

УДК 621.317

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ
И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ
КАНАЛА ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ
ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА
С ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ 500 МГц**

А.А. Белобородов, А.В. Клеопин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
beloborodov@vniiftri.ru,
kleopin@vniiftri.ru*

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос разработки усилителя вертикального отклонения цифрового осциллографа, создана электрическая схема блока.

Ключевые слова: усилитель вертикального отклонения, схема, цифровой осциллограф.

**DEVELOPMENT OF A LINE CIRCUIT AND RESULTS
OF SIMULATION OF THE AMPLIFIER OF THE VERTICAL
DEFLECTION CHANNEL OF A DIGITAL OSCILLOGRAPH
WITH A BANDWIDTH OF 500 MHz**

A.A. Beloborodov, A.V. Kleopin

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
beloborodov@vniiftri.ru,
kleopin@vniiftri.ru*

Annotation. The article discusses the issue of developing a vertical deflection amplifier for a digital oscilloscope, an electrical circuit of the unit is created.

Key words: vertical deflection amplifier, circuit, digital oscilloscope.

В настоящее время в связи с развитием высокоскоростных сетей связи большую потребность имеют средства измерений характеристик цифровых сигналов. Основными из них являются цифровые осциллографы, которые обеспечивают широкие возможности по цифровой обработке сигналов, математическому преобразованию и спектральному анализу с помощью быстрого преобразования Фурье. Производство цифровых осциллографов в Российской Федерации находится на этапе становления. Выпускаемые приборы зачастую являются приборами, собранными по лицензии иностранных компаний. Полностью отечественные разработки на данный момент имеют малый частотный диапазон до 350 МГц.

В данной работе рассмотрен вопрос, посвящённый разработке блока усилителя (БУ) вертикального отклонения цифрового осциллографа. Основное назначение БУ — придание входному аналоговому сигналу характеристик, позволяющих максимально точно его оцифровать с помощью АЦП. В общем случае БУ представляет собой набор аттенуаторов, усилителей и пассивных элементов.

На основе анализа зарубежной литературы был выбран современный вариант реализации БУ, основанный на интегральной схеме дифференциального усилителя Texas Instruments [1].

Необходимое входное сопротивление БУ должно составлять 50 Ом. Исходя из этого, рассчитывались сопротивления аттенуаторов, предназначенных для регулировки коэффициентов отклонения осциллографа. В связи с необходимостью обеспечить измерения сигналов с амплитудой до 10 В были выбраны ослабления аттенуаторов в 10 и 4 раза. На рис. 1 представлена электрическая схема реализации аттенуаторов.

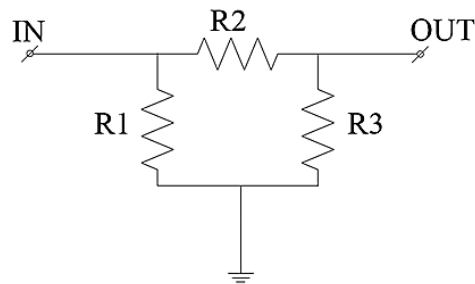


Рис. 1. Электрическая схема аттенуатора

Сопротивление резисторов R_1 и R_3 , образующих аттенуаторы, рассчитано по формуле:

$$R_{1,3} = Z_0 \cdot \frac{1+1/k}{1-1/k}, \quad (1)$$

где Z_0 — нагрузка (50 Ом); k — коэффициент ослабления.

Значение R_2 рассчитано на основании ранее полученных сопротивлений R_1 и R_3 :

$$R_2 = \frac{R_{1,3} \cdot Z_0}{R_{1,3} + Z_0} \cdot \frac{1-1/k}{1/k}. \quad (2)$$

Для аттенуатора с ослаблением $k = 10$ получены значения: $R_{1,3} = 50 \cdot 1,22 = 61,11$ Ом; $R_2 = 247,5$ Ом. Для второго аттенуатора с ослаблением $k = 4$: $R_{1,3} = 50 \cdot 1,66 = 83,33$ Ом, $R_2 = 93,7486$ Ом. Для реализации БУ с использованием серийно выпускаемых электронных компонентов были выбраны

номиналы: $R_{1,3} = 60,4$ Ом и $R_2 = 249$ Ом для $k = 10$ и $R_{1,3} = 82,5$ Ом и $R_2 = 93,1$ Ом для $k = 4$. В данном случае значения коэффициентов ослабления k изменяются не более чем на 2 %, что обеспечивает необходимый динамический диапазон входных сигналов. Также это несоответствие является постоянным и может быть учтено поправочными коэффициентами.

После аттенюаторов ослабленный на необходимую величину сигнал поступает на дифференциальный усилитель, выполненный на микросхеме LMH5401 [2]. На один из входов поступает исследуемый сигнал, другой вход подключён к потенциометру, с помощью которого возможно создавать необходимое постоянное смещение. Он имеет обвязку из резисторов и ёмкостей для недопущения проникновения импульсных помех. Несимметричность уровней биполярного сигнала составляет порядка 1 %. Моделирование работы аттенюаторов показано на рис. 2.

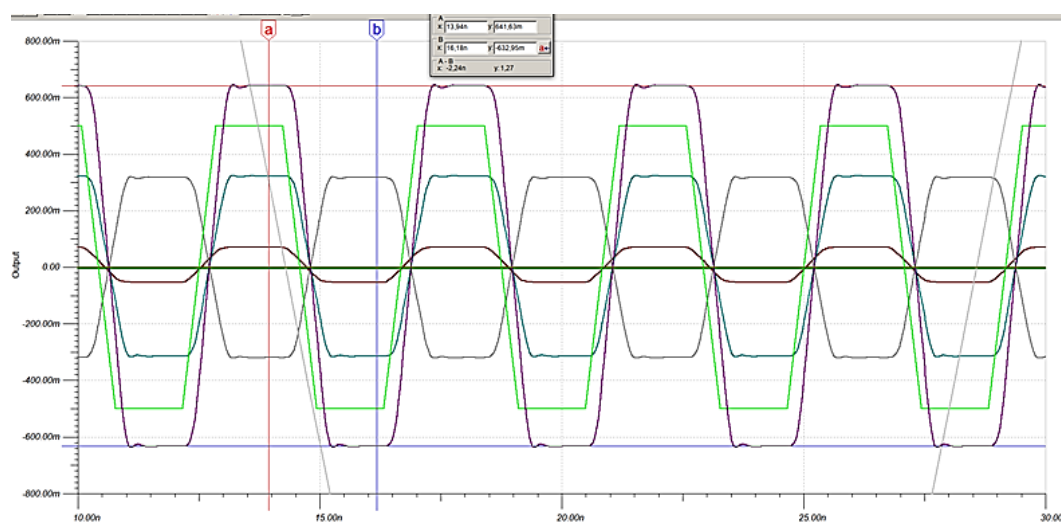


Рис. 2. Аттенюатор с ослаблением в 4 раза

На рис. 3 показаны результаты моделирования прохождения электрических сигналов от аттенюатора (зелёным цветом) до выхода всей схемы (светло-коричневым). Для создания и моделирования электрической схемы и получения графиков с результатами использовалась бесплатная программа TINA TI 9.

С выхода аттенюатора поступает сигнал с относительно слабыми искажениями, с ровным линейным фронтом. На выходе первого усилителя имеются выбросы, а фронт импульса становится более пологим. Однако в целом форма сигнала сохраняется. Время нарастания переходной характеристики $\tau_{ПХ}$ составляет не более 220 пс. Задержка — около 210 пс. Таким образом, потенциальная верхняя граничная частота $f_{в.гр.}$ полосы пропускания БУ может быть рассчитана по формуле:

$$f_{\text{в.гр.}} = \frac{0,35}{\tau_{\text{ПХ}}} = 1,6 \text{ ГГц.} \quad (3)$$

То есть канал БУ не будет искажать широкополосный сигнал на требуемых частотах от 0 до 500 МГц.

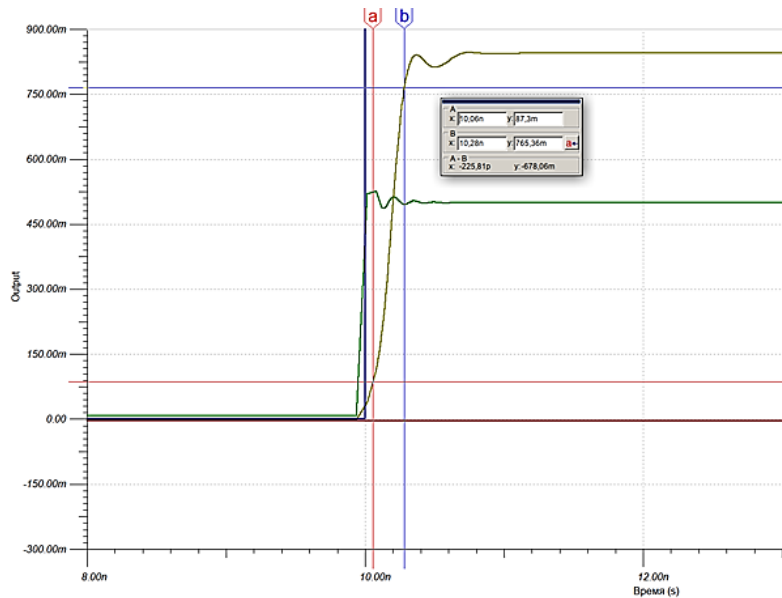


Рис. 3. Результаты моделирования переходной характеристики БУ

Для выявления возможных отклонений из-за изменения номиналов сопротивлений аттенюаторов было проведено моделирование с изменяющимися параметрами резисторов. Как видно на рис. 4, при отклонении номиналов сопротивлений на $\pm 1\%$ изменение амплитуды сигналов будет находиться в пределах $\pm 1,4\%$.

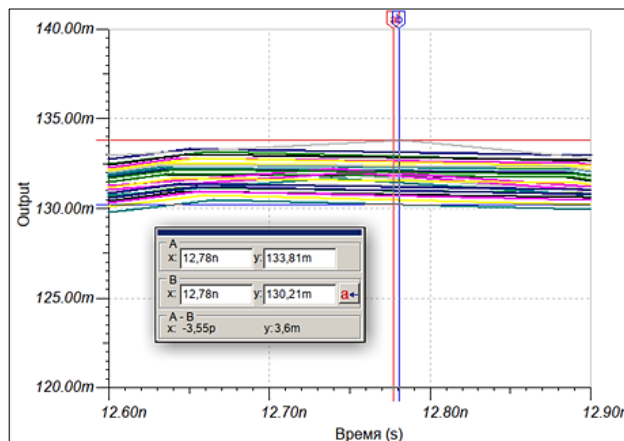


Рис. 4. Отклонение амплитуды при разбросе сопротивлений аттенюатора в 1 %

Для уменьшения выбросов на выходе усилителя отклонения были установлены два конденсатора по 12 пФ. Это позволило существенно уменьшить выбросы и неравномерность в усиленном сигнале. Время установления при этом незначительно увеличилось. Ёмкости располагаются после усилителя LMH6401 с регулируемым коэффициентом усиления.

В схеме возможно появление смещения нуля, поэтому в ней имеется потенциометр, отделённый от остальной схемы активным фильтром и буфером для избегания пульсаций. Он минимизирует отклонение, подавая постоянное напряжение.

Общая схема разработанного БУ представлена на рис. 5.

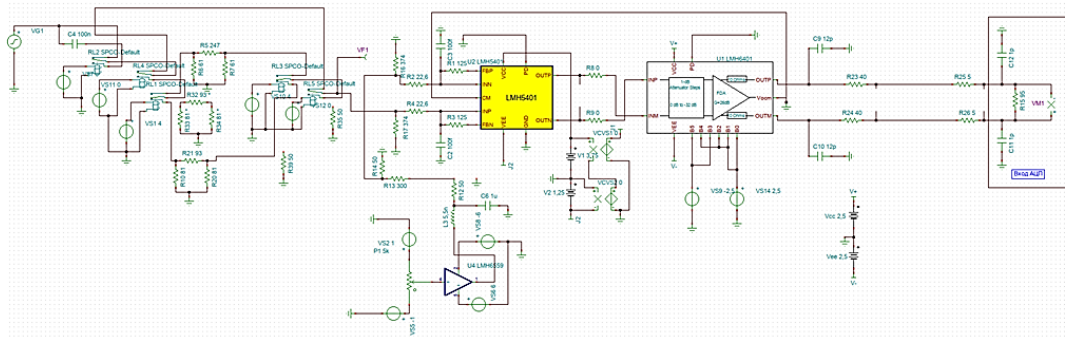


Рис. 5. Общий вид электрической схемы (промежуточный вариант)

Динамический диапазон БУ рассчитан как сумма динамического диапазона усилителя $DR_{LMH6401}$ и максимального ослабления аттенюаторов DR_{ATTmax} в дБ. Для данной схемы получено значение:

$$DR_{БУ} = DR_{LMH6401} + DR_{ATTmax} = 32 + 20 = 52 \text{ дБ.} \quad (4)$$

Диапазон амплитуд предполагаемого к использованию АЦП составляет $\pm 0,8$ В. При максимально возможном усилении такое значение на выходе БУ достигается при подаче сигнала 0,024 В. Это позволяет получить минимальный коэффициент отклонения $K_{откл.мин}$:

$$K_{откл.мин} = \frac{0,024 \text{ В}}{4 \text{ дел}} = 6 \text{ мВ/дел}, \quad (5)$$

где в знаменателе указано число вертикальных делений на экране. Он может быть уменьшен до 2 мВ/дел при использовании масштабирования цифровыми методами.

Максимально возможный по амплитуде сигнал, на который рассчитан БУ с учётом ослабления аттенюаторов, составляет 10 В. Наибольший коэффициент отклонения $K_{откл.макс}$ рассчитывается из диапазона входных значений:

$$K_{откл.макс} = \frac{10 \text{ В}}{4 \text{ дел}} = 2,5 \text{ В/дел.} \quad (6)$$

Для установления размера выбросов переходной характеристики на вход подавался модельный «идеальный» меандр с длительностью фронта 60 пс. Выброс переходной характеристики БУ при этом составляет не более 2 %, что отобразено на рис. 6.

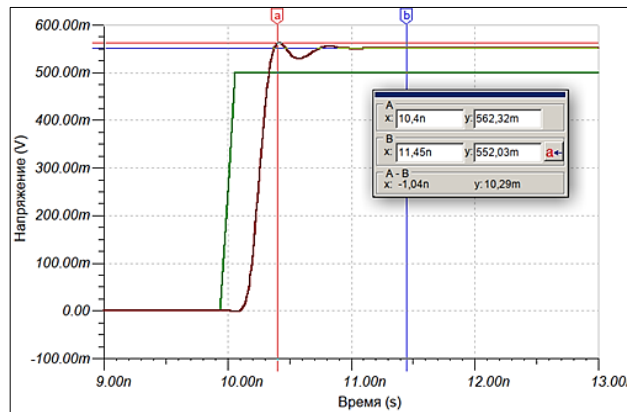


Рис. 6. Результаты моделирования переходной характеристики БУ для оценки выброса и неравномерности

Выводы

В результате была разработана электрическая схема блока усилителя вертикального отклонения для цифрового осциллографа с полосой пропускания не менее 500 МГц. В процессе моделирования основных характеристик схемы были получены их оценки. Время нарастания переходной характеристики позволяет измерять импульсные сигналы в полосе частот до 500 МГц без динамических искажений. Погрешность усилителя по входной части предварительно оценивается как 1,4–2,0 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к современным цифровым осциллографам. Значение выброса переходной характеристики составляет 2 %, что соответствует современным требованиям со значительным запасом. Нормированный амплитудный диапазон составляет от $\pm 0,006$ до ± 10 В, что обеспечивает минимальный и максимальный коэффициенты отклонения 2 мВ/дел и 2,5 В/дел соответственно.

Список литературы

1. TI Designs: TIDA-00826 Design Guide 50-Ohm 2-GHz Oscilloscope Front-end Reference Design. — Texas Instruments Incorporated, 2015.
2. LMH5401 8-GHz, Low-Noise, Low-Power, Fully-Differential Amplifier. — SBOS710D. — October 2014. — Revised February 2018.

Статья поступила в редакцию: 15.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 19.10.2021 г.

Статья принята в работу: 25.10.2021 г.