

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

© 2011 г. Ю. И. Исакова, А. И. Пушкарев, Г. Е. Холодная

*Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

Поступила в редакцию 19.08.2010 г.

Представлена конструкция и приведены основные расчетные формулы и результаты тестирования малогабаритного высоковольтного дифференциального делителя напряжения. Получены условия, определяющие корректность использования делителя для измерения наносекундных высоковольтных сигналов. Показано, что дифференциальный делитель напряжения имеет ограничения в области низких и высоких частот. Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 с параметрами: ускоряющее напряжение 350–450 кВ, длительность импульса по основанию 100 нс, длительность фронта <5 нс, полная энергия электронов в импульсе до 250 Дж. Частота следования импульсов составляла 1–3 импульса/с. Для восстановления формы измеряемого напряжения необходимо интегрирование сигнала с выхода делителя напряжения. Погрешность измерения не превышает  $\pm 10\%$ .

Использование импульсного электронного пучка для инициирования плазмохимических процессов, накачки газовых лазеров, генерации с.в.ч.-излучения и в других областях требует разработки экономичного электронного ускорителя, обладающего большим ресурсом работы и высокой стабильностью рабочих параметров. Одним из основных параметров, который необходимо контролировать при работе импульсного ускорителя электронов, является выходное напряжение. В настоящее время разработаны различные устройства для измерения импульсов высокого напряжения малой длительности, но наибольшее распространение получили емкостные делители напряжения. Они имеют более широкую полосу пропускания, чем резистивные или смешанные делители [1, 2], что очень важно при измерении электрических сигналов с длительностью фронта <2–3 нс.

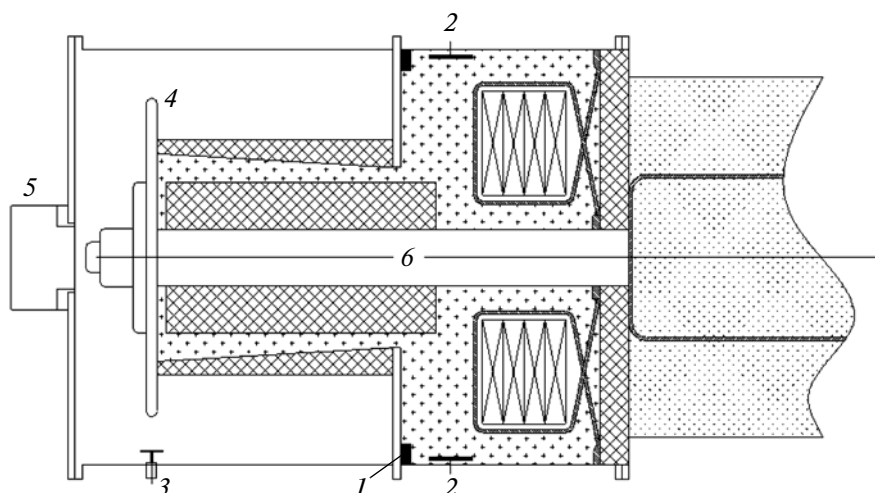
Для корректного измерения формы высоковольтного сигнала постоянная времени емкостного делителя должна значительно превышать длительность импульса. Обычно нагрузкой емкостного делителя является волновое сопротивление кабеля, равное 50 Ом. Поэтому для импульсов длительностью >100 нс емкость делителя на корпус должна превышать 20–25 нФ, что достигается только при большой площади электрода. Если такой делитель разместить в вакуумном объеме диодной камеры электронного ускорителя, то даже незначительные потери электронов при распылении пучка приводят к большим помехам сигнала с делителя.

Для устранения распыления электронов и устранения искажения сигнала с выхода емкостного делителя авторы работы [3] используют ведущее магнитное поле. В импульсном ускорителе ТЭУ-500 [4] делитель размещен в масляном объеме. Он регистрирует сумму напряжения на анод-катодном зазоре диода и падения напряжения на паразитной индуктивности катододержателя. Для расчета падения напряжения на индуктивности необходимо измерять полный ток диодного узла, что усложняет измерения.

В работе [5] предложена конструкция малогабаритного дифференциального емкостного делителя напряжения, сигнал с которого пропорционален производной измеряемого напряжения. Для восстановления формы напряжения необходимо интегрирование выходного сигнала. Малая площадь электрода позволяет значительно снизить негативное влияние паразитных электронов и измерять потенциал катода в вакуумном объеме. Экспериментальные исследования, приведенные в работе [6], показали хорошую точность измерения формы высоковольтных импульсов напряжения длительностью 200 нс и фронтом >30 нс. Цель представленной работы – расчет частотного диапазона дифференциального делителя напряжения и экспериментальное тестирование делителя при измерении высоковольтного импульса напряжения с фронтом <5 нс.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 [4] с парамет-



**Рис. 1.** Диагностическое оборудование импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500: 1 – пояс Роговского; 2 – емкостный делитель; 3 – дифференциальный делитель напряжения; 4 – потенциальный диск диода; 5 – цилиндр Фарадея; 6 – катододержатель.

рами: ускоряющее напряжение 350–450 кВ, длительность импульса по основанию 100 нс, полная энергия электронов в импульсе до 250 Дж. Отличительной особенностью конструкции ускорителя является использование повышающего трансформатора, включенного между двойной формирующей линией и диодом.

Для измерения тока, протекающего в нагрузке наносекундного генератора, использовали пояс Роговского с обратным витком (см. рис. 1), для измерения напряжения – емкостный делитель 2, расположенный в маслonaполненной камере [7]. Делитель состоит из емкостей электрода на катододержателе 6 и на корпус камеры. Электрод выполнен из медной полосы и расположен вокруг катододержателя. Он изолирован от корпуса лавсановой пленкой толщиной 50 мкм и имеет емкость 22 нФ. При нагрузке емкостного делителя 50 Ом (волновое сопротивление кабеля) постоянная времени составляет 1100 нс, что обеспечивает снижение напряжения емкости делителя за длительность импульса (100 нс по основанию) на величину не более 7%. Расчет напряжения на диоде выполнен по соотношению, учитывающему падение напряжения на индуктивности диодного узла  $L$ :

$$U = U_{\text{емк}} - L \frac{dI}{dt}.$$

Величину индуктивности при расчетах принимали равной 160 нГн, и она получена при калибровке диодного узла в режиме короткого замыкания.

Для измерения напряжения дополнительно использовали дифференциальный делитель напряжения, расположенный в диодной камере. В

нашей конструкции диаметр электрода дифференциального делителя равен 20 мм, зазор между потенциальным диском диода и электродом делителя составляет 87 мм, между электродом и корпусом – 13 мм. Емкость дифференциального делителя относительно корпуса не превышает 0.1 пФ.

Диодная камера откачивалась паромасляным диффузионным насосом до давления 0.01–0.02 Па. Вакуум в диодной камере контролировали в процессе измерений магнитным электроразрядным манометрическим преобразователем и вакуумметром ВМБ-8. Высокая скорость откачки вакуумной системы обеспечивала восстановление вакуума в диодной камере за время между импульсами. Электрические сигналы, поступающие с датчиков, регистрировали осциллографом Tektronix 3052B (500 МГц,  $5 \cdot 10^9$  отсчетов/с). Погрешность синхронизации электрических сигналов не превышала 0.4 нс. Точность измерения напряжения не хуже 10%. Конструкция диодного узла, расположение и калибровка диагностического оборудования подробно изложены в работе [8].

## РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для определения частотного диапазона и критерия применимости дифференциального делителя напряжения рассмотрим его эквивалентную схему, представленную на рис. 2. При малой величине  $C_1$  в параллельной цепи  $R-C_1$  влиянием паразитной емкости  $C_1$  дифференциального делителя напряжения можно пренебречь. Это выполняется при условии

$$\omega RC_1 \ll 1. \quad (1)$$

Сопротивление нагрузки дифференциального делителя выбираем равным волновому сопротив-

лению кабеля (50 Ом) для устранения паразитных отраженных сигналов. При выполнении условия (1) напряжение на выходе дифференциального делителя равно

$$U_R(t) = i(t)R.$$

Ток в цепи делителя  $i(t)$  можно записать в виде

$$i(t) = C \frac{dU_C}{dt},$$

где  $U_C$  – падение напряжения на емкости  $C$ .

Тогда напряжение на выходе делителя

$$U_R(t) = RC \frac{dU_C}{dt}. \quad (2)$$

Напряжение на емкости делителя равно  $U_C = U(t) - U_R(t)$ , и из соотношения (2) получим уравнение

$$U_R(t) = RC \frac{d}{dt}[U(t) - U_R(t)] = RC \frac{dU(t)}{dt} - RC \frac{dU_R(t)}{dt},$$

а после его преобразования –

$$\frac{dU(t)}{dt} = \frac{1}{RC} U_R(t) + \frac{dU_R(t)}{dt}. \quad (3)$$

При очень большой емкости дифференциального делителя на потенциальный диск катодного узла первым слагаемым в (3) можно пренебречь, тогда  $U(t) = U_R(t)$ .

В противоположном случае, при выполнении условия

$$\frac{dU_R}{dt} \ll \frac{1}{RC} U_R \quad \text{или} \quad K = \frac{RC}{U_R} \frac{dU_R}{dt} \ll 1 \quad (4)$$

из (3) получим уравнение, связывающее измеряемое напряжение с регистрируемым на выходе дифференциального делителя:

$$U(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_R(t) dt. \quad (5)$$

Важно отметить, что дифференциальный делитель напряжения имеет ограничения в области низких и высоких частот. При смещении частотного спектра измеряемого сигнала в область низких частот амплитуда напряжения на выходе делителя будет снижаться. При этом искажение формы сигнала будет вызвано помехами, формируемыми высоковольтными узлами ускорителя. При увеличении крутизны фронта и снижении длительности импульса условие (4) будет нарушаться и расчет измеряемого сигнала нужно проводить по уравнению (3). Для конкретных конструкций высоковольтного генератора импульсов напряжения и дифференциального делителя нужно рассчитывать критерий по одному из условий (4).

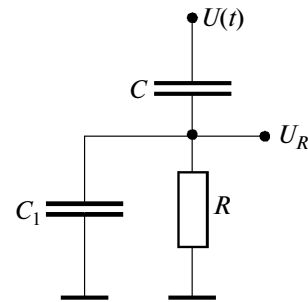


Рис. 2. Полная эквивалентная схема дифференциального делителя напряжения.  $C, C_1$  – емкости электрода делителя на потенциальный диск катодного узла и на корпус камеры соответственно,  $R$  – сопротивление нагрузки,  $U(t)$  – измеряемое напряжение,  $U_R$  – напряжение на выходе дифференциального делителя.

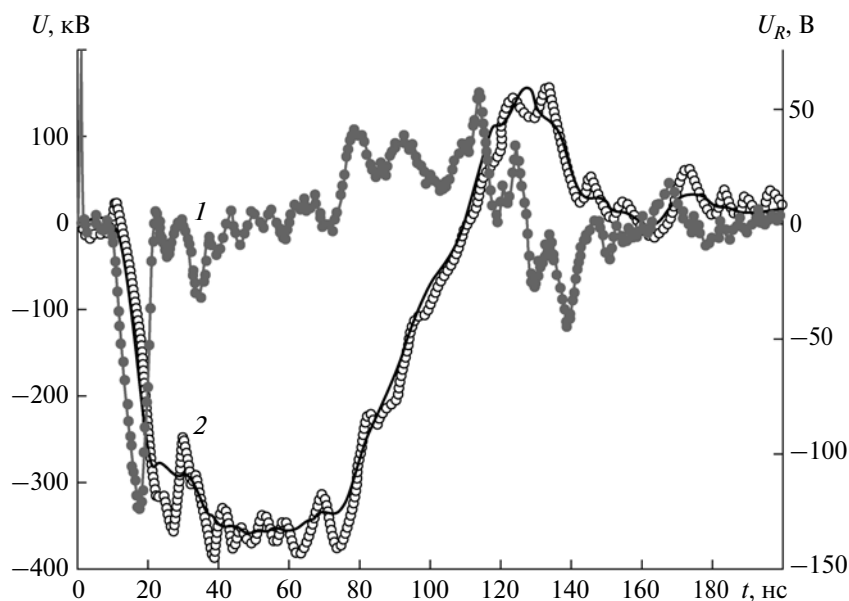
## ТЕСТИРОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Исследования дифференциального делителя напряжения были выполнены на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500. На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения, регистрируемые осциллографом с емкостного и дифференциального делителей напряжения. Осциллограммы усреднены по 10 импульсам, следующим с частотой 1 импульс/с после тренировки катода 10–20 импульсами. Длительность фронта импульса напряжения превышает 5 нс (см. рис. 3), поэтому максимальная частота гармоник равна  $2 \cdot 10^8$  Гц. Тогда условие (1) выполняется при  $C_1 \ll 1.6$  пФ.

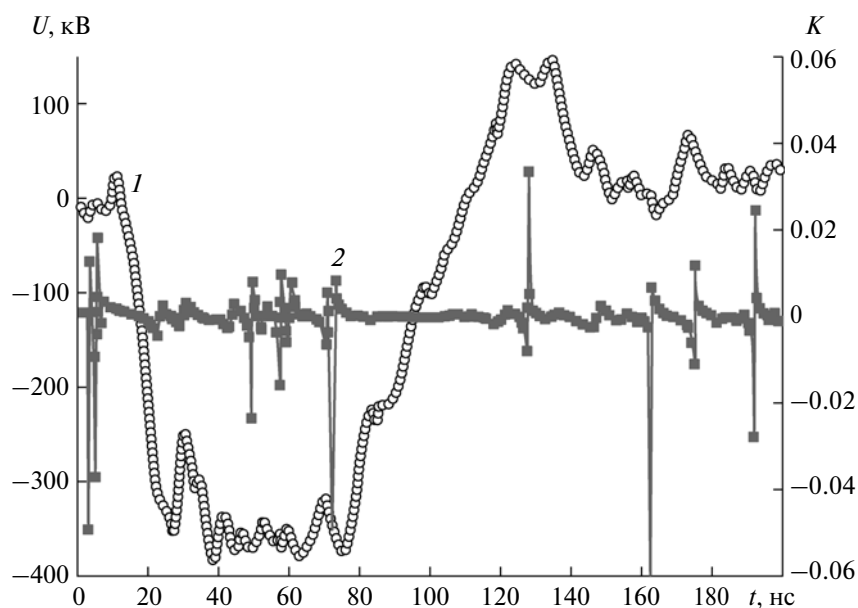
На основе экспериментальных осциллограмм рассчитаем критерий  $K$  в условии (4). При калибровке дифференциального делителя по показаниям емкостного делителя (см. рис. 3) получено, что полное напряжение на катоде равно интегралу регистрируемого осциллографом напряжения  $U_R$ , умноженному на 370. Отсюда получим, что емкость дифференциального делителя (на потенциальный диск катодного узла) равна 0.054 пФ. На рис. 4 показано изменение параметра  $K$  в течение генерации электронного пучка, где параметр  $K \ll 1$ , что указывает на корректность использования дифференциального делителя напряжения в ускорителе ТЭУ-500.

Важным условием корректного измерения импульсного напряжения с помощью дифференциального делителя напряжения является низкая проводимость с потенциального диска на электрод дифференциального делителя. При вакууме в диодной камере ускорителя ТЭУ-500 более 0.01–0.02 Па форма сигнала (после интегрирования) при  $t > 20$ –30 нс значительно отличалась от сигнала с емкостного делителя напряжения.

Выполненный анализ режима работы малогабаритного дифференциального делителя напря-



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения на выходе дифференциального (1) и емкостного (2) делителей напряжения; сплошная линия — напряжение, рассчитанное по показаниям дифференциального делителя.



**Рис. 4.** Изменение напряжения (1) и параметра  $K$  (2) в течение генерации электронного пучка.

жения показал, что, несмотря на простоту конструкции, он позволяет с высокой точностью измерять высоковольтные импульсы напряжения с длительностью фронта  $< 5$  нс. Для восстановления формы импульса необходимо последующее интегрирование выходного сигнала, что можно выполнить при компьютерной обработке или используя интегрирующую цепь. Разработанный критерий позволяет оценить корректность использования

дифференциального делителя в конкретном высоковольтном генераторе. Малая площадь электрода позволяет значительно снизить негативное влияние паразитных электронов и измерять потенциал катода в вакуумном объеме.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ГК П798 от 17.08.2009 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 22. С. 74.
4. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130.
5. Zhiyong D., Guangsen D. Proceeding 3rd Intern. Symposium on Pulsed Power and Plasma Application. Mianyang, China, 2002. P. 87.
6. Глухова А.А., Ежов В.В. // Труды V Междунар. конф. “Перспективы развития фундаментальных наук”. Томск: ТПУ, 2008. С. 24.
7. Пушкарев А.И., Сазонов Р.В. // ПТЭ. 2008. № 6. С. 103.
8. Пушкарев А.И., Сазонов Р.В. // ПТЭ. 2007. № 5. С. 117.