

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

© 2020 г. А. М. Батраков<sup>а</sup>, М. Ю. Васильев<sup>а,б</sup>, Е. С. Котов<sup>а,б</sup>, К. С. Штро<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН  
Россия 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>б</sup> Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

\*e-mail: K.S.Shtro@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.10.2019 г.

После доработки 11.11.2019 г.

Принята к публикации 15.11.2019 г.

Разработан делитель высоковольтных импульсных сигналов для многоканальной системы осциллографического мониторинга линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20. Делитель удовлетворяет целому комплексу требований: диапазону рабочих напряжений до 30 кВ, полосе частот 30 МГц, характеристикам по точности и стабильности лучше 1%, воспроизводимости параметров при массовом производстве. Приводится анализ различных вариантов высоковольтных делителей: пассивных емкостных делителей, емкостных делителей с активными устройствами, резистивных, резистивно-емкостных и комбинированных делителей. На основе анализа обосновывается выбор схемы делителя, обладающего необходимыми свойствами.

DOI: 10.31857/S0032816220020093

### ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН строится линейный индукционный ускоритель с энергией электронного пучка 20 МэВ, током пучка 2 кА и длительностью 100–300 нс. В ускорителях этого типа пучок электронов приобретает энергию, проходя цепочку последовательных ускоряющих модулей, каждый из которых добавляет порцию, равную напряжению на ускоряющем модуле [1]. Приращение энергии в одном ускоряющем модуле ЛИУ-20 равно 0.34 МэВ. В создаваемой установке полное число модулей составит 60. Каждый из них образован шестнадцатью отдельными индукторами, которые питаются от восьми импульсных генераторов (модуляторов) – по два индуктора на модулятор [2].

Осциллограммы напряжений на индукторах предоставляют важную физическую информацию о параметрах пучка и работе высоковольтного оборудования. Эти данные крайне востребованы и на этапе запуска установки, и в течение длительного срока эксплуатации. Так, сумма амплитуд напряжений на индукторах дает приращение энергии пучка при пролете через ускоряющий модуль, а неравномерность и колебательность на полочке импульса ускоряющего напряжения – разброс энергии электронного пучка. Взаимное положение фронтов позволяет синхронизовать времена

срабатывания высоковольтных генераторов-модуляторов.

Помимо online-анализа постоянный мониторинг сигналов с индукторов в ходе эксплуатации, их архивирование и анализ дают возможность обнаружить возможную деградацию параметров высоковольтных элементов и принять превентивные меры.

Для полномасштабной регистрации высоковольтных сигналов с индукторов во всем ускорительном тракте необходимо иметь несколько сотен осциллографических каналов, работающих синхронно и обладающих частотой выборок 200–400 МГц. Эти каналы образуют систему осциллографического мониторинга, являющуюся частью общей системы управления ЛИУ-20 [3].

Важнейшим элементом измерительного тракта многоканальной системы осциллографического мониторинга является высоковольтный делитель, с помощью которого измеряются напряжения на ускоряющих модулях. Именно он в значительной степени определяет характеристики всей системы по точности и широкополосности.

Несмотря на то, что задачи ослабления высоковольтных импульсных сигналов с целью дальнейшей обработки неоднократно решались в экспериментальной практике, авторам не удалось найти делитель, в котором бы сочетались диапа-

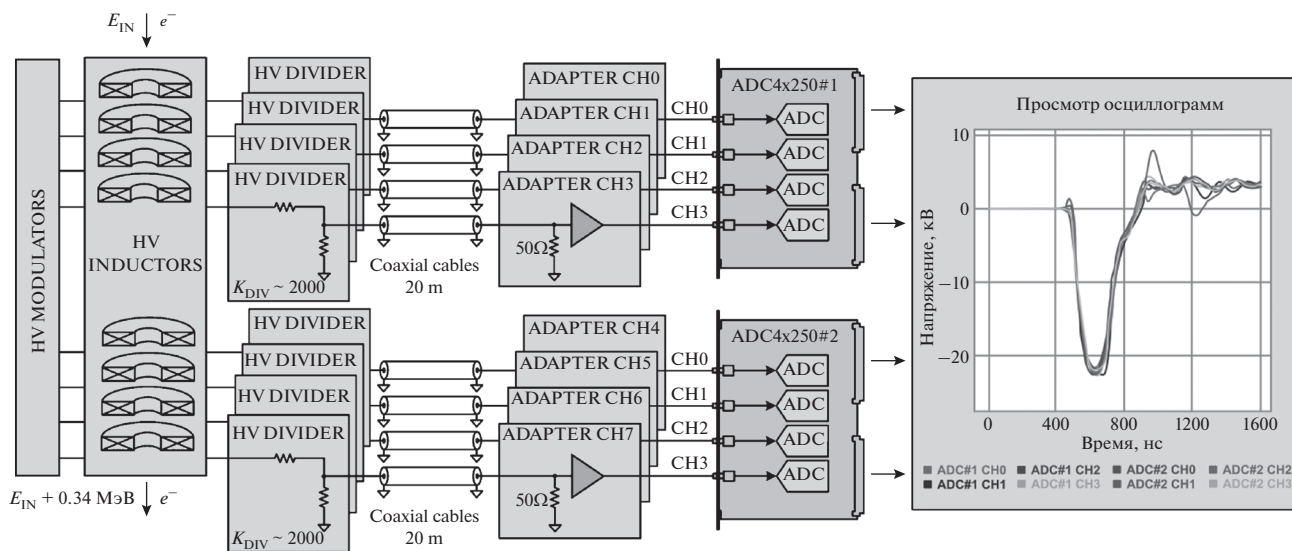


Рис. 1. Структурная схема сигнального тракта одного ускорительного модуля.

зон рабочих напряжений, частотные свойства, характеристики по точности и стабильности, технологичность и воспроизводимость параметров при массовом производстве. В этой связи авторы посчитали целесообразным описать разработку делителя с нужным набором характеристик.

В статье рассматривается возможность применения в многоканальной системе осциллографического мониторинга пассивных емкостных делителей, емкостных делителей с активными устройствами, резистивных и резистивно-емкостных делителей. Приведены данные по прецизионным высоковольтным резисторам и конденсаторам, а также методикам тестирования изготовленных делителей.

### 1. ОБЗОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ И ТРЕБОВАНИЯ К ДЕЛИТЕЛЮ НА УСКОРИТЕЛЕ ЛИУ-20

Для понимания места высоковольтного делителя в системе осциллографического мониторинга приведем структурную схему сигнального тракта одного ускорительного модуля (рис. 1). Сигнал с индуктора ослабляется делителем, работающим на кабельную трассу длиной 20 м, передающую сигналы из радиационно защищенного зала к стойкам с измерительной электроникой, и с выхода трассы поступает в модуль-адаптер. Последний выполняет предварительную обработку пришедшего сигнала и затем передает его в 4-канальный цифровой осциллографический модуль ADC4x250 [4]. Для регистрации напряжений на ЛИУ-20 необходимо 480 измерительных каналов, объединенных в 60 комплектов.

С целью сравнительного анализа и обсуждения различных вариантов высоковольтных делителей и в том числе применяемых на линейных индукционных ускорителях необходимо сформировать набор требований к высоковольтному делителю на ускорителе ЛИУ-20.

Номинальное импульсное напряжение на индукторе равно 22 кВ, максимальное может достигать 25–27 кВ. С учетом некоторого запаса следует проектировать делитель, рассчитанный на максимальное напряжение 30 кВ.

Ускоритель ЛИУ-20 проектируется для работы с пучками, имеющими длительности 100 или 300 нс. Соответственно высоковольтный модулятор формирует импульсы, близкие по форме к трапецеидальным с длительностью на полувысоте 100 или 300 нс и фронтами ускоряющих напряжений 50–70 нс. Именно такую форму сигнала будем использовать для дальнейшего анализа.

При формировании требований к характеристикам делителя по точности и разбросу параметров надо принимать во внимание полное количество делителей (480 и резерв), необходимых для построения системы осциллографического мониторинга. Отсюда следует, что крайне желательно иметь коэффициенты ослабления, практически одинаковые для всех делителей. Это позволит отказаться от объемных калибровочных таблиц и предотвратит возможную путаницу.

Величина ошибки коэффициента ослабления делителя диктуется необходимостью определения энергии, приобретенной в каждом ускоряющем модуле, с погрешностью  $\pm 0.5\%$ , что позволяет с необходимой точностью устанавливать токи магнитных линз, фокусирующих пучок. Приобретенная энергия определяется по сумме напря-

жений с восьми делителей, помноженной на средний коэффициент ослабления. Если предположить, что погрешность одного делителя не превышает  $\pm 1.5\%$ , то разброс усредненного по восьми коэффициента будет менее  $\pm 0.5\%$ . Полная погрешность делителя складывается из двух величин: собственно коэффициента ослабления и искажения полочки импульса. Коэффициент ослабления определим как отношение средних значений входного и выходного напряжений ( $U_{avg}$ ) в центральной части полочки с длительностью 200 нс для 300-нс импульса (см. рис. 2). Под искажением полочки будем понимать отклонение (колебательность и наклон) полочки от среднего значения.

Зададимся на этапе формирования требований максимальной величиной погрешности коэффициента  $\pm 1.0\%$ , а максимальным искажением полочки  $\pm 0.3\%$  (0.6% от минимума до максимума на рис. 2).

Оценка для трапецеидального импульса времени установления с погрешностью  $\sim 0.3\%$ , а также требование к разбросу взаимного положения фронтов 4–6 нс задает полосу делителя 30–35 МГц. Размещение делителя, его конструкция и способ подключения к источнику сигнала определялись исполнением типовых высоковольтных вводов и не допускали каких-либо заметных вариаций.

Требования к делителю:

- максимальное входное напряжение до 30 кВ;
- максимальное выходное напряжение на нагрузке 50 Ом –  $\sim 10$  В;
- длительность импульсов на полувысоте от 100 до 300 нс;
- выходное сопротивление делителя 50 Ом  $\pm 0.1\%$ ;
- длина коаксиальной линии передачи сигнала 20 м;
- искажение полочки не более  $\pm 0.3\%$ ;
- температурная зависимость коэффициентов в диапазоне 10–60°C –  $\leq 40$  ppm/°C;
- разброс коэффициентов – не более  $\pm 1\%$ ;
- разброс средних коэффициентов в сборках из 8 шт. – не более  $\pm 0.3\%$ ;
- полоса частот  $\sim 30$  МГц;
- необходимое количество делителей  $\sim 500$ ;
- стоимость компонентов/делитель – не более \$100;
- совместимость с конструкцией высоковольтного вывода.

Зарубежными компаниями выпускается довольно много высоковольтных делителей. Заметная часть из них представляет собой согласованные резистивные аттенюаторы, рассчитанные на радиочастотные применения, в связи с чем они имеют полосу частот, достигающую десятка гига-

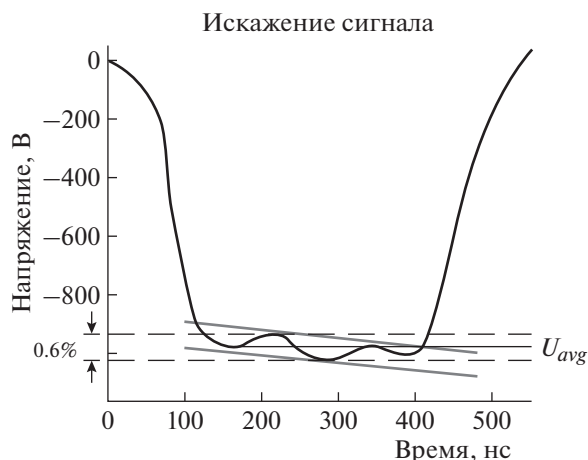


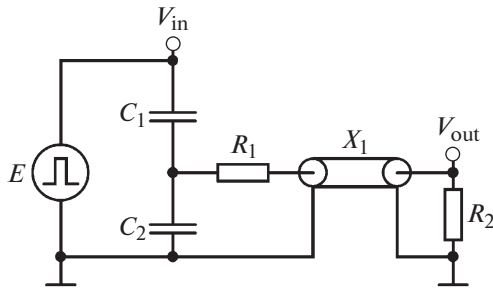
Рис. 2. К определению понятий “коэффициент ослабления” и “искажение полочки”.

герц, ослабление 20–40 дБ, заметные габариты и массу [5, 6].

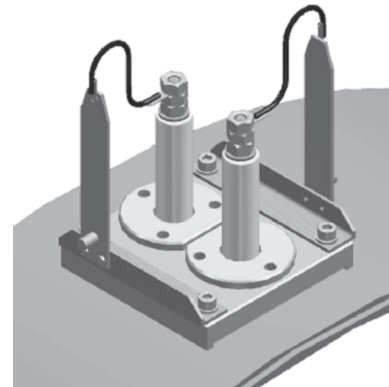
Вполне удовлетворяющие электрические параметры имеют высоковольтные пробники: 40–60 кВ, 80–90 МГц, ослабление от 1000 до 10000 раз. Однако их конструкция, невозможность работы на длинную согласованную линию, а также цена  $\sim \$2500$  (см., например, P6015A Tektronix [7]) делают нереальным их использование в многоканальной системе осциллографического мониторинга.

Наибольшее применение на физических установках находят устройства, основанные на емкостном делении импульсных напряжений [8, 9]. Нежелательным свойством таких делителей является колебательность переходной характеристики, которая вызвана паразитными индуктивностями верхнего и нижнего плеч. Паразитные резонансы в высоковольтных делителях будут обсуждаться ниже в разделе 3.

В линейных индукционных ускорителях радиографических комплексов также применяются делители, основанные на емкостном делении высоковольтного сигнала [10, 11]. Отличительным свойством представленных делителей является то, что они рассчитаны на работу с напряжениями  $> 100$  кВ. Именно по этой причине в верхнем плече используется конструкционная емкость. Достаточно большой разброс конструкционных емкостей требует тщательной предварительной калибровки и индивидуального учета коэффициентов деления. В [10] отмечается, что: “...каждый датчик напряжения калибруется с помощью точного делителя, который в свою очередь откалиброван с помощью поверенного в Национальном Бюро Стандартов анализатора”. В том случае, если количество датчиков достигает нескольких сотен, как на ЛИУ-20, такое решение нежелательно и имеет смысл искать иные варианты. Этому спо-



**Рис. 3.** Емкостный делитель и тракт передачи сигнала.  $X_1$  – длинная передающая коаксиальная линия – 50 Ом.



**Рис. 4.** Конструкция и положение делителя на индукторе.

собствует и то, что на ЛИУ-20 напряжения на индукторах не превышают 30 кВ, поэтому можно рассмотреть возможность применения емкостных делителей, изготовленных из промышленных, с известной емкостью конденсаторов.

Возвращаясь к измерению ускоряющих напряжений в линейных ускорителях рентгенографических комплексов, сообщим, что в наиболее известной и успешно работающей установке DARHT применяются резистивные делители, так что и этот тип делителей необходимо проанализировать [12, 13].

## 2. СХЕМЫ С ЕМКСТНЫМ ДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛА

Обсудим возможность использования емкостных делителей на ЛИУ-20, не принимая пока во внимание реальные параметры высоковольтных конденсаторов. Полная схема, включающая делитель и линию передачи высоковольтных сигналов, представлена на рис. 3. Простейший анализ этой схемы показывает, что для получения наклона полочки трапецидального импульса требуется выполнить соотношение  $(R_1 + R_2)C_2 \approx T_{\text{имп}}/\delta$ , где  $T_{\text{имп}}$  – максимальная длительность импульса (300 нс),  $\delta$  – допустимая погрешность. Поскольку передающая коаксиальная линия длиной 20 м должна быть согласована, то пока будем считать, что  $R_2 = 50$  Ом. Тогда для получения наклона полочки на уровне 0.2–0.4% сопротивление  $R_1$  должно быть достаточно большим. Учитывая наибольшую длительность импульса (300 нс) и приняв  $\delta = 0.3\%$ , можно оценить, что  $(R_1 + R_2)C_2 \approx 100$  мкс.

Заслуживает упоминания делитель с активными элементами, когда  $R_1$  заменяется усилителем, обеспечивающим работу на нагрузку 50 Ом и имеющим большое входное сопротивление. Однако возможность радиационных повреждений полупроводниковых устройств в реальных условиях работы делает такое решение весьма нежелательным.

Для дальнейшего анализа следует описать конструкцию и расположение делителя на ускоряющем модуле ЛИУ-20 (рис. 4). Показанная конструкция была выбрана как наиболее технологичная при производстве и адекватная исполнению высоковольтного ввода, хотя и не самая удачная с точки зрения паразитных элементов цепи, влияние которых пришлось учитывать.

Снизу печатная плата делителя крепится к корпусу, который является измерительной землей. Соединительный провод к нему выполнен из гибкого проводника длиной 100 мм, подключаемого к выводу индуктора. Высоковольтный вывод индуктора представляет собой проводящую шпильку с длиной выступающей части 110 мм, вставленную в герметизирующий (для отделения объема с элегазом) капролоновый изолятор.

Для минимизации емкостной связи высоковольтного вывода и делителя последний отнесен от шпильки на достаточно большое расстояние. Также два делителя расположены по разным сторонам от высоковольтных выводов, чтобы исключить их перекрестную связь. Учитывая физические размеры выводов, выход индуктора можно представить как источник импульсного напряжения с выходной индуктивностью  $\sim 250$  нГн (индуктивность шпильки и гибкого проводника).

Далее имеет смысл оценить возможные значения  $C_1$  и  $C_2$ . Оценим максимальную величину емкости верхнего плеча, учитывая индуктивность этого плеча  $\sim 250$  нГн. Приняв для оценки резонансную частоту в два–три раза больше, чем полоса частот тракта (30 МГц), получим, что  $C_1$  должна быть не более 20–30 пФ.

Выражение для коэффициента ослабления  $K$  схемы на рис. 3 при условии, что  $R_1 \gg R_2$  и  $C_2 \gg C_1$ :

$$K = \frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} \quad (1)$$

Подставляя в (1)  $R_2 = 50 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 20 \text{ пФ}$  и  $R_1 C_2 = 100 \text{ мкс}$ , получим  $K \approx 10^5$ , что приведет к ослаблению входного напряжения 22 кВ до уровня 0.22 В. Передать такое низкое напряжение без заметных искажений в условиях мощных импульсных помех не представляется возможным.

Крайне привлекательна “цифровая” схема, когда функции восстановления формы сигнала реализуются цифровым образом. Действительно, если сделать постоянную времени нижнего плеча 1–2 мкс, напряжение в линии будет 50–100 В, и его реально передать с малыми помехами и затем преобразовывать в цифровой вид. Очевидно, что малая постоянная времени нижнего плеча приведет к заметному дифференцированию сигнала, и система управления должна будет восстанавливать его исходную форму. Такой вариант предложен, например, в [14], однако в нашем случае проблемы этого способа заключаются в ином: вследствие того, что цифровой алгоритм должен использовать для всех измерительных каналов одни и те же константы, чтобы избежать путаницы из-за большого числа каналов, необходимо с погрешностью <1% выполнить два условия:  $C_2/C_1 = K \approx \text{const}$  и  $C_2 R_2 = \tau \approx \text{const}$ . Подстройка верхнего плеча нежелательна, так как потребует дополнительной номенклатуры высоковольтных подстроечных емкостей. С учетом возможности подстройки только нижнего плеча, а также того, что  $R_2 = 50 \text{ Ом} \pm 0.1\%$ , сформулированные выше условия означают, что путем изменения  $C_2$  можно будет подстраивать либо коэффициент  $K$ , либо постоянную времени  $\tau$ .

Следует заметить, что сделать большими и постоянную времени  $(R_1 + R_2)C_2$ , и передаваемое напряжение можно, выполняя согласование не на приемном, а на передающем конце, когда  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ , а  $R_2$  делается достаточно большим. Такой способ анализируется в [15], где показано, что импульс передается с динамическими искажениями, вызванными работой на несогласованную линию, и для восстановления формы требуется применение весьма сложного цифрового алгоритма.

Есть и еще одно существенное обстоятельство почему “цифровые” способы неудобны: в реальной работе всегда есть желание использовать функционально законченный делитель без каких-либо дополнительных средств, когда его выход можно подключить непосредственно к осциллографу. Как впоследствии показала практика, такое свойство оказалось крайне полезным на этапе подстройки делителей, а при запуске установки активно использовалось.

Из приведенных рассуждений можно сделать вывод, что различные варианты схем с емкостными делителями близки по параметрам к желаемым, однако каждой из них присущи те или иные

недостатки, не позволяющие получить приемлемые искажения формы, малый разброс коэффициентов, технологичность и удобство в работе. В этой связи целесообразно рассмотреть иные типы делителей.

### 3. РЕЗИСТИВНЫЕ И РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ

Резистивные делители с точки зрения точности коэффициента деления и технологичности выглядят более перспективными, так как разброс номиналов резисторов может быть в несколько раз меньше, чем разброс конденсаторов. Что же касается частотных свойств, то очевидно, что динамические искажения резистивного делителя зависят от сопротивления высоковольтного плеча. Чем оно меньше, тем меньше характерные постоянные времени, возникающие из-за собственных паразитных емкостей резисторов, а также емкостей на окружающие конструкции.

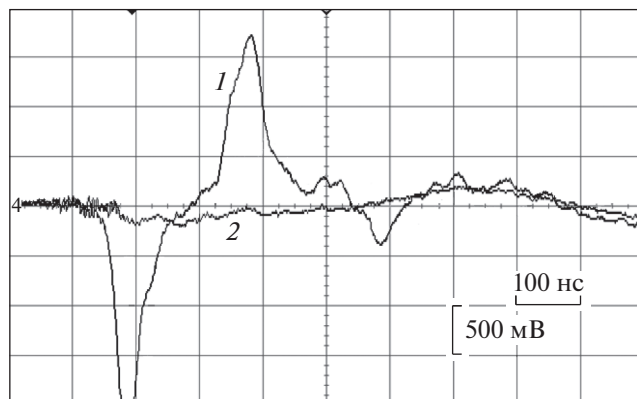
Из последних наиболее существенны емкости на высоковольтный вывод индуктора. Шпилька вывода имеет высоту  $h = 11 \text{ см}$ , диаметр  $d = 1 \text{ см}$  и располагается на расстоянии  $l = 7 \text{ см}$  от делителя (см. рис. 4). Для оценки этой емкости представим делитель напряжения в виде проводящей пластины и воспользуемся формулой оценки емкости между цилиндром и плоскостью [16]:

$$C = 2\pi d \epsilon \left[ \text{arch} \left( \frac{h}{l} \right) \right]^{-1} \approx 0.4 \text{ пФ}. \quad (2)$$

Оценим наиболее простым и очевидным способом при каком сопротивлении верхнего плеча ошибкой за счет влияния емкости 0.4 пФ можно пренебречь. Здесь важно отметить, что для рабочих частот импеданс такой емкости велик, и она может рассматриваться как генератор тока. С учетом этого оценка тока, инжектируемого в резисторы делителя, определится как  $I_c = C \frac{dU_c}{dt} = 0.2 \text{ А}$ .

Ток, протекающий через резисторы делителя вследствие приложенного напряжения, должен быть больше емкостного тока по крайней мере в 300–400 раз. Легко посчитать, что при напряжении 25 кВ для создания такого резистивного тока сопротивление должно быть <0.5 кОм. В этом случае импульсная мощность на резисторах верхнего плеча превысит  $10^8 \text{ Вт}$ .

Разумеется, это наиболее жесткая оценка. Понятно, что емкостный ток искажает лишь быстроменяющуюся часть сигнала делителя. Но реальный сигнал с длительностью на полувысоте около 100 нс практически не имеет плоской вершины, поэтому сделанная оценка достаточно правдоподобна. Полученные в оценках пиковые многократные нагрузки в состоянии выдержать лишь композитные резисторы, имеющие, как из-



**Рис. 5.** Выходной сигнал на резистивном (1) и резистивно-емкостном (2) делителе от емкостной наводки при амплитуде входного импульса 22 кВ.

вестно, крайне плохие характеристики по точности, стабильности и линейности. Пленочные резисторы, даже специальные высоковольтные резисторы столь малого номинала, деградируют.

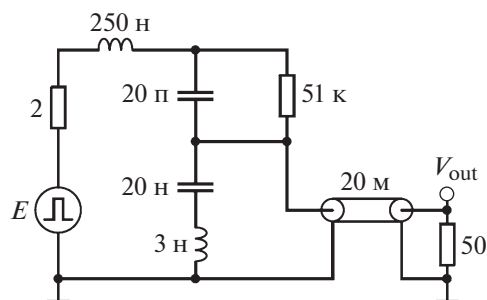
Увеличение сопротивления верхнего плеча возможно лишь при уменьшении влияния конструктивных емкостей на высоковольтный вывод. Этого можно добиться, если использовать резистивно-емкостный делитель с емкостью в верхнем плече, существенно большей, чем конструкционная емкость. Резистивно-емкостный делитель также можно сделать из промышленных компонентов.

Для проверки насколько уменьшится влияние емкостной наводки в обсуждаемой конструкции резистивно-емкостного делителя были проведены измерения, в которых использовались два образца: резистивный делитель с сопротивлением верхнего плеча 50 кОм и резистивно-емкостный делитель с таким же сопротивлением и емкостью верхнего плеча 20 пФ. Вход каждого делителя отключался от высоковольтного терминала и закорачивался на корпус индуктора.

Результаты измерений представлены на рис. 5. Из осциллограмм видно, что амплитуда наводки на резистивно-емкостный делитель в 10–15 раз меньше и не имеет характера дифференцирования на фронтах.

Известно, что отсутствие частотной зависимости коэффициента деления в резистивно-емкостном делителе достигается при соблюдении равенства постоянных времени верхнего и нижнего плеч. Как и для схемы на рис. 3, это накладывает достаточно жесткие требования на разброс номиналов элементов делителя. Однако и для резистивно-емкостного делителя можно предусмотреть подстройку емкости нижнего плеча.

Продолжим анализ резистивно-емкостных делителей, предполагая на данном этапе, что требования по малому разбросу коэффициентов деле-



**Рис. 6.** Схема резистивно-емкостного делителя с паразитными индуктивностями. Резистор 2 Ом отражает эквивалентный импеданс источника сигнала.

ния и искажению полочки выполнимы. Рассмотрим резонансные свойства схемы, представленной на рис. 6.

В схеме присутствуют два последовательных резонансных контура. Первый резонанс вызван индуктивностью и емкостью нижнего плеча. Его частота находится в рабочей полосе, в связи с чем трапецеидальный сигнал на выходе такого делителя имеет резко выраженный колебательный характер. Резонансная частота верхнего плеча, образованная паразитной индуктивностью высоковольтного вывода и эквивалентной емкостью делителя, равна 80 МГц, что также не слишком далеко от рабочего диапазона.

С целью снижения влияния паразитных резонансов на переходную характеристику была предложена схема комбинированного резистивно-емкостного делителя (рис. 7). За счет уменьшения емкости нижнего плеча его резонансная частота переместилась за 200 МГц. В то же время резистивный делитель, который является частью нижнего плеча и позволяет сохранить нужный коэффициент деления, не вносит частотных искажений, поскольку проходная емкость резистора 5.1 кОм менее 0.1 пФ.

Однако в таком делителе преобладающим становится влияние резонанса верхнего плеча. Кардинально снизить добротность резонансного контура в верхнем плече и “выгладить” переходную характеристику позволяет добавочный резистор  $R_d$ , включенный последовательно с проводом, подводящим высоковольтный импульс. Номинал резистора  $R_d$  должен удовлетворять нескольким условиям: 1) постоянная времени цепи, образованной резистором  $R_d$  и емкостью верхнего плеча, должна быть 5 нс (30 МГц), чтобы не исказить форму сигнала; 2) не вносить погрешности в статистический коэффициент, т.е. его максимальный номинал должен быть не более 56 Ом; 3) способность выдерживать импульсные напряжения до 1.5 кВ и импульсный ток 10 А, протекающий во время фронта через емкости. Исходя из перечис-

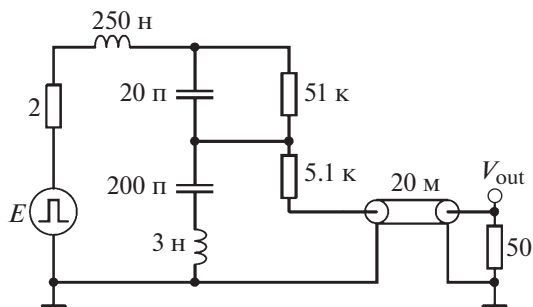


Рис. 7. Схема комбинированного резистивно-емкостного делителя.

ленного, оптимальным является использование композитных резисторов типа ТВО с номиналом 51 Ом и с рассеиваемой мощностью 1–2 Вт.

Делитель, показанный на рис. 7 с добавочным резистором 50 Ом, демонстрирует гладкую переходную характеристику (рис. 8). Кроме того, у него есть важное свойство: равенство постоянных времени с погрешностью 0.3% можно подстраивать не емкостью нижнего плеча, а резистором 5.1 кОм, что намного технологичнее. Если же найти и использовать конденсаторы с подгонкой 1%, то будут выполнены требования и по разбросу коэффициентов.

Подводя итог представленному выше анализу различных типов высоковольтных делителей, можно сделать вывод, что последний из рассмотренных вариантов наиболее привлекателен, так как для него представляется вполне реальным выполнить все требования, сформулированные в разделе 1.

Для детального анализа реализуемости последней схемы необходимо рассмотреть характеристики доступных на рынке высоковольтных конденсаторов и резисторов.

#### 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕЛИТЕЛЯ

Для получения гладкой переходной характеристики в делителе следует применять конденсаторы и резисторы с минимальной собственной индуктивностью. Этому требованию полностью отвечают компоненты для поверхностного монтажа (SMD).

Типовым для высоковольтных конденсаторов является корпус SMD1812, рассчитанный на максимальное постоянное напряжение до 3 кВ. Изучение параметров конденсаторов различных компаний показало, что наиболее подходят для данной задачи конденсаторы серии OMD компании Vishay/Vitramon. Конденсаторы OMD с диэлектриком NP0 имеют малый разброс номиналов ( $\pm 1\%$ ), низкий температурный коэффициент ( $\pm 30$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ) и зависимость емкости от приложенного напряжения

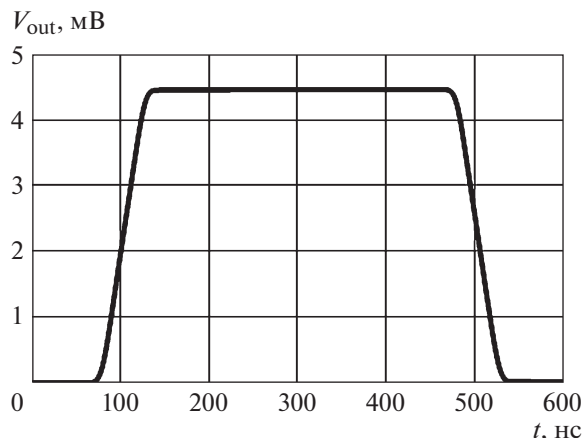


Рис. 8. Переходная характеристика с  $R_d = 50$  Ом, измеренная при малых напряжениях.

по данным производителя  $< 1\%$  в диапазоне до 3 кВ [17].

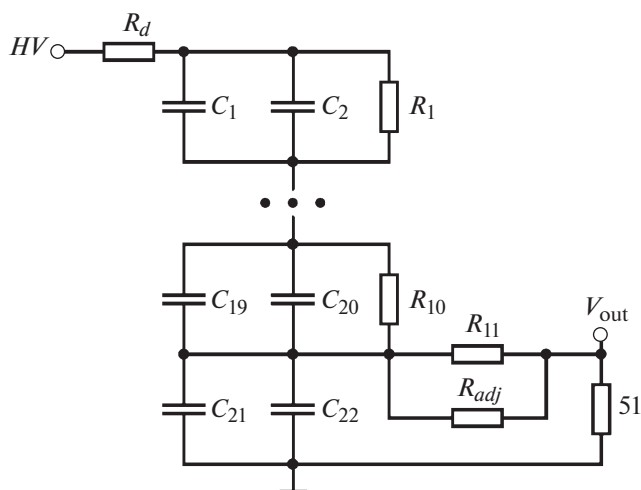
При воздействии импульса с амплитудой до 27 кВ и фронтом 50 нс через емкости делителя на нарастающем и спадающем фронтах протекает ток до 10 А. Вследствие того, что для керамики NP0 в корпусе SMD1812 максимальный рекомендуемый ток составляет 8 А, емкость высоковольтного плеча собрана из двух параллельных линеек конденсаторов, каждая из которых состоит из 10 последовательно соединенных конденсаторов 100 пФ. В нижнем плече устанавливаются два таких же конденсатора.

Сопротивление высоковольтного плеча также составлено из 10 последовательно соединенных резисторов, рассчитанных на импульсное напряжение 3 кВ. Для резисторов с таким рабочим напряжением типовым форм-фактором является SMD2512.

В делителе используются резисторы из оксида рутения фирмы Nicrom Electronic типа HVC. Коэффициент по напряжению этого типа резисторов не более 0.8 ppm/V и специфицируется для полного диапазона напряжений, т.е. до 3 кВ. Температурный коэффициент 25 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  и разброс номиналов  $\pm 0.25\%$  вполне удовлетворяют нашим требованиям [18].

При проектировании делителя следовало учитывать, что при протекании больших токов через пленочные резисторы в корпусе SMD2512 они могут деградировать под воздействием большой энергии, выделяемой в теле резистора. Экспериментальным путем было выяснено, что минимальный номинал резисторов, при котором деградация не обнаруживалась, 5.1 кОм.

На рис. 9 приведена подробная схема делителя, а из рис. 10 можно получить представление о его конструкции.

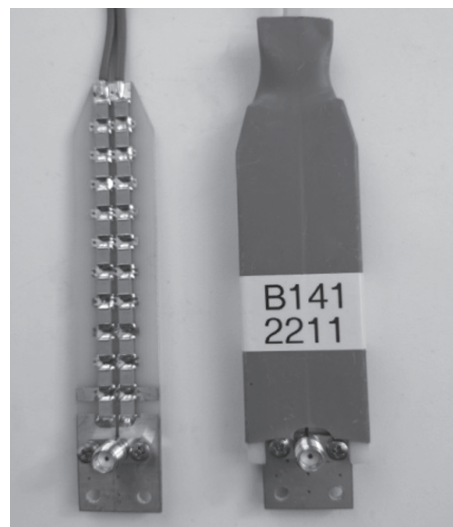


**Рис. 9.** Детальная схема делителя.  $C_1-C_{22} = 100 \text{ пФ} \pm 1\%$ ,  $R_1-R_{11} = 5.1 \text{ кОм} \pm 0.25\%$ ,  $R_d = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_{adj} = 220-1000 \text{ кОм}$ .

Напомним, что к искажению полочки трапецеидального сигнала на выходе (колебательность и наклон) предъявляются более жесткие требования ( $\pm 0.3\%$ ), чем к разбросу коэффициента ( $\pm 1\%$ ). Поэтому на этапе тестирования делителей правильнее подстраивать искажение полочки в расчете на то, что разброс коэффициентов ослабления, определяемый в основном отношением емкостей, не выйдет за  $\pm 1\%$ . В предыдущем разделе отмечалось, что это удобно делать, подстраивая резистор 5.1 кОм. Подстройка выполняется с помощью подключаемого параллельно дополнительного сопротивления в несколько сотен килоом. Так как это значение на два порядка больше, чем 5.1 кОм, то единственным требованием, предъявляемым к резистору подстройки, является его способность выдерживать напряжения до 3 кВ. Для коррекции делителя используются резисторы общего назначения компании Panasonic со следующими параметрами: корпус SMD2512, отклонение  $\pm 1\%$ , температурный коэффициент  $100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  [19].

Важно отметить еще одно полезное свойство делителя, собранного из последовательно включенных секций. Такая схема допускает при необходимости “тонкую” подстройку коэффициента. Так, например, конденсатор 5 пФ, включенный дополнительно в одной из секций, изменит коэффициент на  $2.5 \cdot 10^{-3}$ , а в двух секциях – на  $5 \cdot 10^{-3}$ .

При оценке температурной зависимости надо принимать во внимание, что резисторы и конденсаторы верхнего и нижнего плеч взяты из одних партий, одного номинала и к тому же имеют схожие температурные зависимости и близкие температурные коэффициенты. Отличие постоянных времени верхнего и нижнего плеч делителя,



**Рис. 10.** Плата делителя со стороны конденсаторов и делитель в сборе.

обуславливающее искажение формы сигнала, в данном случае будет определяться разницей температурных коэффициентов отдельных элементов и составит несколько  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ , что не является сколь-либо существенным.

Большее влияние температуры на коэффициент деления будет определяться поведением цепи, образованной сопротивлениями  $R_{11}$  и  $R_{out} = 51 \text{ Ом}$ . Данные резисторы имеют близкие температурные коэффициенты ( $\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ), но различаются по типу и номиналу, поэтому возможен их уход в разные стороны. В таком случае типовой дрейф коэффициента составит  $\pm 35 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , а максимальный  $\pm 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

## 5. СПОСОБЫ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕЛИТЕЛЕЙ

Вследствие того, что удовлетворительный с метрологической точки зрения трапецеидальный импульс высокого напряжения получить практически нереально, подстройка переходной характеристики и определение коэффициента ослабления делителей при массовом тестировании выполнялись на низком напряжении. Такой подход обоснован благодаря тому, что в делителе применены компоненты, имеющие малую зависимость номиналов от напряжений. В дальнейшем данные, полученные при малых напряжениях, сравнивались с результатами при работе с высоковольтными сигналами.

Для тестирования большого количества делителей был изготовлен стенд, структура которого представлена на рис. 11. Генератор Keysight 33522В [20] формирует импульс с амплитудой 10 В, длительно-



стью 4 мкс и фронтом 50 нс (по уровню 10–90%). Сигнал подается на вход тестируемого делителя, а через аттенюатор –20 дБ подключается к одному из входов осциллографического модуля ADC4x250 с установленной шкалой  $\pm 2$  В. Этот референсный канал необходим для измерения установившегося значения сигнала. Аттенюатор имеет полосу 0–6 ГГц, в связи с чем мы посчитали допустимым определить его точный коэффициент ослабления на постоянном напряжении, предполагая, что для частот от нуля до 30 МГц коэффициент будет таким же.

Кратко опишем ADC4x250, который использовался как основной калибровочный элемент. Это устройство представляет собой 4-канальный осциллографический модуль с частотой выборки 250 МГц, разрешением 12 бит, среднеквадратичной величиной шума 0.8 кванта, эффективной разрядностью 10 бит @ 11 МГц [21]. В модуль встроен цифроаналоговый преобразователь калибровки, вследствие чего ошибка масштаба не превышает  $\pm 1$  квант, а ошибка сдвига нуля  $< 0.5$  кванта. Полоса частот модуля 0–80 МГц, имеется четыре диапазона входных сигналов: от  $\pm 0.5$  до  $\pm 4$  В.

Выходной сигнал делителя с амплитудой около 4.5 мВ подается на другой вход ADC4x250. В этом канале шкала перестроена со штатной величины  $\pm 0.5$  В на более чувствительную  $\pm 0.17$  В. Нетрудно подсчитать, что на такой модифицированной шкале вес кванта 0.083 мВ, поэтому на сигнал в 4.5 мВ приходится всего 54 отсчета, что явно недостаточно для точного измерения параметров делителя. Для более точного определения амплитуды малого сигнала можно использовать усреднение по 100–200 реализациям зарегистрированных осциллограмм, что на первый взгляд обосновано вследствие собственного шума ADC4x250, достигающего от пика до пика 3–4 кванта. Однако к подобным статистическим приемам следует прибегать лишь, будучи уверенным, что шум имеет симметричное распределение, а дифференциальная нелинейность аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.) модуля в зоне измеряемого сигнала не превышает 0.2–0.3 кванта.

Эффективность усреднения с целью повышения точности проверялась следующим образом. Был взят делитель с коэффициентом 2227, измеренным при размахе сигнала 10 В. Амплитуда на входе варьировалась на 20%, чтобы немного сместиться по характеристике преобразования а.ц.п. Используя процедуру усреднения по 1000 реализациям, определялись отношения входного и выходного сигналов для нескольких значений амплитуд. Шаг перестройки выбран 0.2 В, что приблизительно соответствует величине кванта, умноженного на коэффициент ослабления. По-

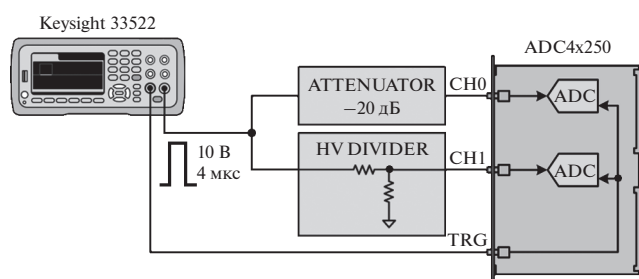


Рис. 11. Схема стенда для тестирования делителей.

лученные коэффициенты при вариации амплитуды импульса на входе таковы:

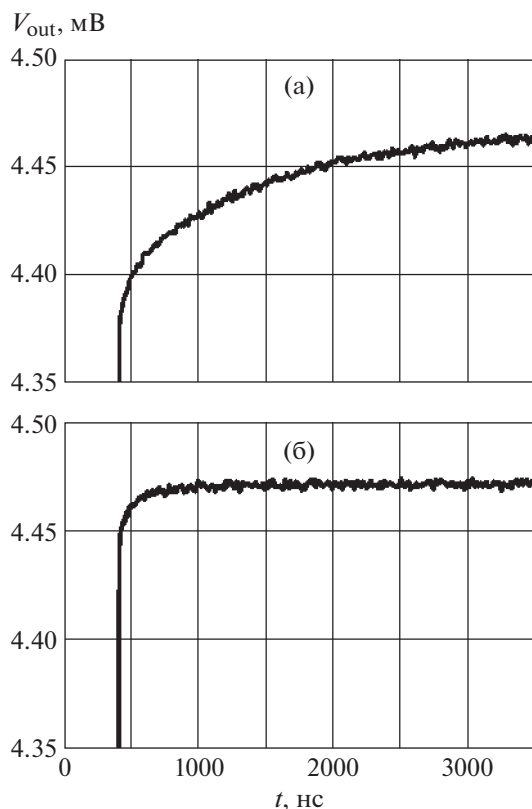
$V_{in}$ , В	10	9.8	9.6	9.4	9.2	9	8.8	8.6	8.4	8.2
$K$	2227	2231	2230	2218	2213	2218	2228	2233	2228	2215

Их анализ показывает, что абсолютная погрешность определения коэффициента деления с помощью процедуры усреднения менее 0.9%, поэтому применение ADC4x250 и процедуры усреднения вполне допустимы.

На первом этапе тестирования выполнялась подстройка переходной характеристики делителей. Сигнал, зарегистрированный с выхода делителя, совмещался с сигналом референсного канала таким образом, чтобы совпадали линии нуля обоих сигналов и значения амплитуд при времени 3 мкс, где коэффициент делителя приобретает статическую величину. Эта подгонка выполняется программным образом. Далее наложенные друг на друга сигналы сравниваются при времени 100 нс, и по отклонению полочки рассчитывается сопротивление  $R_{adj}$ .

Здесь важно отметить, что до подстройки постоянная времени нижнего плеча всегда больше примерно на 0.3–1% постоянной времени верхнего плеча. Поэтому полочка переходной характеристики до подстройки всегда имеет нарастающий (“интегрирующий”) характер. Добавление резистора  $R_{adj}$  с нужным номиналом выравнивает постоянные времени. На рис. 12а и 12б показана растянутая по вертикали в 20 раз полочка переходной характеристики до подстройки и после подстройки соответственно.

Следующим этапом является определение коэффициента ослабления. Для этого определяются средние значения входного и выходного сигналов в интервале от 100 до 200 нс импульса с длительностью 300 нс. Отношение этих величин и дает значение коэффициента. Гистограмма, демонстрирующая разброс коэффициентов, показана на рис. 13. Средний коэффициент деления составляет 2211 с максимальным отклонением  $\pm 0.6\%$ , что обусловлено разбросом конденсаторов емкост-



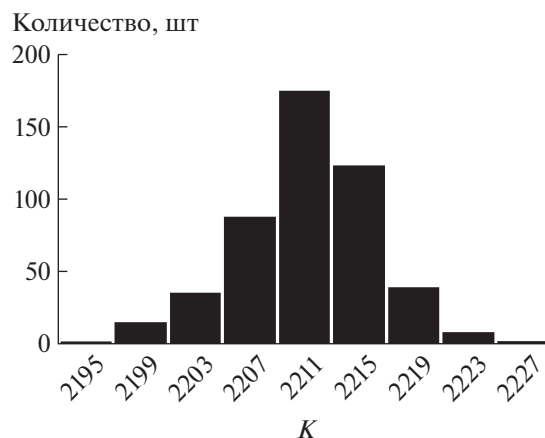
**Рис. 12.** Полочка переходной характеристики с увеличением в 20 раз до компенсации (а) и после компенсации (б). Плавный выход на полочку в районе 500 нс объясняется формой импульса с генератора. Одно деление по вертикали – 0.05 мВ (~1% от амплитуды).

ной ветви. В сборках из восьми делителей отклонение коэффициента менее  $\pm 0.2\%$ .

### 6. ПРОВЕРКА ДЕЛИТЕЛЕЙ ПРИ НОМИНАЛЬНОМ ВХОДНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Как отмечалось, номиналы применяемых в делителе резисторов и конденсаторов имеют очень слабую зависимость от приложенного напряжения, что дало основания подстраивать и тестировать делители при низком напряжении. Тем не менее, была выполнена проверка работы делителей при типовых рабочих напряжениях и видах сигналов. С этой целью сигналы, получаемые на экспериментальном стенде для исследования индукторов, измерялись с помощью высоковольтного пробника P6015A (Tektronix) и разработанного делителя. Основные параметры пробника [7]: рабочее напряжение (импульсное) до 40 кВ; коэффициент ослабления  $1000 \pm 3\%$ ; полоса частот – 75 МГц; линейность 0.18 ppm/V.

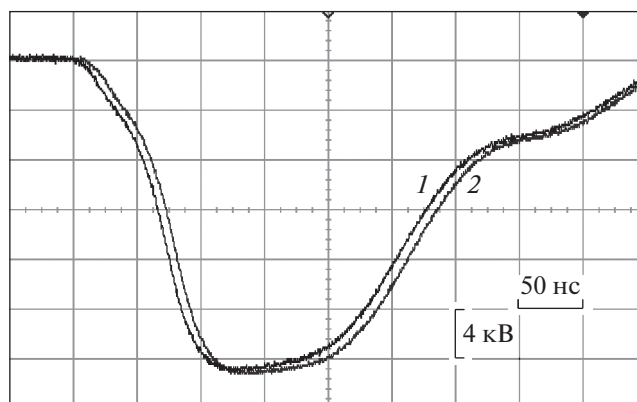
Сначала сравнивались формы сигналов. Для этого выход делителя коротким кабелем (2 м)



**Рис. 13.** Разброс коэффициентов в партии из 500 делителей.

подключался к входу А осциллографа с сопротивлением 50 Ом. На вход В подключался высоковольтный пробник P6015A. Чувствительность канала А с помощью плавной подстройки подбиралась так, чтобы совпали амплитуды сигналов. Из полученных осциллограмм (рис. 14) видно, что динамические характеристики делителя не отличаются от характеристик более широкополосного высоковольтного пробника.

Следующим шагом было вычисление коэффициента ослабления делителя. Для пояснения метода определим следующие переменные:  $U_{вх}$  – входное напряжение,  $U_{дел}$  – сигнал делителя, измеряемый осциллографом,  $U_{проб}$  – сигнал пробника, измеряемый осциллографом,  $K_{дел}$ ,  $K_{проб}$  – коэффициенты ослабления делителя и пробника соответственно,  $k_{п}$  – коэффициент, с помощью которого учитывается подгонка канала А на осциллографе к каналу В.



**Рис. 14.** Сравнение сигналов делителя (1) и пробника P6015A (2). Для наглядности сигналы обоих каналов смещены друг относительно друга по времени.

Учитывая равенство сигналов  $A$  и  $B$ , выполняемое с помощью плавной подстройки, можно написать:  $U_{\text{проб}} = k_{\text{п}} U_{\text{дел}}$ , откуда

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{проб}}}{U_{\text{дел}}} = \frac{U_{\text{вх}} K_{\text{дел}}}{K_{\text{проб}} U_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

Так как значения измеренных  $U_{\text{проб}}$  и  $U_{\text{дел}}$  известны, то можем вычислить  $K_{\text{дел}}$ :

$$K_{\text{дел}} = k_{\text{п}} K_{\text{проб}} = \frac{U_{\text{проб}}}{U_{\text{дел}}} K_{\text{проб}}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) присутствует коэффициент передачи пробника P6015A, значение которого желательно знать точнее, чем 0.5%. Так как компания-изготовитель указывает коэффициент ослабления с погрешностью  $\pm 3\%$ , то авторы решили воспользоваться высокой линейностью пробника, составляющей 0.18 ppm/V, и измерить ослабление P6015A на низком напряжении. Коэффициент ослабления измерялся на постоянном напряжении, что обосновано, так как было получено хорошее совпадение в динамике создаваемого делителя и пробника. Это свидетельствует об отсутствии частотной зависимости для обоих устройств. Полученный коэффициент  $K_{\text{проб}}(1006)$  и массивы данных  $U_{\text{проб}}$  и  $U_{\text{дел}}$  были подставлены в формулу для  $K_{\text{дел}}$ , откуда получено  $K_{\text{дел}} = 2227$ . Коэффициент ослабления этого же делителя, измеренный по описанной в разделе 5 методике, составил 2217.

Итак, основные характеристики разработанного делителя:

- рабочее напряжение – до 30 кВ;
- коэффициент деления (средний) – 2211;
- разброс коэффициентов деления (мин–макс)  $\pm 0.6\%$ ;
- разброс средних коэффициентов деления сборок из 8 шт. (погрешность определения энергии)  $\pm 0.2\%$ ;
- температурная зависимость коэффициентов: типовая  $\pm 35$  ppm/°C, максимальная  $\pm 50$  ppm/°C;
- искажение полочки  $< 0.3\%$ ;
- полоса частот 30 МГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан функционально законченный делитель высоковольтных импульсных сигналов. Около 500 изготовленных делителей применяются в системе осциллографического мониторинга ускорителя ЛИУ-20. Созданный делитель соответствует достаточно широкому набору требований, задаваемых оптикой ускорителя, конструкцией высоковольтных узлов установки, необходимым количеством делителей, их радиационной стойкостью, технологичностью. Конструкция делителя, базирующаяся на печатной плате и про-

мышленных высоковольтных компонентах, позволила изготовить делители с разбросом коэффициента  $\pm 0.6\%$  и искажением полочки трапецеидального сигнала с длительностью 300 нс менее 0.3%. После нескольких месяцев эксплуатации часть делителей была протестирована повторно на стенде, и какой-либо деградации параметров обнаружено не было. Возможности делителей позволяют использовать их и в иных подобных работах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны многим сотрудникам ИЯФ СО РАН, принимавшим участие в изготовлении и тестировании делителей на экспериментальных стендах и ускорителе.

Особую признательность выражаем бывшему сотруднику ИЯФ А. Смирнову – автору программы моделирования электронных схем NL5, активно применявшейся в работе [22].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978.
2. Akimov A., Bak P., Batrakov A., Chernitsa A., Khrenkov S., Nikitin O., Pavlov O., Petrov D., Zhelezkin D., Zhivankov K. // Proceedings of 21st International Conference on Pulsed Power. Brighton, UK. 2017. <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291336>
3. Fatkin G., Baluev A., Bekhtenev E., Kotov E., Ottmar A., Pavlenko A., Panov A., Senchenko A., Serebnyakov S., Batrakov A., Macheret Ya., Mamkin V., Shtro K., Selivanov A., Selivanov P., Singatulin S. // Proceedings of ICALEPCS 2017. Barcelona, Spain. 2017. P. 1485. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALPCS2017-THPNA052>
4. Шпрю К.С. // Интеллектуальный потенциал Сибири: материалы 25-й Межвузовской (Региональной) научной студенческой конференции (МНСК-2017). Новосибирск, 2017. С. 51.
5. Техническое описание высоковольтного аттенюатора MODEL 202. <https://barthelectronics.com/wp-content/uploads/2012/01/16-Attenuator-202-rev1.pdf>
6. Техническое описание высоковольтного аттенюатора HVAT50K. [https://www.montena.com/fileadmin/technology\\_tests/documents/data\\_sheets/Data\\_sheet\\_HVAT\\_high\\_voltage\\_attenuator.pdf](https://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/data_sheets/Data_sheet_HVAT_high_voltage_attenuator.pdf)
7. Техническое описание высоковольтного пробника P6015A; <https://download.tek.com/manual/070822305.pdf>
8. Tonis Hobejogi, Juergen Biela // Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. Chicago, IL, USA. 2011.
9. Jiheon Ryu, Hae-Ok Kwon, Seung Hyuk Park, Dong Woo Yim // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. № 3. P. 680. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2510551>
10. DeHope W.J., Kihara R., Ong M.M., Zentler J.M. // Proceedings of 16th IEEE International Pulsed Power

- Conference. New Mexico, USA. 2007. P. 1261.  
<https://doi.org/10.1109/PPPS.2007.4346061>
11. *DeHope W.J., Goerz D.A., Kihara R., Ong M.M., Vogtlin G.E., Zentler J.M.* // Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville, TN, USA. 2005. P. 2455.  
<https://doi.org/10.1109/PAC.2005.1591143>
  12. *Ekdahl C., Abeyta E.O., Bender H., Broste W., Carlson C., Caudill L., Chan K.C.D., Chen Y.J., Dalmas D., Durtschi G., Eversole S., Eylon S., Fawley W., Frayer D., Gallegos R. et al.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. № 2. P. 892.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2005.845115>
  13. *Ekdahl C., Abeyta E.O., Bartsch R., Caudill L., Chan K.C.D., Dalmas D., Eversole S., Gallegos R., Harrison J., Holzschneider M., Johnson J., Jacquez E., McCuistian B.T., Montoya N., Nath S. et al.* // Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville, TN, USA. 2005. P. 19.  
<https://doi.org/10.1109/PAC.2005.1590348>
  14. *Исакова Ю.И., Пушкарев А.И., Холодная Г.Е.* // ПТЭ. 2011. № 2. С. 39.
  15. *Фаткин Г.А.* Дис. ... канд. тех. наук: 01.04.20. Ин-т ядерной физики СО РАН, Новосибирск. 2012. 117 с.
  16. *Смайт В.* Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
  17. Техническое описание высоковольтных конденсаторов Vishay Vitramon.  
<https://www.vishay.com/docs/45198/vjomd.pdf>
  18. Техническое описание высоковольтных резисторов Nicrom Electronic. <http://www.high-voltage-resistors.com/datasheets/high-voltage-chip-resistors-hvc.pdf>
  19. Техническое описание резисторов Panasonic.  
<https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/RDA0000/AOA0000C304.pdf>
  20. Техническое описание генератора 33522A.  
<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-5914EN.pdf>
  21. *Kotov E.S., Batrakov A.M., Fatkin G.A., Pavlenko A.V., Shtro K.S., Vasilyev M.Yu.* // Proceedings of RuPAC2016. St. Petersburg, Russia. 2016. P. 721.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALPCS2017-THMPL09>
  22. <https://nl5.sidelinesoft.com/>