

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РЕЗИСТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Мета. Визначення можливості використання розробленого автономного дільника напруги для вимірювання високовольтних імпульсів з загостреними фронтами (до 1 нс). Методика. Застосовано методіку визначення коефіцієнта ділення дільника за допомогою каліброваного генератора і осцилографа. Для визначення часу наростання перехідної характеристики дільника використовувалась експериментальна методика на основі генератора високовольтних імпульсів з крутим фронтом і комп'ютерне моделювання з використанням програми схемотехнічного моделювання Micro-Cap. Результати. Експериментально отримано осцилограми високовольтних наносекундних імпульсів із субнаносекундними фронтами за допомогою створеного автономного резистивного дільника напруги. Проведено комп'ютерне моделювання роботи створеного дільника в різних режимах. Наукова новизна. Показано, що автономний екранований резистивний дільник високої напруги може мати час наростання менше, ніж 1 нс. Установлені величини паразитних параметрів дільника, що викликають викривлення загостреного фронту імпульсів з часом наростання $\approx 0,1$ нс. Практична значущість. Дільник можна застосовувати для вимірювання характеристик високовольтних імпульсів з крутим фронтом (до 1 нс у якості нижньої границі). Бібл. 7, рис. 15.

Ключові слова: дільник напруги, генератор високовольтних імпульсів, комп'ютерне моделювання, електрична схема, час наростання, перехідна характеристика, фронт імпульсу.

Цель. Определение возможности использования разработанного автономного делителя напряжения для измерения высоковольтных импульсов с обостренными фронтами (до 1 нс). Методика. Применена методика определения коэффициента деления делителя при помощи калиброванного генератора и осциллографа. Для определения времени нарастания переходной характеристики делителя использовалась экспериментальная методика на основе генератора высоковольтных импульсов с крутым фронтом и компьютерное моделирование с использованием программы схемотехнического моделирования Micro-Cap. Результаты. Экспериментально получены осциллограммы высоковольтных наносекундных импульсов с субнаносекундными фронтами при помощи созданного автономного резистивного делителя напряжения. Проведено компьютерное моделирование работы созданного делителя в различных режимах. Научная новизна. Показано, что автономный экранированный резистивный делитель высокого напряжения может иметь время нарастания менее 1 нс. Установлены величины паразитных параметров делителя, приводящих к искажению обостренного фронта импульсов с временем нарастания $\approx 0,1$ нс. Практическая значимость. Делитель можно применять для измерения характеристик высоковольтных импульсов с крутым фронтом (до 1 нс как нижней границы). Библ. 7, рис. 15.

Ключевые слова: делитель напряжения, генератор высоковольтных импульсов, компьютерное моделирование, электрическая схема, время нарастания, переходная характеристика, фронт импульса.

Введение. В высоковольтной импульсной технике актуальным является решение проблемы измерения наносекундных перепадов (прежде всего фронтов) импульсов высокого напряжения на различных нагрузках [1-5]. В работе, результаты которой изложены в [6], для измерения рекордных амплитудно-временных характеристик высоковольтных импульсов от генератора в аппарате для широкополосной электромагнитной импульсной терапии (АШЭМИТ) был разработан и опробован компактный автономный резистивный экранированный низкоомный делитель напряжения (АРЭНДН). Устройство генератора описано в [6]. Если генератор в АШЭМИТ работал без использования обострения фронта импульсов, то делитель напряжения передавал ожидаемую форму импульса, в том числе и его фронт ($\approx 2,5$ нс), без искажений. Если же использовался режим работы генератора с обострением фронта импульсов, то делитель вносил существенные искажения на фронте измеряемых импульсов. Для регистрации импульсов от генератора АШЭМИТ использовался аналоговый осциллограф С7-19 с полосой пропускания 5 ГГц. Известно [2], что для удовлетворительного измерения амплитудно-временных характеристик импульсов время нарастания переходной характеристики делителя напряжения (ДН) должно быть заметно короче измеряемой дли-

тельности фронта импульсов. Поскольку обострение фронта импульсов при помощи искровых разрядников – обострителей приводит к укорочению фронта примерно в 10 раз, постольку для измерения импульсов с обостренными фронтами без существенных искажений требуется время нарастания переходной характеристики используемого делителя напряжения должно быть короче 0,2 нс.

Постановка научной проблемы и обоснование ее актуальности с выделением нерешенных задач. В высоковольтной импульсной технике существует проблема измерения амплитудно-временных характеристик высоковольтных импульсов с высокой точностью [1]. Актуальность ее определяется тем, что для различных высоковольтных электротехнологий, для радиолокации, высоковольтных испытаний различного оборудования требуются импульсы высокого напряжения с весьма крутым фронтом (единицы нс и менее) [1-5].

Цель работы – определение возможности использования разработанного автономного делителя напряжения для измерения высоковольтных импульсов с обостренными фронтами (до 1 нс).

Задачи, которые требуется решить для достижения поставленной цели:

- определить время нарастания переходной характеристики созданного автономного компактного резистивного делителя напряжения;
- создать компьютерную модель двухкаскадного резистивного делителя напряжения;
- определить, чем вызвано появление высокочастотных колебаний с большой амплитудой на фронте измеряемых импульсов высокого напряжения с предельно крутым фронтом (0,1 нс);
- определить, возможно ли сочетание короткой переходной характеристики (менее 1 нс) созданного

автономного делителя напряжения с большим коэффициентом деления (более 500).

Схема, устройство делителя и экспериментальные результаты по определению его коэффициента деления и времени нарастания переходной характеристики. Первое упоминание о рассматриваемом в данной статье делителе было в [6]. Электрическая схема делителя приведена на рис. 1.

Согласно измерениям, проведенным при помощи мультиметра M890G, $R_1 = 73,8$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 23,9$ Ом, $R_4 = 1,7$ Ом, $R_5 = 47,2$ Ом с учетом неопределенности (погрешности) в показаниях мультиметра 0,4 Ом.

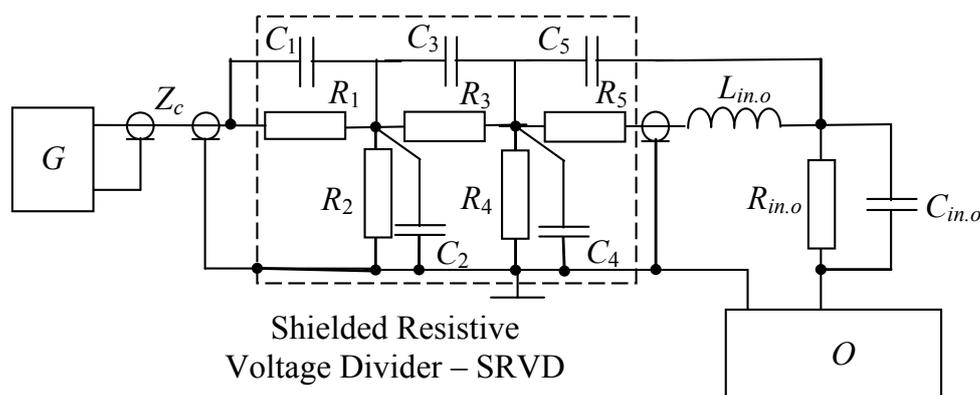


Рис. 1. Электрическая схема системы из генератора G импульсов, резистивного делителя с учетом паразитных емкостей и индуктивности $L_{in.o}$, коаксиального широкополосного соединительного кабеля с волновым сопротивлением $Z_c=100$ Ом и осциллографа с входным сопротивлением $R_{in.o}$, входной емкостью $C_{in.o}$

Делитель разработан и изготовлен автономным, разборным в алюминиевом корпусе. На входе и выходе делителя применены коаксиальные разъемы-розетки CP-50-165ФВ, импульсная электрическая прочность вдоль поверхности изоляции которых определяет предельно допустимое рабочее напряжение делителя. Фото делителя представлены на рис. 2. Делитель выполнен на объемных резисторах ТВО-1,

ТВО-0,5 и ТВО-0,25 и является двухкаскадным. Первый каскад образован сопротивлениями R_1 (высоковольтное плечо первого каскада делителя) и R_2 с подключенной в параллель к нему цепочкой (низковольтное плечо первого каскада делителя), если генератор G подсоединен к делителю так, как на рис. 1, т.е. к 75-омному входу, и имеет коэффициент деления $K_{75.1}$.



Рис. 2. Фото автономного резистивного экранированного низкоомного делителя напряжения (АРЭНДН)

Второй каскад образован сопротивлениями R_3 (высоковольтное плечо второго каскада делителя) и R_4 (низковольтное плечо второго каскада делителя) и имеет коэффициент деления $K_{75.2}$. Сопротивление R_5 в совокупности с остальными сопротивлениями делителя образует согласующее сопротивление, равное волновому сопротивлению 50 Ом коаксиального кабеля, если таковой подключается между выходным разъемом делителя и входом осциллографа. При этом входное сопротивление осциллографа может быть как низкоомным (например, 50 Ом), так и высокоомным (например, 1 МОм): это не приведет к возникновению дополнительных паразитных отражений в кабеле как длинной линии. Полный коэффициент деления дели-

теля может иметь два значения: $K_{75.high}=K_{75.1}K_{75.2}$, если вход осциллографа высокоомный, и $K_{75.low}\approx 2K_{75.1}K_{75.2}$, если вход низкоомный, т.е. входное сопротивление осциллографа $R_{in.o}=50$ Ом. Это позволяет согласовать с обоих концов коаксиальный кабель (если таковой используется) с волновым сопротивлением 50 Ом, соединяющий 50-омный выход делителя с входным сопротивлением осциллографа $R_{in.o}=50$ Ом. Корпус-экран делителя условно можно разделить на пять составных частей: две крайние цилиндрические, присоединенные каждая к своему коаксиальному разъему CP-50-165ФВ, одна центральная цилиндрическая, отделенная от крайних цилиндрических частями двумя дисковыми частями. В одной крайней цилиндриче-

ской части расположено сопротивление $R_1 = 73,8$ Ом. В другой крайней цилиндрической части – сопротивление $R_5 = 47,2$ Ом. В центральной цилиндрической части корпуса расположено сопротивление $R_3 = 23,9$ Ом. В дисковых частях корпуса расположены сопротивления $R_2 = 3,0$ Ом и $R_4 = 1,7$ Ом. Сопротивление R_2 образовано 7-мью резисторами ТВО-0,25 с номинальными сопротивлениями 22 Ом каждый, включенными в параллель (см. фото на рис. 2). Сопротивление R_4 образовано 4-мя резисторами ТВО-0,5 с номинальными сопротивлениями 6,8 Ом каждый, включенными в параллель.

Если не учитывать влияния паразитных индуктивностей и емкостей, то коэффициент деления K_{75high} рассматриваемого делителя при подаче сигнала от генератора импульсов на его 75-омный вход и использовании осциллографа с высокоомным входом можно определить следующим образом (см. схему на рис. 1):

$$K_{75,1} = [R_1 + R_2(R_3 + R_4) / (R_2 + R_3 + R_4)] / [R_2(R_3 + R_4) / (R_2 + R_3 + R_4)];$$

$$K_{75,2} = (R_3 + R_4) / R_4.$$

Тогда:

$$K_{75high} = [R_1 + R_2(R_3 + R_4) / (R_2 + R_3 + R_4)] / [R_2(R_3 + R_4) / (R_2 + R_3 + R_4)] \cdot (R_3 + R_4) / R_4 = [73,8 + 3(23,9 + 1,7)] / (3 + 23,9 + 1,7) \cdot [3(23,9 + 1,7) / (3 + 23,9 + 1,7)] \cdot (23,9 + 1,7) / 1,7 \approx (76,485 / 2,685) \cdot 25,6 / 1,7 \approx 28,5 \cdot 15,1 = 430,35.$$

Таким образом,

$$K_{75high} = K_{75,1} K_{75,2} \approx 28,5 \cdot 15,1 = 430,35.$$

При этом $K_{75low} \approx 2K_{75,1}K_{75,2} \approx 2 \cdot 28,5 \cdot 15,1 = 860,7$.

Вход и выход делителя могут меняться местами, поскольку на входе и выходе установлены одинаковые коаксиальные разъемы СР-50-165ФВ, способные выдерживать импульсные напряжения до 6 кВ. При этом изменяется коэффициент деления делителя.

Коэффициент деления K_{50high} рассматриваемого делителя при подаче сигнала от генератора импульсов на его 50-омный вход и использовании осциллографа с высокоомным входом $K_{50high} = K_{50,1}K_{50,2}$.

$$K_{50,1} = [R_5 + R_4(R_3 + R_2) / (R_2 + R_3 + R_4)] / [R_4(R_3 + R_2) / (R_2 + R_3 + R_4)];$$

$$K_{50,2} = (R_3 + R_2) / R_2.$$

$$K_{50high} = [R_5 + R_4(R_3 + R_2) / (R_2 + R_3 + R_4)] / [R_4(R_3 + R_2) / (R_2 + R_3 + R_4)] \cdot (R_3 + R_2) / R_2 = [47,2 + 1,7(23,9 + 3)] / (3 + 23,9 + 1,7) \cdot [1,7(23,9 + 3) / (3 + 23,9 + 1,7)] \cdot (23,9 + 3) / 3 \approx (48,799 / 1,599) \cdot 26,9 / 3 \approx 30,52 \cdot 8,97 \approx 273,76.$$

Тогда $K_{50low} \approx 2K_{50,1}K_{50,2} \approx 2 \cdot 30,52 \cdot 8,97 = 547,52$, если входное сопротивление осциллографа равно $R_{in.o} = 75$ Ом.

Входные сопротивления делителя выбраны низкоомными, поскольку именно низкоомные резистивные делители напряжения имеют наименьшее время нарастания переходной характеристики [2]. Конкретные значения входных сопротивлений 75 Ом и 50 Ом выбраны, исходя из того, что волновые сопротивления наиболее распространенных на практике коаксиальных кабелей составляют именно 75 Ом и 50 Ом, и входное сопротивление скоростных осциллографов с широкой (более 1 ГГц) полосой пропускания составляет, как правило, 50 Ом.

В качестве генератора при экспериментальном определении коэффициента деления делителя мы использовали калибратор осциллографа С1-74, генерирующий синусоидальные сигналы с известными амплитудно-частотными характеристиками.

Коэффициент деления делителя экспериментально определялся в два этапа. На первом этапе мы определяли коэффициент $K_{75,1}$ деления первого каскада делителя как отношение амплитуды напряжения от калибратора на 75-омном входе делителя к напряжению на низковольтном плече первого каскада делителя. На втором этапе определяли $K_{75,2}$ как отношение амплитуды напряжения от калибратора на входе второго каскада делителя (на последовательно соединенных сопротивлениях R_3 и R_4 , $R_3 + R_4 \approx 25,6$ Ом) к напряжению на низковольтном плече второго каскада делителя (на сопротивлении R_4).

На первом этапе сигнал от калибратора через коаксиальный тройник подавался на 75-омный вход делителя и на вход (1 МОм, 30 пФ) регистрирующего осциллографа С8-13. При этом 50-омный вход (выход) делителя оставался не подключенным к внешним приборам. Таким образом, измерялся сигнал от калибратора на входе делителя. Осциллограмма этого сигнала представлена на (рис. 3).

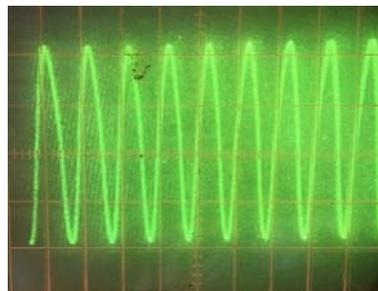


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения от калибратора осциллографа С1-74, нагруженного на входное сопротивление $R_{in} \approx 75$ Ом делителя напряжения (цена деления по оси времени 1 мкс/дел, а по оси сигнала 0,1 В/дел)

После этого измеряли сигнал – напряжение на $R_2 = 3$ Ом в дисковой части корпуса делителя с присоединенной в параллель к R_2 остальной частью делителя – низковольтном плече первого каскада делителя. При этом с делителя напряжения снималась средняя часть корпуса, вход осциллографа С8-13 присоединялся к R_2 при помощи коаксиального кабеля, а 75-омный вход делителя подключался к калибратору отдельным коаксиальным кабелем. Результат измерений в виде осциллограммы напряжения на R_2 – выходе первого каскада данного двухкаскадного делителя представлен на (рис. 4).

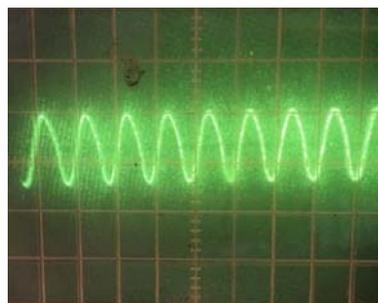


Рис. 4. Импульс напряжения с низковольтного плеча первого каскада делителя напряжения (цена деления по оси времени 1 мкс/дел, а по оси процесса 0,01 В/дел)

Отношение амплитуд напряжения на осциллограммах на рис. 3 и рис. 4 представляет собой экспериментально определенный коэффициент деления $K_{E75.1}$ первого каскада: $K_{E75.1} \approx 27,1$, что, с учетом неопределенности (погрешности) измерений при помощи осциллографов $\approx 10\%$, хорошо согласуется с величиной $K_{75.1} \approx 28,5$, полученной расчетным путем через сопротивления элементов делителя $R_1 \dots R_4$.

На втором этапе напряжение (сигнал) от калибратора через коаксиальный тройник подавалось на вход второго каскада делителя, т.е. на последовательное соединение сопротивлений R_3 и R_4 , и на вход (1 МОм, 30 пФ) регистрирующего осциллографа С8-13. При этом 50-омный вход (выход) делителя оставался не подключенным к внешним приборам, а вывод сопротивления R_3 , исходно соединенный с соответствующими выводами R_1 и R_2 , отсоединялся от точки соединения. Это было сделано для того, чтобы весьма низкоомное сопротивление $R_2 = 3$ Ом не замыкало выход калибратора. Таким образом, измерялся сигнал от калибратора на входе второго каскада делителя. Осциллограмма этого сигнала представлена на (рис. 5). Его амплитуда меньше, чем на осциллограмме на рис. 3, поскольку калибратор в данном случае нагружен на суммарное сопротивление $R_3 + R_4 \approx 25,6$ Ом, существенно меньшее, чем входное сопротивление делителя ≈ 75 Ом, которое являлось нагрузкой калибратора на первом этапе.

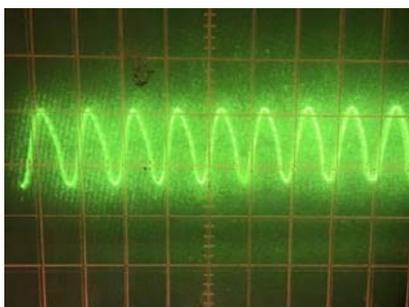


Рис. 5. Импульс напряжения от калибратора осциллографа С1-74 на входе второго каскада делителя (цена деления по оси времени 1мкс/дел, а по оси процесса 0,1 В/дел)

Далее измеряли сигнал – напряжение на $R_4 = 1,7$ Ом (низковольтном плече второго каскада делителя) в дисковой части корпуса делителя. Разъем СР-50 делителя, подсоединенный своим центральным выводом к R_4 через R_5 , к внешним устройствам не подключали. При этом вход осциллографа С8-13 присоединялся к R_4 при помощи коаксиального кабеля, а вход второго каскада делителя подключался к калибратору отдельным коаксиальным кабелем. Результат измерений в виде осциллограммы напряжения на R_4 – выходе второго каскада данного двухкаскадного делителя представлен на (рис. 6).

На рис. 7 приведена осциллограмма напряжения с низковольтного плеча второго каскада делителя для режима, при котором в параллель высокоомному ($R_{in.o} = 1$ МОм) входу осциллографа С8-13 подключалась нагрузка 50 Ом.

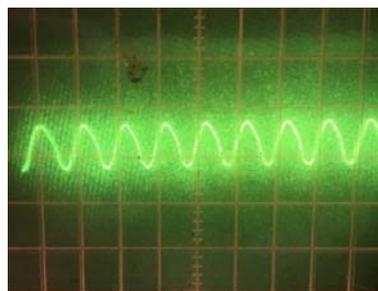


Рис. 6. Импульс напряжения с низковольтного плеча второго каскада делителя напряжения при входном сопротивлении осциллографа $R_{in.o} = 1$ МОм (цена деления по оси времени 1мкс/дел, а по оси процесса 0,01 В/дел)

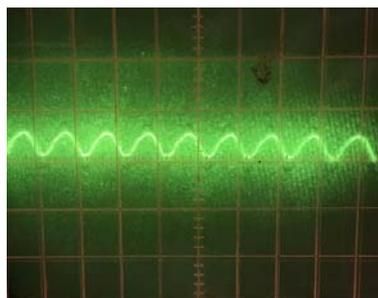


Рис. 7. Импульс напряжения с низковольтного плеча второго каскада делителя напряжения при подключении нагрузки 50 Ом в параллель входному сопротивлению осциллографа $R_{in.o} = 1$ МОм (цена деления по оси времени 1мкс/дел, а по оси процесса 0,01 В/дел)

Из рис. 6 и рис. 7 следует, что подключение нагрузки 50 Ом в параллель входному сопротивлению осциллографа $R_{in.o} = 1$ МОм уменьшает амплитуду напряжения с выхода второго каскада делителя примерно вдвое, т.е. примерно вдвое увеличивает коэффициент деления делителя.

Отношение амплитуд напряжения на осциллограммах на рис. 5 и рис. 6 представляет собой экспериментально определенный коэффициент деления $K_{E75.2}$ второго каскада: $K_{E75.2} \approx 15,5$, что, с учетом неопределенности (погрешности) измерений при помощи осциллографов $\approx 10\%$, хорошо согласуется с величиной $K_{75.2} \approx 15,1$, полученной расчетным путем через сопротивления элементов делителя $R_3 = 23,9$ Ом, $R_4 = 1,7$ Ом.

Таким образом,

$$K_{E75high} = K_{E75.1} K_{E75.2} \approx 27,1 \cdot 15,5 = 420,05;$$

$$K_{E75low} \approx 2 K_{E75.1} K_{E75.2} \approx 840,1;$$

$$K_{75high} / K_{E75high} = K_{75low} / K_{E75low} = 430,35 / 420,05 \approx 1,0245,$$

т.е. относительная погрешность (неопределенность) между расчетным значением и экспериментальным значением коэффициента деления для данного делителя не превышает 2,5%.

Определение времени нарастания переходной характеристики делителя в эксперименте. Есть два основных варианта определения времени нарастания в передающей системе [2]. Первый вариант подразумевает под временем нарастания отрезок времени, в течение которого измеряемая величина (например, напряжение) возрастает от 0,1 до 0,9 своего максимального значения. Во втором варианте время нарастания – время, в течение которого выходной сигнал достигает определенного процента от установившегося значения при подаче на вход системы прямоуголь-

ного импульса или скачка напряжения $u_1(t)$ данной амплитуды U_0

$$u_1(t) = U_0 1(t),$$

где $1(t)$ – единичная функция:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Если скачок возникает спустя отрезок времени τ после начала отсчета, то единичная функция равна нулю при $t < \tau$, равна единице при $t \geq \tau$ и обозначается $1(t - \tau)$ [7].

Напряжение $u_1(t)$ вызывает появление на выходе системы (в нашем случае на выходе делителя напряжения, подключенного к входу осциллографа и согласованного с ним) напряжения $u_2(t)$ – реакции на прямоугольный импульс. При этом безразмерная функция времени

$$h(t) = u_2(t) / U_0 \quad (1)$$

называется переходной функцией или временной характеристикой системы [2, с. 39], а также переходной характеристикой цепи. [7, с. 116].

В нашем случае $h(t)$ представляется в виде осциллограмм. При этом напряжение на выходе делителя $u_2(t)$ можно определить при помощи интеграла Дюамеля как реакцию на входной сигнал $u_1(t)$ любой формы [2, с. 40]:

$$u_2(t) = u_1(+0)h(t) + \int_{\tau=0}^{\tau=t} u_1'(t - \tau)h(\tau)d\tau. \quad (2)$$

Поскольку в нашем случае длительность фронта импульсов от генератора, как при использовании обострения, так и без обострения, гораздо меньше времени полуспада (спада до половины амплитуды импульса) ≈ 50 нс, постольку в первом приближении импульс от генератора можно рассматривать как скачок напряжения (прямоугольный импульс). Поэтому производную $u_1'(t - \tau)$ по времени в (2) можно принять равной нулю, поскольку сама функция u_1 имеет только два значения (две константы): 0 при $t < \tau$ и 1 при $t \geq \tau$ (учитывая пределы интегрирования – при $t = \tau$), а формулу (2) – упростить до:

$$u_2(t) = u_1(+0)h(t). \quad (3)$$

Если учесть, что $u_1(+0) = U_0$ в (1), то (2) полностью соответствует (1).

На рис. 8 приведены осциллограммы импульсов напряжения с выхода исследуемого делителя напряжения, подключенного к входу осциллографа С7-19, имеющего полосу пропускания 5 ГГц и входное активное сопротивление 50 Ом.

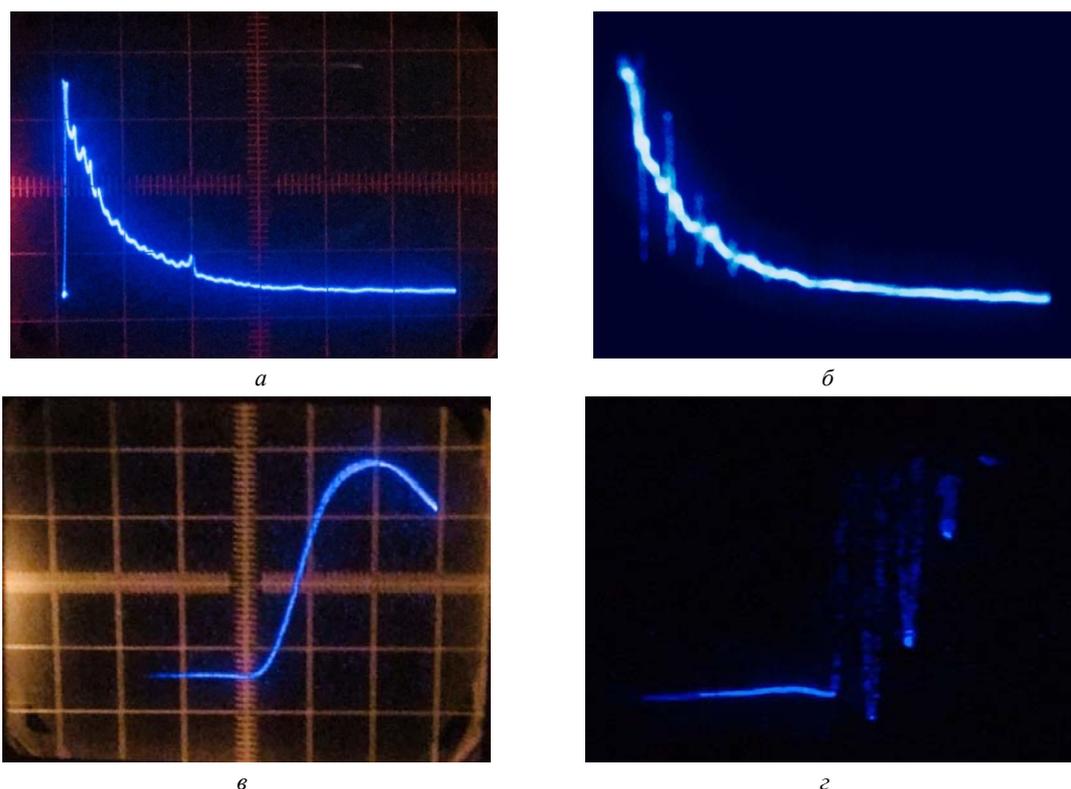


Рис. 8. Осциллограммы импульсов в целом и фронтальной части импульсов от генератора, измеренных делителем и зарегистрированных осциллографом С7-19: а, в – без обострения фронта импульсов; б, г – с использованием обострения фронта.

На осциллограммах а, б цена деления по оси времени 100 нс/дел и 50 нс/дел соответственно, на осциллограммах в, г цена деления по оси времени 2,5 нс/дел. Цена деления по оси процесса 1,5 В/дел на всех осциллограммах, коэффициент деления делителя $K_{75low} \approx 860,7$

Фронт импульсов от высоковольтного генератора [6] без обострения составляет $\approx 2,5$ нс. Его делитель передает без искажений (см. осциллограмму на рис. 8,а). Из осциллограмм на рис. 8,б и рис. 8,г вид-

но, что при обострении (существенном укорочении) фронта импульса от генератора на нем (на фронте) возникают паразитные колебания. Эти колебания возбуждаются в данном резистивном делителе напряже-

ния, содержащем паразитные емкости и индуктивности, обостренным (субнаносекундным) фронтом импульсов от генератора. Осциллограмма на рис. 8,2 показывает, что первый всплеск напряжения при обострении фронта измеряемых и регистрируемых импульсов существенно круче, чем при отсутствии обострения, и по времени нарастания составляет $\leq 0,5$ нс.

Для проверки экспериментальных результатов и выяснения, какие именно паразитные емкости и индуктивности в делителе в наибольшей степени влияют на его переходную характеристику (функцию), было проведено компьютерное моделирование работы резистивного делителя напряжения с учетом его паразитных параметров. Учтено также наличие широкополосного коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 100 Ом и электрической длиной 5-10 нс между выходом генератора высоковольтных импульсов и входом делителя.

Компьютерное моделирование работы делителя. Схема, по которой осуществлялось моделирование работы делителя при подаче на его 75-омный вход импульсов напряжения с различными длительностями фронтов от генератора через коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 100 Ом и электрической длиной 5 нс, приведена на рис. 9. Значения

величин в элементах схемы варьировались. От схемы на рис. 1 она отличается учетом паразитных индуктивностей в делителе. На схеме (рис. 9) генератор импульсов имеет следующие характеристики. Амплитуда импульсов 5 условных единиц (например, 5 кВ). Задержка перед началом импульса 10 нс. Длительность (время нарастания) фронта импульсов от генератора составляет 0,1 нс. Длительность спада импульсов от генератора составляет 1000 нс. Ширина импульсов (полка на вершине) 100 нс. Период следования импульсов от генератора 5000 нс. Регистрирующий осциллограф С7-19 на схеме представлен входным активным сопротивлением $R_6=50$ Ом и включенной в параллель с R_6 входной емкостью $C_1=15$ пФ. Паразитная индуктивность L_3 в месте подключения выхода делителя к входу осциллографа при моделировании варьировалась в диапазоне $L_3=0,1 \dots 10,0$ нГн, а L_1 – в диапазоне $L_1 = 0,5 \dots 10,0$ нГн. Величины индуктивностей L_1 и L_3 оказывают существенное влияние на форму фронтальной части импульсного напряжения на выходе делителя, подсоединенном к входу осциллографа.

Максимальная длительность шага при моделировании в Microcap-10 составляла 0,001 нс, количество точек по времени 100000.

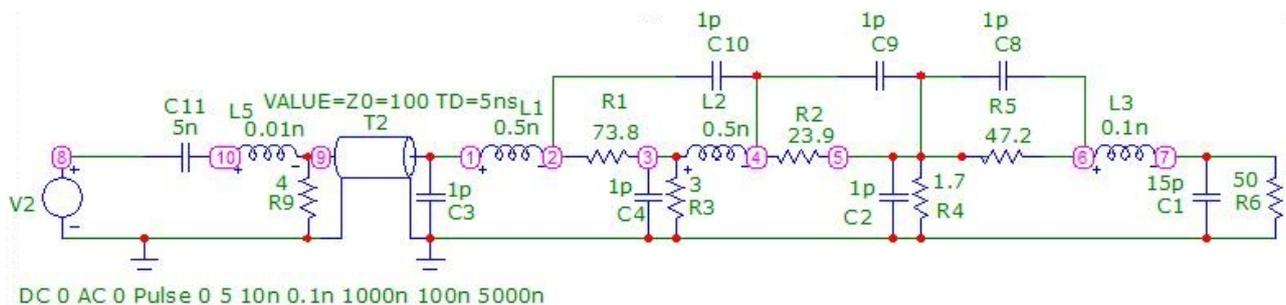


Рис. 9. Схема для компьютерного моделирования работы делителя напряжения

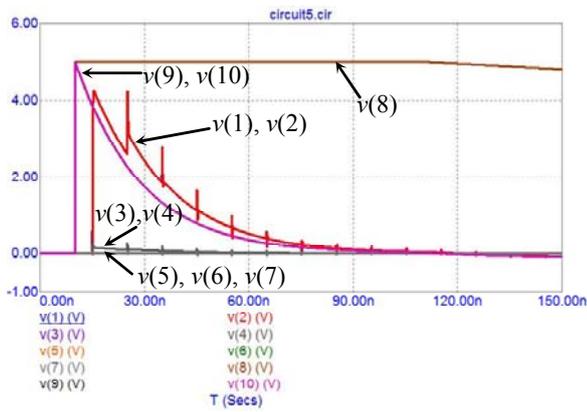
Результаты моделирования по схеме (рис. 9) приведены на рис. 10. На рис. 10,а амплитуда напряжения $v(1)$ и $v(2)$ в точках 1 и 2 меньше, чем амплитуда $v(8)$, $v(9)$ и $v(10)$, потому что волновое сопротивление $Z_0=100$ Ом кабельной линии T_2 больше входного сопротивления (≈ 75 Ом) делителя. Коэффициент $K_{75,1}$ деления первого каскада делителя можно определить из графиков на рис. 10,а,б, как $K_{75,1} \approx v_{\max}(1)/v_{\max}(3) \approx 4270/150 \approx 28,5$ без учета выброса, что соответствует приведенному выше расчетному значению $K_{75,1}$. Из графиков рис. 10,б,г, аналогично определяем $K_{75,2} \approx v_{\max}(3)/v_{\max}(5) \approx 150/9,95 \approx 15,1$, что также соответствует расчетному значению $K_{75,2}$.

Регулярные всплески с периодом следования 10 нс на графике (рис. 10,а) переходного процесса по напряжению в точке 2 (на 75-омном входе делителя) при фронте импульса от генератора 0,1 нс вызваны наличием продольной емкости в делителе $1/(1/C_8+1/C_9+1/C_{10}) = 0,33$ (пФ). Период следования определяется электрической длиной 5 нс кабеля T_2 и равен двойному времени пробега волны напряжения от генератора по кабелю до входа делителя. Аналогичные всплески наблюдались на осциллограммах с осциллографа С7-19. Только период этих всплесков

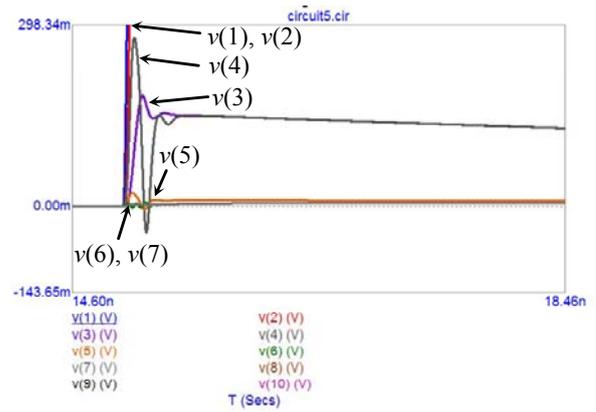
был больше (примерно 20-25 нс) из-за большей длины кабеля. Если продольную емкость в делителе при моделировании уменьшить на порядок – до 0,033 пФ, то всплески по амплитуде резко уменьшаются, становятся малозаметными. Всплески также уменьшаются при увеличении длительности фронта импульсов от генератора, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 8).

Номера, представленные на рис. 9, – это номера точек, в которых при моделировании измерялось напряжение (напряжение между данной пронумерованной точкой схемы и заземленной точкой схемы - корпусом делителя). Фильтр $C_{11}-L_5-R_9$ обеспечивает на сопротивлении R_9 , к которому подключен вход коаксиального кабеля с волновым сопротивлением $Z_0 = 100$ Ом и электрической длиной 5 нс, форму импульса в виде спадающей экспоненты с крутым фронтом. Если в схеме на рис. 9 принять $C_1 = 5$ пФ вместо 15 пФ, то амплитуда (размах) колебаний в точке 6 на входе в осциллограф несколько уменьшается, а отрицательные выбросы в колебаниях исчезают, что демонстрируют кривые на рис. 10,г и рис. 11.

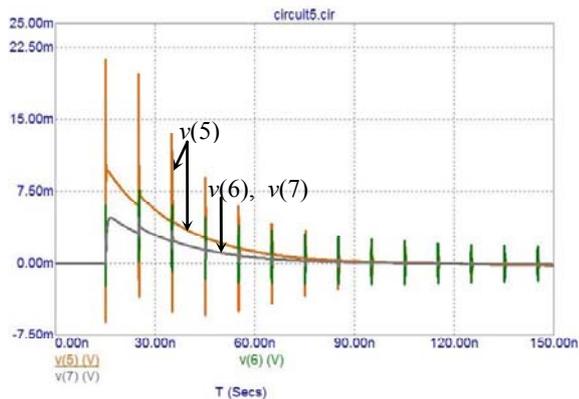
Согласно [2, с. 49] $t_f \approx 0,35/B$, где B – ширина полосы пропускания, определяемая затуханием 3 дБ,



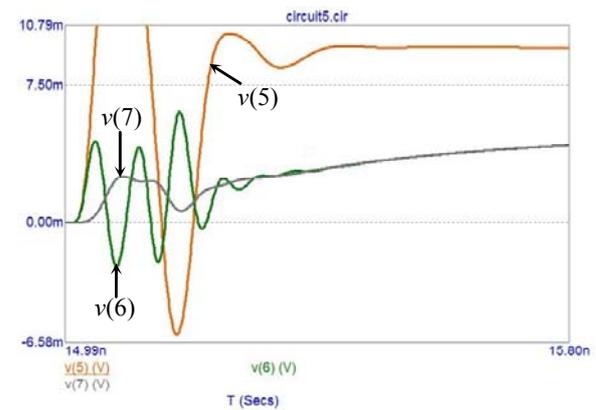
a



b



c



d

Рис. 10. Результаты моделирования переходного процесса в схеме на рис. 9

t_f – время нарастания для исследуемой системы, в нашем случае для исследуемого низкоомного резистивного делителя напряжения или для регистрирующего осциллографа. Поэтому для осциллографа C7-19 с полосой пропускания 5 ГГц длительность фронта t_f импульсов, которую он передает без существенных искажений, $t_f \approx 0,35/5$ ГГц = 0,07 нс.

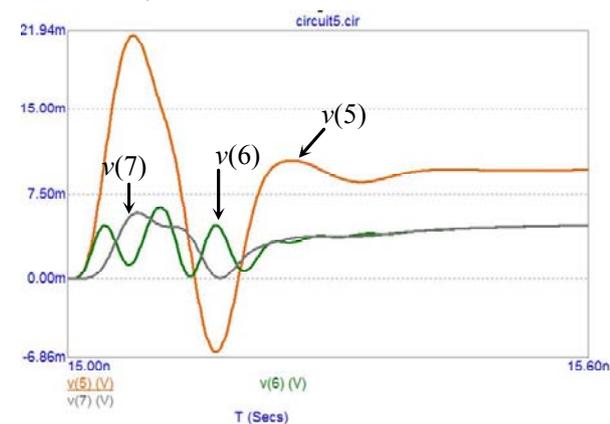


Рис. 11. Напряжение на выходе делителя по схеме на рис. 9 при $C1 = 5$ пФ

Если в схеме на рис. 9 увеличить $L3$ с 0,1 нГн до 0,5 нГн, то амплитуда колебаний в точке 6 на фронте импульсов от генератора возрастает примерно в 2,5 раза, что иллюстрирует результат моделирования на рис. 12.

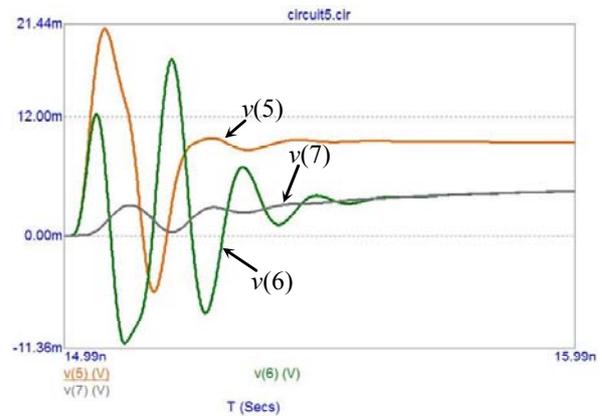


Рис. 12. Колебания на выходе делителя по схеме на рис. 9 при $L3 = 0,5$ нГн

При данных условиях моделирования колебания в точке 6 на фронте затухают за $\approx 0,6$ нс, что меньше, чем в эксперименте (см. рис. 8,2).

Если в схеме моделирования на рис. 9 задать длительность фронта импульсов от генератора не 0,1 нс, а 2,5 нс, что соответствует работе реального генератора импульсов в режиме без обострения фронта, то в результате моделирования получим зависимости напряжения от времени в различных точках схемы, представленные на рис. 13.

Небольшие колебания в виде всплесков и впадин при длительности фронта 2,5 нс вызваны изломами в исходном импульсе от генератора: в начале импульса и при переходе от фронта к плоской вершине.

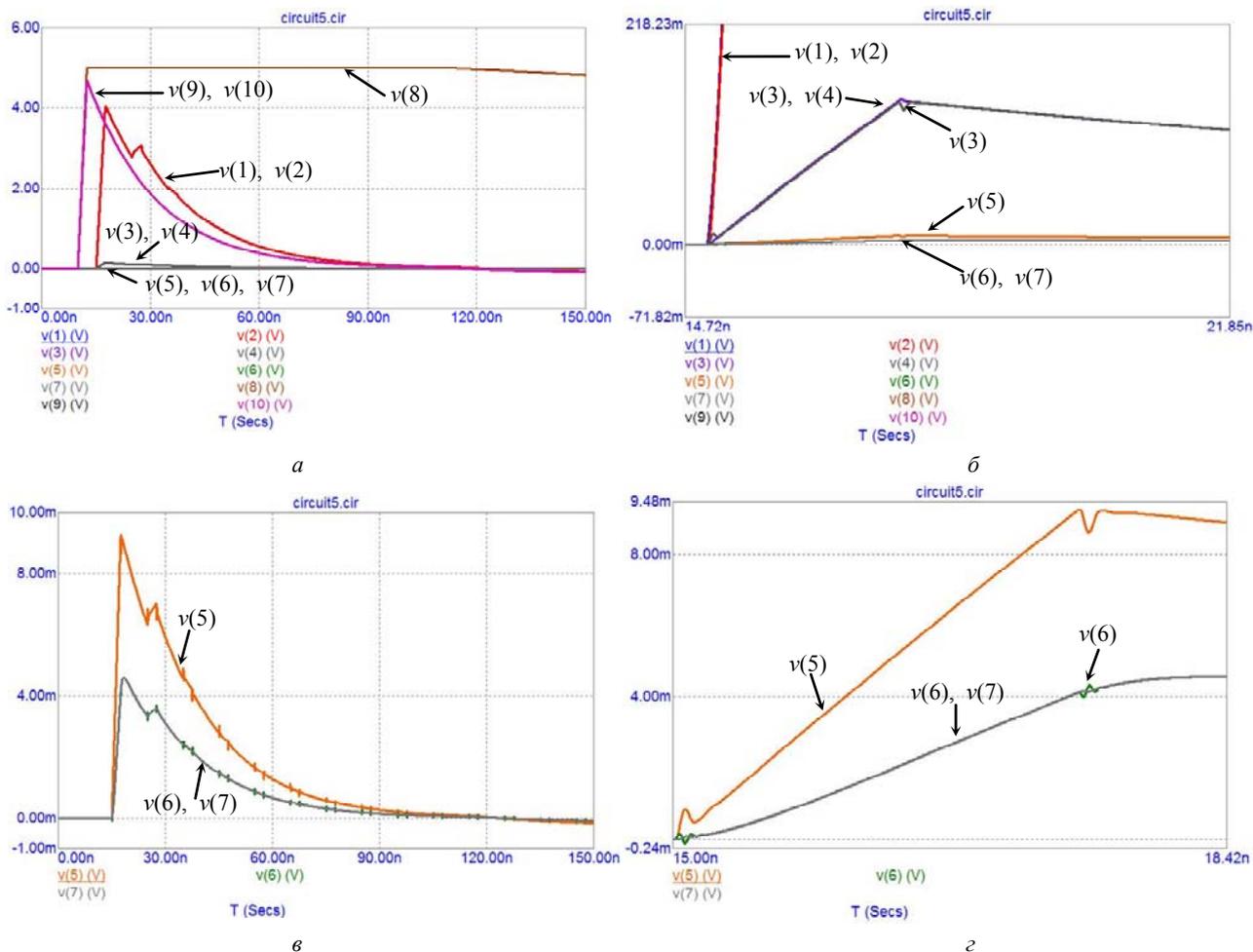


Рис. 13. Результаты моделирования переходного процесса по схеме на рис. 9 при длительности фронта импульсов от генератора 2,5 нс

Наиболее сложным при моделировании работы делителя оказалось моделирование при предельно коротких временах нарастания фронта от генератора импульсов, вызывающих появление на фронтальной части осциллограмм с выхода делителя высокочастотных колебаний (см. рис. 8,2).

Задача усложнялась тем, что длительность фронта импульсов от генератора при экспериментах в режиме обострения неизвестна. Ясно было только то, что чем короче фронт от генератора, тем больше амплитуда колебаний на осциллограммах с выхода делителя.

Эксперименты показали, что амплитуда этих колебаний достигает удвоенного значения по сравнению с амплитудой напряжения с выхода делителя в режиме без обострения фронта. Подбор величин паразитных индуктивностей и емкостей делителя при моделировании колебаний на фронтальной части в режиме обострения фронта импульсов позволил достичь хорошего совпадения результатов моделирования с экспериментальными результатами (см. рис. 8,2). Схема, позволившая смоделировать колебания на фронте обостренного импульса, представлена на рис. 14, а результаты моделирования – на рис. 15. Фронтальная часть смоделированного импульса, близкая к таковой в эксперименте при использовании режима обостре-

ния, получена при длительности фронта 0,1 нс исходного импульса от генератора в схеме моделирования. Значит, в режиме обострения длительность фронта от генератора в эксперименте была также $\approx 0,1$ нс.

При моделировании не учтены процессы в делителе как в длинной линии, которые приводят к возникновению высших типов электромагнитных волн при возбуждении длинной линии импульсами с крутыми фронтами, длительность которых соизмерима или меньше электрической длины линии (в нашем случае – делителя напряжения). При длительности фронта импульсов 0,1 нс соответствующая ей длина пробега электромагнитной волны в воздухе составляет 3 см, а длина делителя составляет 18 см. Поэтому в нем возникновение волн высших типов реально. Этим можно объяснить несколько большую интенсивность колебаний на фронте обостренного импульса на выходе делителя в эксперименте (по сравнению с результатами компьютерного моделирования).

Таким образом, компьютерное моделирование позволило уточнить длительность фронта импульсов от высоковольтного генератора, используемого в эксперименте, в режиме обострения и оценить количественно величины паразитных индуктивностей и емкостей в рассматриваемом делителе. В частности величина моделируемой паразитной индуктивности на

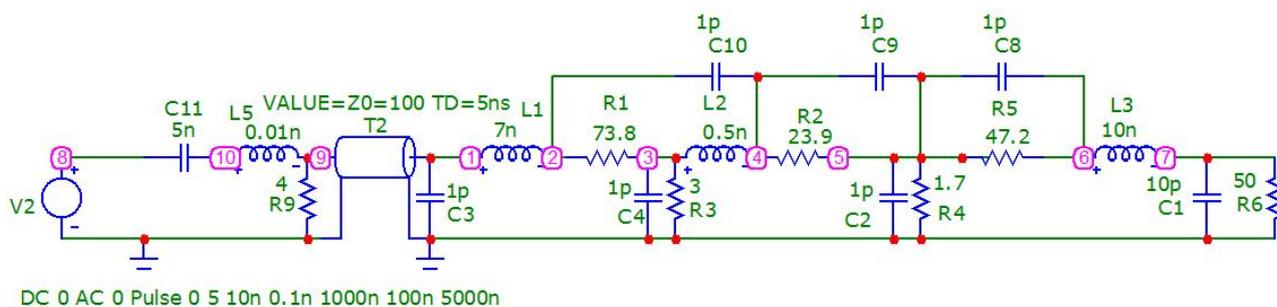


Рис. 14. Схема с паразитными индуктивностями и емкостями делителя, обеспечившими результаты моделирования фронта импульсов на выходе делителя, наиболее близкие к экспериментальным

входе делителя составила $L1 = 7$ нГн, а на выходе делителя $L3 = 10$ нГн. При этом время нарастания фронта импульса напряжения $v(7)$ на RC-входе осциллографа ($R6 = 50$ Ом, $C1=10$ пФ на рис. 14 в точке 7) составило примерно $0,7$ нс (см. рис. 15 б),

тогда как время нарастания фронта импульса напряжения $v(7)$ от генератора в точке 8 составляет $0,1$ нс. Отсюда следует, что время нарастания переходной характеристики делителя составляет $\approx 0,7$ нс.

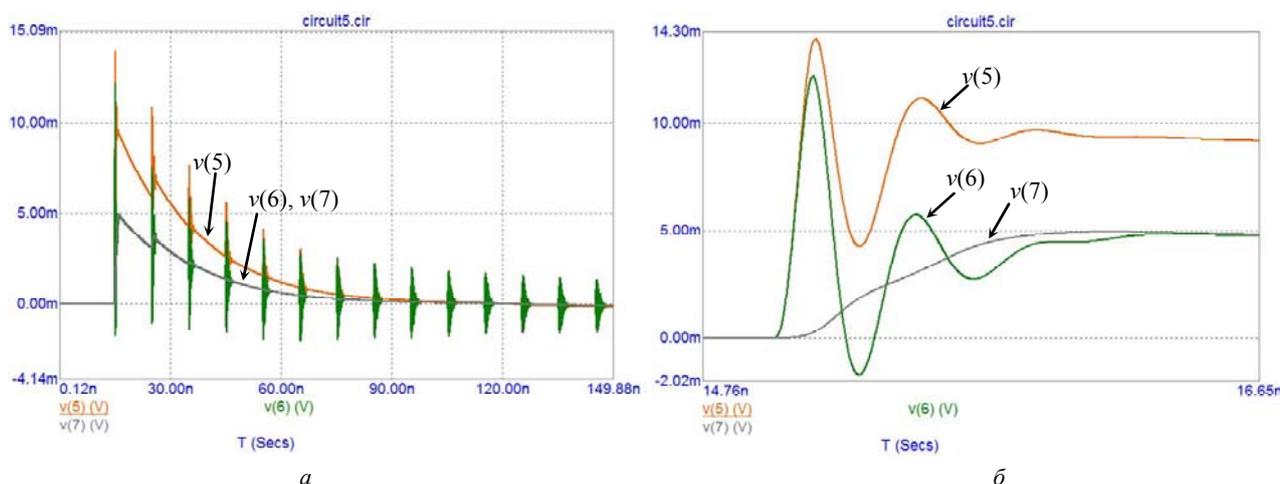


Рис. 15. Результаты моделирования переходного процесса на выходе делителя, близкие к экспериментальным результатам; а – импульса в целом, б – фронтной части импульса

Моделирование показало, что учитывать влияние паразитных емкостей и индуктивностей в исследуемом делителе при субнаносекундных и еще более коротких временах нарастания импульсов на входе делителя следует обязательно.

Выводы.

1. Теоретически (при помощи компьютерного моделирования) обосновано и экспериментально подтверждено, что разработанный делитель напряжения с временем нарастания переходной характеристики $\approx 0,7$ нс позволяет измерять высоковольтные импульсы с крутым фронтом (до 1 нс в качестве нижней границы) и обеспечивает коэффициент деления $K_{75low} \approx 861$ при использовании 75-омного входа делителя и при входном сопротивлении осциллографа, равном 50 Ом ($K_{50low} \approx 548$ при использовании 50-омного входа делителя и при входном сопротивлении осциллографа, равном 75 Ом).

2. Создана компьютерная модель ДН, при помощи которой удалось объяснить наличие в эксперименте колебаний с амплитудой, в два раза превышающей амплитуду импульсов согласно коэффициенту деле-

ния делителя, на фронте импульсов с выхода делителя. Эти колебания (возникающие при подаче на вход делителя импульсов с весьма крутым фронтом $\approx 0,1$ с) вызваны наличием в делителе паразитной продольной емкости $\approx 0,3$ пФ и паразитных индуктивностей, суммарная величина которых $\approx 17,5$ нГн).

3. Данный делитель можно рекомендовать для измерения характеристик высоковольтных импульсов с крутыми (наносекундными) фронтами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. – Перевод с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
3. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering (Fundamentals). Second edition. – Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 2000. – 539 p.
4. Parks H. High-Voltage Divider Calibration with the Reference Step Method // NCSLI Measure. – 2016. – vol.11. – no.1. – pp. 34-36. doi: 10.1080/19315775.2016.1149008.
5. Early M.D., Sira M., Andersson B.-O., Christian L.A., Gunnarsson O., Rydler K.-E., Streit J. A Simple Build-Up Method

for the DC Voltage Scale of a Source // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2013. – vol.62. – no.6. – pp. 1600-1607. doi: 10.1109/TIM.2012.2230734.

6. Бойко Н.И., Сафронов И.А., Тондид Л.Д. АШЭМИТ – аппарат для широкополосной электромагнитной импульсной терапии // Приборы и техника эксперимента. - 2000. - №5. - С. 101-108. doi: 10.1007/bf02759082.

7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – СПб.: Питер, 2004. – 576 с.

REFERENCES

1. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
2. Shvab A. *Izmereniia na vysokom napriazhenii. Izmeritel'nye pribory i sposoby izmereniia* [Measurements at high voltage. Measuring instruments and methods of measurement]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 264 p. (Rus).
3. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. *High Voltage Engineering (Fundamentals). Second edition.* Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 2000. 539 p.
4. Parks H. High-Voltage Divider Calibration with the Reference Step Method. *NCSLI Measure*, 2016, vol.11, no.1, pp. 34-36. doi: 10.1080/19315775.2016.1149008.
5. Early M.D., Sira M., Andersson B.-O., Christian L.A., Gunnarsson O., Rydler K.-E., Streit J. A Simple Build-Up Method for the DC Voltage Scale of a Source. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol.62, no.6, pp. 1600-1607. doi: 10.1109/TIM.2012.2230734.
6. Boyko N.I., Safronov I.A., Tondii L.D. ASHEMIT: A device for wideband electromagnetic pulse therapy. *Instruments and Experimental Techniques*, 2000, vol.43, no.5, pp. 675-682. doi: 10.1007/bf02759082.
7. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: V 3-kh t. Uchebnyk dlia vuzov. Tom 2* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols. Vol.2.]. St. Petersburg, Piter Publ, 2004. 576 p. (Rus).

Поступила (received) 27.02.2019

Бойко Николай Иванович¹, д.т.н., проф.,

Семкин Сергей Олегович¹, магистрант,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 57 7076245, e-mail: qnaboyg@gmail.com

M.I. Boyko¹, S.O. Syomkin¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kurpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Investigation of amplitude-temporal characteristics of a high-voltage resistive voltage divider.

Purpose. Determination of the possibility of using the developed autonomous voltage divider for measuring high-voltage pulses with sharpened fronts (down to 1 ns). **Methodology.** We use the technique to determine the division ratio of the divider using a calibrated oscillator and oscilloscope. To determine the rise time of the transition characteristic of the divider, we use an experimental technique based on a high-voltage pulse generator with a steep front and computer simulation using circuit program Micro-Cap. **Results.** Oscillograms of high-voltage nanosecond pulses with subnanosecond fronts are experimentally obtained using an autonomous resistive voltage divider. A computer simulation of the operation of the created divider in various modes is carried out. **Originality.** We have shown that an autonomous shielded resistive high-voltage voltage divider can have a rise time less than 1 ns. The values of the parasitic parameters of the divider, which lead to a distortion of the sharpened pulse front with a rise time of ≈ 0.1 ns, are established. **Practical value.** The divider can be used to measure the characteristics of high-voltage pulses with a steep front (up to 1 ns as the lower limit). References 7, figures 15.

Key words: voltage divider, high-voltage pulse generator, computer simulation, electrical circuit, rise time, transient response, pulse front.