора. Усиление двухкаскадное. Первый каскад

усиления на основе ОУ DA1 в неинвертирующем включении с высоким входным сопротивлением. Второй каскад на основе ОУ DA2 в инвертирующем включении.

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 5 мкс/дел.

1. Измерение амплитуды пульсаций на выходе схемы умножения. Связь между выходом схемы умножения и сопротивлением R6 разорвана. Выход ОУ DA2 отключен от вторичной обмотки трансформатора. Эта обмотка заземлена в точке соединения D1 и C3. Данное измерение проведено для последующего сравнения полученных результатов.

Для измерения использовался широкополосный делитель напряжения с коэффициентом деления (Кдел) 100:1 (1 МОм, 200 пФ : 10 кОм, 20 нФ), который и являлся нагрузкой. Сопротивление входа делителя относительно земли $R_{дел} = 1,01$ МОм. Постоянное напряжение на выходе делителя, равное 10,1 В, устанавливалось при открытом входе ЭО (гальваническая связь). На рис.2: верхний луч – 1-й канал ЭО – сигнал на выходе генератора. Чувствительность ЭО по вертикали 10 В/дел. Двойная амплитуда синусоидального сигнала 19 В. Нижний луч – 2-й канал ЭО – закрытый вход ЭО (емкостная связь) – пульсации выходного напряжения схемы умножения.

Табл.1.

R6 [кОм]	8,0	16,0	26,5	36	69	110
Амплитуда пульсаций [мВ]	5,4	4,8	4,4	4,0	3,0	2,1

Табл.2.

R2 [кОм]	0,98	1,3	1,82	2,49	3,3	4,7
$K_{ус1}$	7,5	9,7	13,2	17,7	23	32,3
Амплитуда пульсаций [мВ]	2,1	1,85	10,6	1,28	1,9	0,78

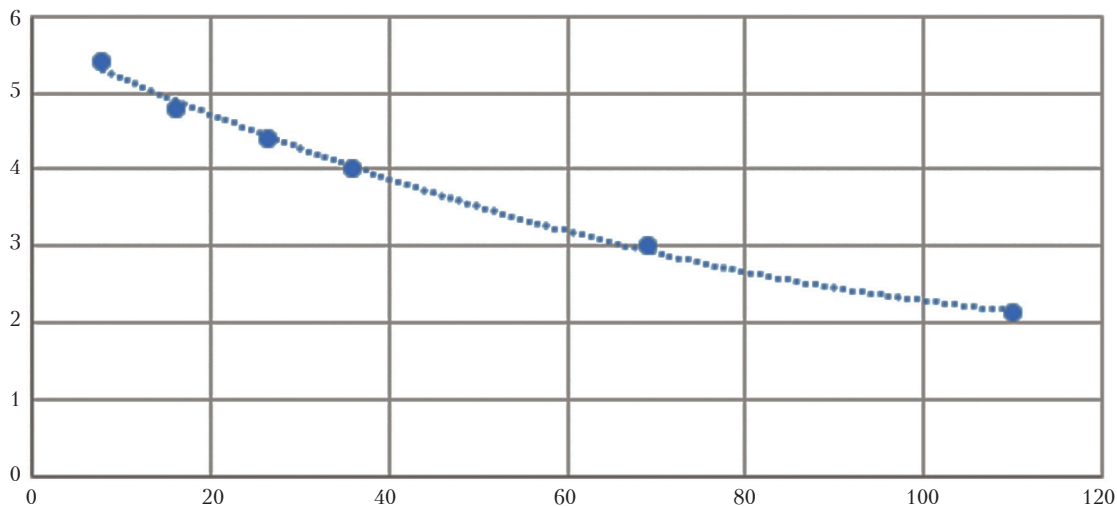


Рис.3. График зависимости амплитуды пульсаций (размерность «мВ» на вертикальной оси) от величины сопротивления R_6 (размерность «кОм» на горизонтальной оси).

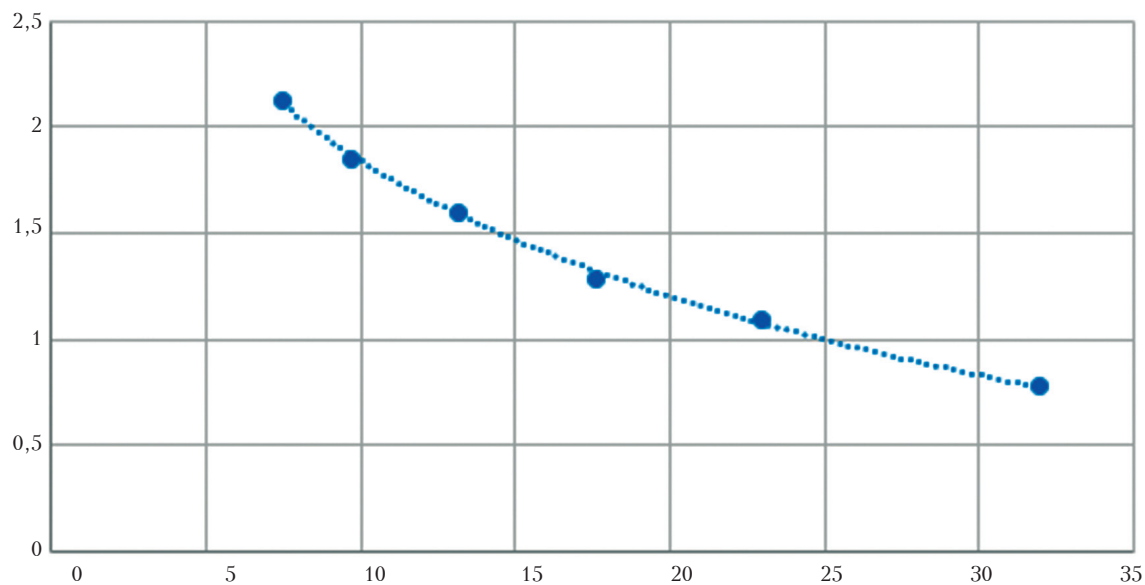


Рис.4. График зависимости амплитуды пульсаций (размерность «мВ» на вертикальной оси) от величины $K_{ус1}$ (размерность – «разы» на горизонтальной оси).

Пульсации импульсной формы. Амплитуда пульсаций, с учетом Кдел и вертикальной чувствительности ЭО, равной 20 мВ/дел, составляет 4,3 В.

2. Измерения пульсаций выходного напряжения источника напряжения схемы (рис.1). $U_{вых} = 1$ кВ, $R_n = 1$ МОм. Амплитуда пульсаций выходного напряжения зависит как от общего усиления обоих каскадов, так и от величины постоянной времени интегрирующей цепи R_6C_6 . Коэффициент усиления второго каскада $K_{ус2} = 110$ и выбирался экспериментально. Изменение общего коэффициента усиления обоих каскадов производилось изменением величины сопротивления обратной связи R_2 первого каскада, т. е. изменением $K_{ус1}$, а изменение постоянной времени цепи R_6C_6 изменением R_6 . Амплитуда пульсаций уменьшается как при увеличении $K_{ус1}$, так и при увеличении сопротивления R_6 .

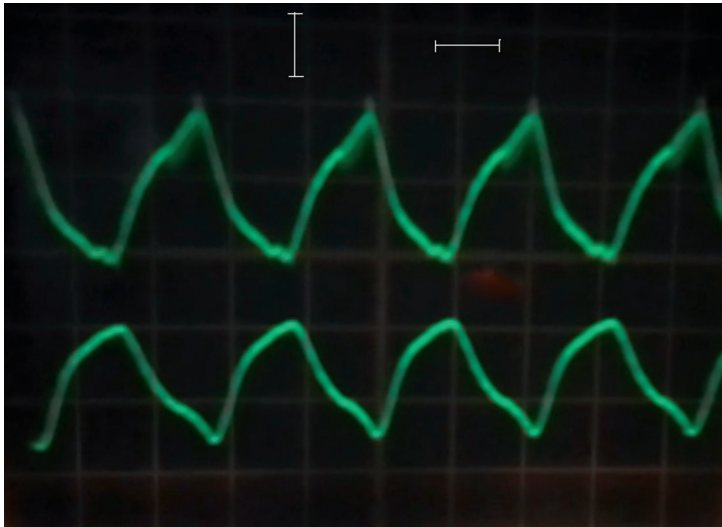


Рис.5. Оциллограммы сигналов на выходе ОУ DA2 и выходе ОУ DA1.

Увеличение $K_{ус1}$ выше максимального, указанного в таблице, приводит к потере устойчивости устройства и наблюдается генерация в мегагерцовой области. Возможно, что при этом не хватает запаса устойчивости по усилению. Кроме того, следует отметить, что устройство, несмотря на малые размеры и относительную простоту, весьма критично к монтажу. Требуется либо планарный монтаж, либо приближенный к нему, при котором и проводились испытания. С учетом высокой частоты единичного ОУ ADA4817, возможной причиной генерации могут являться погрешности монтажа и, как следствие, наличие паразитных связей. Выяснение указанных причин требует отдельных исследований и поэтому не входит в статью.

На рис. 3 и 4 показаны графики значений амплитуды пульсаций соответственно от величины R_6 и $K_{ус1}$. Графики построены с использованием программы Excel 2016.

На рис.5 показаны типовые оциллограммы сигналов на выходе ОУ DA2 и входе ОУ DA1: верхний луч (1-й канал ЭО) – сигнал на выходе ОУ DA2. Чувствительность ЭО по вертикали 1 В/дел. Амплитуда сигнала 1,8 В. Нижний луч (2-й канал ЭО) – сигнал на выходе ОУ DA1 (усиленные пульсации выходного напряжения устройства). Чувствительность ЭО по вертикали 10 мВ/дел. $K_{ус1} = 7,5$. Амплитуда пульсаций с учетом $K_{ус1}$ равна 2,13 В.

Вывод

Экспериментально исследовано совместное влияние сглаживающего RC-фильтра и коэффициента усиления в цепи обратной связи подавления пульсаций на величину их амплитуды. Достигнуто уменьшение амплитуды пульсаций выходного напряжения более чем в 2000 раз.

Итоговые результаты испытаний представлены в табл.1 и 2 и графиками на рис. 3 и 4.

В табл.1 показана зависимость амплитуды пульсаций при изменении сопротивления R_6 . Условия измерения:

$$R_2 = 980 \text{ Ом},$$

$$C_6 = 50 \text{ нФ},$$

$$K_{ус1} = 7,5.$$

В табл.2 показана зависимость амплитуды пульсаций при изменении $K_{ус1}$. Условия измерения:

$$R_6 = 110 \text{ кОм},$$

$$C_6 = 50 \text{ нФ}.$$

Литература

1. Артюх А.Г., Кононенко Г.А., Саламатин А.В., Серeda Ю.М. Прецизионные источники высокого напряжения для детекторов ядерного излучения на трансформаторах POL-12012 (KST-POL-12012). Препринт «Объединенного института ядерных исследований». Дубна, 2022. URL: [http://www1.jinr.ru/Preprints/2022/033\(P13-2022-33\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2022/033(P13-2022-33).pdf) (дата обращения: 17.04.2024).
2. Колобов В.В., Баранник М.Б. Прецизионный малошумящий источник высокого напряжения // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 15-24.
3. Операционный усилитель ADA4817. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/254592/AD/ADA4817-1.html> (дата обращения: 20.03.2024).
4. Буфер BUF634T. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/248/DOC000248423.pdf> (дата обращения: 19.03.2024).

Output Voltage Ripple Suppression of High Voltage Power Supply for Ionising Radiation Detection Units

Sergeev Alexandr (Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia)

Abstract. Operation and results of tests of operating model of high-voltage power supply of ionizing radiation detection units with active suppression of output voltage pulsations are described. The joint effect of the smoothing RC-filter and the circuit of active pulsation suppression on the value of their amplitude was experimentally investigated. The device was tested at an output voltage of 1 kV and a load current of 1 mA. The minimum peak-to-peak ripple amplitude achieved does not exceed 1mV.

Keywords: voltage source, high voltage, multiplication circuit, voltage ripple, filtering, operational amplifier, feedback, compensating signal, active suppression.

А.И.Сергеев (к.т.н., доцент)

Уральский Федеральный университет имени Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург

Контакты: тел. +7 912 283-63-18, e-mail: aiseas@bk.ru